

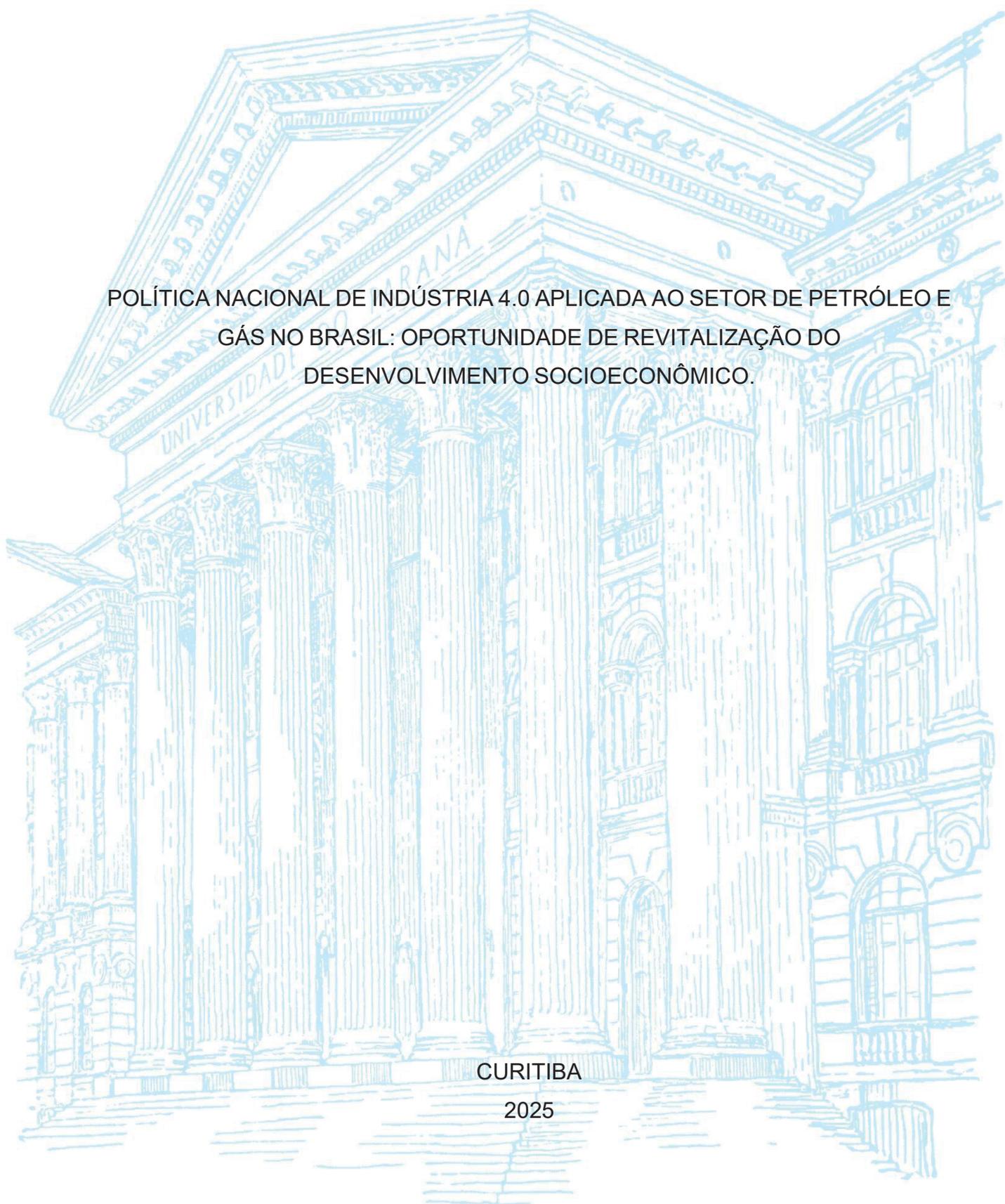
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO CASTELLANO LOPES

POLÍTICA NACIONAL DE INDÚSTRIA 4.0 APLICADA AO SETOR DE PETRÓLEO E  
GÁS NO BRASIL: OPORTUNIDADE DE REVITALIZAÇÃO DO  
DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO.

CURITIBA

2025



MARCELO CASTELLANO LOPES

POLÍTICA NACIONAL DE INDÚSTRIA 4.0 APLICADA AO SETOR DE PETRÓLEO E  
GÁS NO BRASIL: OPORTUNIDADE DE REVITALIZAÇÃO DO  
DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Políticas Públicas.

Orientador: Prof. Dr. Walter Tadahiro Shima

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS

Lopes, Marcelo Castellano

Política nacional de indústria 4.0 aplicada ao setor de petróleo e gás no Brasil : oportunidade de revitalização do desenvolvimento socioeconômico / Marcelo Castellano Lopes .– 2025.

1 recurso on-line: PDF.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas.

Orientador: Profe. Dr. Walter Tadahiro Shima.

1. Políticas Públicas. 2. Industry 4.0. 3. Gás. 4. PETROBRAS.  
5. Petróleo. 6. Política industrial. I. Shima, Walter Tadahiro.  
II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Sociais Aplicadas. Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas.  
III. Título.

Bibliotecária: Kathya Fecher Dias – CRB-9/2198

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação POLÍTICAS PÚBLICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MARCELO CASTELLANO LOPES**, intitulada: **POLÍTICA NACIONAL DE INDÚSTRIA 4.0 APLICADA AO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NO BRASIL: OPORTUNIDADE DE REVITALIZAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO.**, sob orientação do Prof. Dr. **WALTER TADAIRO SHIMA**, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 07 de Março de 2025.

Assinatura Eletrônica

14/03/2025 16:20:29.0

WALTER TADAIRO SHIMA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

17/03/2025 11:46:26.0

JOSE EDUARDO DE SALLES ROSELINO JUNIOR  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS)

Assinatura Eletrônica

08/04/2025 14:08:44.0

FÁBIO DORIA SCATOLIN  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

17/03/2025 11:19:19.0

RICARDO LOBATO TORRES  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## RESUMO

O objetivo desta tese é realizar um mapeamento do sistema de inovação do setor de petróleo e gás, a fim de analisar na Petrobras a capacidade de sustentar uma política setorial de transformação em direção aos conceitos de indústria 4.0. A justificativa se apresenta diante dos desafios que emergem no setor, vinculados à necessidade de disciplina de capital e pressão por transição energética que se beneficiam da eficiência produtiva promovida pelas novas tecnologias. Sendo assim, uma política voltada à introdução do conceito de indústria 4.0 viabiliza a superação desses desafios e o fortalecimento do papel estratégico exercido pela Petrobras, tendo em vista a estrutura de entrelaçamento da companhia com fornecedores locais diretos e indiretos, além do apoio ao desenvolvimento contínuo do sistema nacional de inovação. Dessa forma, políticas industriais são defendidas a partir da capacidade de atuação do Estado por meio desses instrumentos, com a finalidade de articular movimentações nacionais em direção a um objetivo comum. A fim de alcançar os objetivos estabelecidos, os métodos empregados durante esta tese se sustentam em revisões da literatura, revisões sistemáticas e análise descritiva de dados. Buscando elucidar questões associadas ao ambiente de oferta e inovação de diferentes países, dados foram adquiridos do Banco Mundial, da *World Intellectual Property Organization*, da *U.S. Energy Information Administration*, da Relação Anual de Informações Sociais, Instituto Nacional da Propriedade Industrial e Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil. Os principais resultados alcançados apontam para a revitalização do tema de políticas industriais promovidas por articulações colaborativas; o reconhecimento do conceito de indústria 4.0 como uma evolução das tradicionais tecnologias de informação e comunicação; a maleabilidade dessas tecnologias emergentes em função da capacidade de se adaptar aos recursos e objetivos de países distintos; o potencial de aplicação no setor de petróleo e gás para superação de desafios complexos, facilitar a transição energética, reacender o papel estratégico da Petrobras; e o destaque da função desta empresa como locomotiva do processo inovativo nacional. Em síntese, o estabelecimento de uma política de indústria 4.0 para o setor de petróleo e gás, operacionalizada por meio das articulações promovidas pela Petrobras, viabiliza que oportunidades de desenvolvimento abrangentes sejam alcançadas, demandando um planejamento estratégico que seja sustentado pelo entendimento dos recursos disponíveis para articular as ações no território brasileiro.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Petróleo e gás. Política industrial. Sistema de inovação. Petrobras.

## **ABSTRACT**

This dissertation aims to map the innovation system within the oil and gas sector, with a particular focus on assessing Petrobras's capacity to sustain a sectorial transformation policy aligned with the concepts of Industry 4.0. The rationale for this study arises from the challenges emerging in the sector, which are linked to the need for capital discipline and the pressure for energy transition—both of which can benefit from the productive efficiency enabled by new technologies. Thus, a policy aimed at incorporating Industry 4.0 concepts facilitates not only overcoming these challenges but also strengthening Petrobras' strategic role, considering the company's interconnected structure with direct and indirect local suppliers, as well as its support for the continuous development of the national innovation system. In this context, industrial policies are advocated based on the state's capacity to act through such instruments, with the purpose of coordinating national efforts toward a common goal. To achieve the proposed objectives, this dissertation employs a methodological approach based on literature reviews, systematic reviews, and descriptive data analysis. Seeking to elucidate issues related to the supply and innovation environment in different countries, data were obtained from the World Bank, the World Intellectual Property Organization, the U.S. Energy Information Administration, the Annual Report on Social Information (RAIS), the National Institute of Industrial Property (INPI), and the Brazilian National Agency of Petroleum, Natural Gas, and Biofuels (ANP). The main findings highlight the revitalization of industrial policy discussions through collaborative efforts; the recognition of Industry 4.0 as an evolution of traditional information and communication technologies; the adaptability of these emerging technologies to the resources and objectives of different countries; their potential application in the oil and gas sector to address complex challenges, facilitate the energy transition, and reinforce Petrobras's social role; and the company's key function as a driving force in the national innovation process. In summary, the establishment of an Industry 4.0 policy for the oil and gas sector, operationalized through Petrobras' collaborative initiatives, enables the achievement of broad development opportunities. This process requires strategic planning based on a comprehensive understanding of available resources to coordinate actions within Brazilian territory.

**Keywords:** Industry 4.0. Oil and gas. Industrial policy. Innovation system. Petrobras.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>14</b>
1.1 POLÍTICA INDUSTRIAL AVALIADA SOB UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA CONECTADA AOS CONCEITOS DE I4.0.....	14
1.2 EVOLUÇÃO DAS TICS EM DIREÇÃO À EMERGÊNCIA DO CONCEITO DE I4.0. 16	
1.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DO PANORAMA ECONÔMICO E INDUSTRIAL DE PAÍSES PROMOTORES DE POLÍTICAS DE I4.0.....	16
1.4 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS A PARTIR DA I4.0. ....	17
1.5 PETROBRAS COMO PILAR DA PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM I4.0 E DEPÓSITO DE PATENTES.....	18
<b>2 POLÍTICA INDUSTRIAL COMO INSTRUMENTO DE TRANSFORMAÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA: EM BUSCA DO DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>20</b>
2.1 A NATUREZA CRÍTICA DA ATUAÇÃO DO ESTADO NO CONTEXTO DE POLÍTICA INDUSTRIAL.....	20
2.1.1 A COMPLEXA DEFINIÇÃO DE UM AGENTE DINÂMICO E SEU INSTRUMENTO DE ATUAÇÃO.....	21
2.1.2 AS FUNÇÕES E DIFERENTES FORMAS DE OPERAÇÃO DO ESTADO. .	23
2.2 A CAPACIDADE DA POLÍTICA INDUSTRIAL DE FOMENTAR A TRANSFORMAÇÃO ECONÔMICA DOS PAÍSES.....	24
2.2.1 ELEMENTOS FUNDAMENTADORES DA INTERVENÇÃO E ATUAÇÃO PÚBLICA.....	25
2.2.2 A OPERACIONALIZAÇÃO DAS POLÍTICAS INDUSTRIAIS: SELETIVIDADE E COMPATIBILIDADE. ....	28
2.2.3 O DIRECIONAMENTO DE UMA POLÍTICA INDUSTRIAL PELAS METAS E OBJETIVOS. ....	29
2.2.4 A CONFIGURAÇÃO INSTITUCIONAL DE UMA POLÍTICA INDUSTRIAL CONTEMPORÂNEA. ....	31
2.3 A OPERACIONALIZAÇÃO DE POLÍTICAS INDUSTRIAIS CONTEMPORÂNEAS POR REDES COLABORATIVAS.....	32
2.3.1 REDES DE EMPRESAS EM UMA CONFIGURAÇÃO COLABORATIVA. ...	33

2.3.2	HÉLICE TRIPLA E A OPERACIONALIZAÇÃO DE COMPETÊNCIAS DISTINTAS.....	34
2.3.3	POLÍTICA INDUSTRIAL OPERACIONALIZADA PELO CONCEITO DE SISTEMA DE INOVAÇÃO.....	35
2.4	A VINCULAÇÃO DOS CONCEITOS DE POLÍTICA INDUSTRIAL E I4.0: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA. ....	37
2.4.1	AVALIAÇÃO DAS POLÍTICAS INDUSTRIAIS BASEADAS EM TERMOS COMPARATIVOS. ....	37
2.4.2	ANÁLISE DE INSTRUMENTOS E POLÍTICAS IMPLEMENTADAS. ....	39
2.4.3	OPORTUNIDADES MOTIVADORAS E BARREIRAS PREVENTIVAS À ADOÇÃO DA I4.0.....	41
2.4.4	ATUAÇÃO ESTATAL COMO INCENTIVO À ADOÇÃO DA I4.0. ....	43
2.5	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.....	46
<b>3</b>	<b>NOVAS OPORTUNIDADES DE APLICAÇÃO DE TICS CONDICIONANDO A EMERGÊNCIA DO CONCEITO DE I4.0 .....</b>	<b>48</b>
3.1	A HABILITAÇÃO DE UM NOVO AMBIENTE PRODUTIVO MEDIANTE EVOLUÇÃO DAS TICS.....	49
3.2	I4.0: AVANÇOS TECNOLÓGICOS EM DIREÇÃO À PRODUÇÃO INTELIGENTE.....	53
3.2.1	I4.0 COMO CONTINUIDADE À TERCEIRA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL. ..	53
3.2.2	ORIGEM E MOTIVAÇÃO DO CONCEITO DE I4.0. ....	55
3.2.3	AMEAÇAS RELACIONADAS À IMPLEMENTAÇÃO DA I4.0.....	57
3.2.4	ELEMENTOS HABILITANTES E OPERACIONALIZAÇÃO DA I4.0.....	59
3.3	TECNOLOGIAS INTEGRADAS AO CONTEXTO DE I4.0.....	63
3.3.1	INTERNET DAS COISAS: A INFRAESTRUTURA COMUNICATIVA DA I4.0. 64	
3.3.2	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E APRENDIZADO DE MÁQUINAS: A HUMANIZAÇÃO DOS COMPUTADORES.....	67
3.3.3	<i>BIG DATA</i> COMO REPOSITÓRIO PARA NÍVEIS CRESCENTES DE DADOS.....	68
3.3.4	COMPUTAÇÃO EM NUVEM COMPETINDO COM A NECESSIDADE DE CAPITAL FÍSICO. ....	70
3.3.5	BLOCKCHAIN: DE AMEAÇA À CENTRALIZAÇÃO FINANCEIRA PARA INSTRUMENTO DE VALIDAÇÃO PÚBLICA. ....	71

3.3.6	SEGURANÇA CIBERNÉTICA FRENTE A UM AMBIENTE TOTALMENTE CONECTADO. ....	72
3.4	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.....	73
<b>4</b>	<b>PANORAMA ECONÔMICO E INDUSTRIAL DE PAÍSES PROMOTORES DE POLÍTICAS DE I4.0</b> .....	<b>75</b>
4.1	PLURALIDADE DE MOTIVAÇÕES COM BASE NO DESEMPENHO ECONÔMICO E INOVATIVO.....	76
4.1.1	ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO COMO MOLDADOR DOS OBJETIVOS ATRELADOS À IMPLEMENTAÇÃO E PRODUÇÃO DE I4.0. ....	77
4.1.2	APOIO À ATIVIDADE INOVATIVA A PARTIR DO INVESTIMENTO EM P&D. ....	80
4.1.3	CONSOLIDAÇÃO DO DESEMPENHO INOVATIVO A PARTIR DE PATENTES CONCEDIDAS.....	83
4.2	INFRAESTRUTURA INDUSTRIAL COMO APOIO PARA A ELABORAÇÃO DE UMA POLÍTICA VOLTADA À I4.0. ....	85
4.3	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.....	90
<b>5</b>	<b>I4.0 APLICADA AO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS: SUPERAÇÃO DOS DESAFIOS CORRENTES POR MEIO DA DIGITALIZAÇÃO</b> .....	<b>92</b>
5.1	NECESSIDADE DE DIGITALIZAÇÃO FRENTE A INCERTEZAS MERCADOLÓGICAS .....	93
5.2	TRANSFORMAÇÃO DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS PELAS TECNOLOGIAS DE I4.0.....	96
5.2.1	SUBDIVISÕES ATRELADAS ÀS ATIVIDADES DE PETRÓLEO E GÁS.....	97
5.2.2	OPORTUNIDADES E BENEFÍCIOS ASSOCIADOS ÀS TECNOLOGIAS DIGITAIS NO SETOR DE P&G.....	98
5.2.3	MODELOS E APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS NO SETOR DE P&G. ....	101
5.3	OPORTUNIDADES DE DESENVOLVIMENTO NACIONAL VINCULADO À DIGITALIZAÇÃO DA PETROBRAS .....	105
5.3.1	PETROBRAS COMO INSTRUMENTO DA SOBERANIA NACIONAL E INDEPENDÊNCIA ESTRANGEIRA. ....	105
5.3.2	CONFIGURAÇÃO ATUAL DO SETOR DE P&G NO BRASIL.....	108
5.3.3	I4.0 APLICADA À PETROBRAS: PLANO ESTRATÉGICO DE DIGITALIZAÇÃO. ....	111

5.3.4	INICIATIVA DE DIGITALIZAÇÃO DE CAMPOS PELA PETROBRAS: GERENCIAMENTO DIGITAL INTEGRADO DE CAMPOS.....	116
5.4	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.....	118
<b>6</b>	<b>PETROBRAS: PILAR DA PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO NACIONAL NA ERA DA I4.0. ....</b>	<b>120</b>
6.1	PROTAGONISMO DA PETROBRAS FRENTE AO DEPÓSITO DE PATENTES EM AMBIENTE NACIONAL.....	121
6.2	PROTAGONISMO CIENTÍFICO TRANSFERIDO PARA A ERA DAS TECNOLOGIAS DE I4.0.....	126
6.2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS PROJETOS VINCULADOS À TEMÁTICA DE I4.0. ....	127
6.2.2	PARCERIAS ESTRATÉGICAS DESENVOLVIDAS PARA AS PESQUISAS DE I4.0. ....	130
6.3	APLICAÇÃO DE SOLUÇÕES DE I4.0 NO AMBIENTE DE PETRÓLEO E GÁS ....	132
6.3.1	ROBÔ ANNELIDA: INSPIRAÇÕES DA NATUREZA FOMENTADA PELA COLABORAÇÃO ATIVA. ....	133
6.3.2	LIBRA 4.0: DESENVOLVIMENTO DE GÊMEOS DIGITAIS POR MEIO DA COLABORAÇÃO INTERNACIONAL.....	135
6.4	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.....	137
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>140</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>144</b>

## INTRODUÇÃO

Esta tese está construída em um arcabouço teórico sustentado pelo tema de política industrial, sistemas de inovação, tecnologias de informação e comunicação e o inter-relacionamento destas abordagens para o setor de petróleo e gás no Brasil. Nesse sentido, essa indústria se destaca tanto pela importância da Petrobras na construção de redes produtivas e colaborativas nacionais quanto pelo seu papel central na promoção e disseminação de tecnologias em um setor altamente competitivo no cenário internacional, gerando efeitos de transbordamento que beneficiam cadeias produtivas e atores adjacentes. Adicionalmente, o setor passa por um período volátil por conta de fatores externos, como o choque de oferta causado pela pandemia do Covid-19, conflitos geopolíticos, transição energética e, no caso brasileiro, uma desconfiança institucionalizada nos últimos anos acerca da capacidade da Petrobras em assumir um protagonismo nas políticas de desenvolvimento socioeconômico.

Partindo dessa conjuntura, a tese se apoia na atuação pública mediante a elaboração e implementação de uma política industrial. A partir de um objetivo concreto de desenvolvimento, o poder público é capaz de estimular ações dos mais variados atores produtivos e científicos, como empresas, agências reguladoras, universidades, centros de pesquisa, entre outros. Desse modo, forma-se uma rede colaborativa que impulsiona soluções tecnológicas para enfrentar os desafios mencionados, estruturando um sistema de inovação.

Entretanto, a etapa de definição dos objetivos e convencimento da atuação conjunta dos atores demanda o reconhecimento de benefícios que podem ser absorvidos pelas partes envolvidas. Sobre isso, o setor de tecnologias da informação e comunicação (TICS) vem atravessando um período de evolução das suas bases e potenciais tecnológicos em direção ao conceito de Indústria 4.0 (I4.0)<sup>1</sup>, originalmente apresentado na Alemanha por meio de uma política industrial nacional, que se fundamenta na produção e introdução de tecnologias inteligentes. Dentro desse ambiente produtivo, as tradicionais TICS passam por um período de evolução que viabiliza a emergência de potenciais comunicativos ímpares entre os atuais

---

<sup>1</sup> A partir deste ponto todas as menções relacionadas à Indústria 4.0 serão representadas pela sigla I4.0.

equipamentos empregados durante toda a cadeia de produção. Como exemplo, os menores dispositivos estão em constante coleta de dados, que são transferidos para um servidor, passam por um processamento minucioso e engatilham tomadas de decisão ágeis e assertivas, seja pelos especialistas de plantão ou pela inteligência artificial empregada no processo. Dessa forma, ao serem introduzidas essas tecnologias no setor de petróleo e gás, estabelece-se uma nova fronteira de processos inteligentes, capazes de aprimorar tarefas como o gerenciamento e manutenção de ativos, o aprofundamento nos processos de aquisição e processamento de dados sísmicos, a otimização da produção e o aumento de eficiência energética, entre outros.

Com base neste cenário, a tese é elaborada com o objetivo de apresentar esses fundamentos teóricos e avaliar o estágio de maturidade do sistema de inovação digital do setor de petróleo e gás nacional, visando sustentar uma política setorial de produção tecnológica frente aos conceitos de I4.0. Desse modo, apresenta-se uma hipótese de pesquisa que identifica na Petrobras a capacidade de atuar como locomotiva para a construção de um ambiente de oferta de soluções tecnológicas para o setor brasileiro e internacional. Para isso, os capítulos são estabelecidos diante de objetivos específicos que se complementam para atender o objetivo geral da tese. Nessa linha, o segundo capítulo endereça as questões que envolvem o debate acerca da instrumentalização de uma política industrial e busca reforçar os modos como esse mecanismo pode ser utilizado para incentivar uma ação conjunta dos atores nacionais em um sistema de inovação.

Após a discussão sobre a relevância de uma política industrial, o terceiro capítulo introduz o tema de I4.0, destacando como essas novas tecnologias ultrapassam um processo de evolução das bases tecnológicas pertencentes ao complexo de TICS. Portanto, o objetivo específico do capítulo é apresentar o quadro tecnológico que tem sido configurado e que é responsável por renovar o interesse pelo planejamento estratégico dos países, com foco no desenvolvimento desses novos ambientes produtivos inteligentes.

O quarto capítulo estabelece uma conexão entre os dois anteriores, com o objetivo de destacar, primeiramente, o ambiente econômico, produtivo e digital presente nos Estados Unidos, Alemanha, França, Reino Unido, Japão, Coreia do Sul, China e Brasil. Na sequência, o capítulo aborda a maleabilidade do conceito de I4.0 ao se adaptar aos objetivos específicos de cada país, apresentando-se as diferentes

políticas que vêm sendo implementadas. Dessa forma, o mapeamento das condições de oferta de produção e inovação nos diferentes países, juntamente aos esforços voltados para o emprego de políticas direcionadas ao conceito, constitui o objetivo específico do capítulo.

Na sequência, o quinto capítulo aprofunda as análises realizadas sobre o setor de petróleo e gás, destacando os principais desafios que se estabelecem no setor, e as motivações por trás de políticas digitais, a fim de dar início a um processo de transformação das atividades tradicionais. Nessa linha, o objetivo específico é estabelecido por meio da demonstração de como os conceitos e tecnologias vinculados à I4.0 podem ser aplicados nesse setor, especialmente pela Petrobras, a fim de superar os diversos desafios estabelecidos. Além disso, o capítulo tem como objetivo reforçar a importância da empresa em direcionar políticas para o setor, tendo em vista a capacidade de gerar efeito de transbordamento sobre diferentes setores nacionais.

Por fim, o sexto capítulo explora o papel da Petrobras na construção e desenvolvimento de um sistema de inovação, destacando sua participação no depósito de patentes, o comprometimento com projetos de pesquisa relacionados à temática de I4.0, e apresentando casos específicos que ilustram a habilidade da empresa em promover redes colaborativas focadas na produção de inovações. Sendo assim, o objetivo específico é avaliar a habilidade da Petrobras em articular redes colaborativas que venham a contribuir com a oferta de soluções tecnológicas de alta intensidade de conhecimento.

## 1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos específicos apresentados na seção introdutória, esta tese é estruturada a partir de diferentes métodos, adequados à construção de cada capítulo. Dessa forma, são realizadas revisões teóricas, sistemáticas e análises descritivas de dados quantitativos de diferentes fontes. Cada um dos métodos é descrito na sequência.

### 1.1 POLÍTICA INDUSTRIAL AVALIADA SOB UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA CONECTADA AOS CONCEITOS DE I4.0.

O segundo capítulo da tese é dividido em duas etapas: revisão da literatura tradicional de política industrial e uma revisão sistemática para a aplicação do conceito de I4.0 dentro desse cenário. Diante disso, a literatura tradicional de política industrial está baseada nas discussões pormenorizadas a respeito da atuação do Estado, na instrumentalização política para estimular a transformação produtiva e na operacionalização contemporânea por meio de redes colaborativas, que elencam as questões de sistemas de inovação. Tendo em vista a existência de uma literatura consolidada sobre o tema, busca-se estabelecer uma fundamentação sólida para as discussões propostas.

A partir das discussões sobre os impactos da I4.0 nas políticas industriais, o capítulo realiza uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de atualizar as discussões, permitindo a identificação de lacunas a serem preenchidas neste campo teórico. A fim de obter os trabalhos que relacionam ambos os temas, alguns critérios são estabelecidos. Em primeiro lugar, as bases acessadas foram a SCOPUS e Web of Science (WoS), tendo em vista a pluralidade de trabalhos que são indexados no passar dos anos. Na linha dos critérios temporais, o recorte foi realizado entre o início do ano de 2011, quando o conceito de I4.0 foi formalmente apresentado, e o momento da coleta dos dados, em janeiro de 2024. As demais estratégias de busca são apresentadas no QUADRO 1 abaixo.

QUADRO 1 – ESTRATÉGIA DE BUSCA SISTEMÁTICA PARA O TEMA DE I4.0 APLICADA ÀS POLÍTICAS INDUSTRIAIS E DE INOVAÇÃO.

Critérios	Scopus	Web of Science
Data de Coleta	02/01/2024	
Recorte temporal	01/01/2011 – 31/12/2023	
Restrição específica	Título, palavras-chave; resumo.	Todos os campos.
Estratégia de busca	( TITLE-ABS-KEY ( "industry 4.0" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "advanced manufacturing" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "fourth revolution" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "4th revolution" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "public polic*" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "government intervention" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "industrial polic*" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "innovation polic*" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "development polic*" ) ) AND PUBYEAR > 2010 AND PUBYEAR < 2024	
Idioma	Inglês e português	Não definido
Tipo de documento	Artigos	Não definido
Tipos de estudo	Teórico e empírico.	Teórico e empírico
Áreas específicas	Ciências sociais, administração e economia.	Gerenciamento, Economia, Administração, Ciências Sociais Multidisciplinares, Ciência Política e Administração Pública.
Resultado geral	134	60
Resultado final	60	9

FONTE: Elaborado pelo autor.

No que diz respeito à estratégia de pesquisa estabelecida, buscou-se associar as quatro denominações mais citadas em políticas governamentais com diferentes expressões definidas no âmbito de atuação pública. Em relação às áreas específicas, textos técnicos de engenharia foram deixados de lado para dar um enfoque apenas nas discussões teóricas que envolvem conceitos de administração, economia e ciências sociais e políticas, gerando um total de 134 trabalhos encontrados na base da Scopus e 60 na WoS.

Entretanto, 38 trabalhos duplicados foram removidos da base WoS, resultando em 22 estudos que passaram pela triagem de resumos para identificar aqueles que poderiam contribuir para a temática de I4.0 sob a ótica das políticas e da atuação pública. Como resultado, o número final de contribuições discutidas ao longo deste trabalho foi de 60 artigos indexados na base Scopus e nove na base WoS.

## 1.2 EVOLUÇÃO DAS TICS EM DIREÇÃO À EMERGÊNCIA DO CONCEITO DE I4.0.

O capítulo seguinte revisa a literatura sobre a base tecnológica que sustenta a emergência do conceito de I4.0. Para isso, apoia-se em levantamentos teóricos realizados na dissertação de mestrado do autor, que aborda as TICS, permitindo a exploração de conceitos tradicionais dessa base (Lopes, 2019). Além disso, são exploradas questões sobre as tecnologias emergentes baseadas no conceito de I4.0, destacando sua conexão com a terceira revolução industrial, a motivação por trás do tema, os desafios da implementação e os elementos habilitantes.

Por fim, é apresentada uma discussão teórica a respeito das principais tecnologias que compõem o contexto de I4.0, tomando como princípio norteador as contribuições de Ghobakhloo (2018), que identifica 12 princípios constituintes e 14 tendências tecnológicas. Com base nisso, são abordadas tecnologias como sistemas ciberfísicos, internet das coisas, inteligência artificial, aprendizado de máquina, *big data*, computação em nuvem, *blockchain* e cibersegurança.

## 1.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DO PANORAMA ECONÔMICO E INDUSTRIAL DE PAÍSES PROMOTORES DE POLÍTICAS DE I4.0.

Este capítulo realiza uma análise descritiva de dados direcionados à construção do quadro econômico e industrial de diferentes países, e um levantamento bibliográfico a respeito das políticas que vêm sendo implementadas pelo mesmo grupo, demonstrando como diferentes estágios de desenvolvimento podem levar a políticas com objetivos distintos, mas adequados aos recursos disponíveis e às vantagens comparativas de cada país. Em relação ao grupo, a seleção tomou como

base o pioneirismo nas práticas de I4.0, experiências de sucesso no desenvolvimento por meio de políticas industriais e a inclusão de países emergentes, sendo composto por: Brasil, China, Coréia do Sul, Alemanha, Estados Unidos, França, Reino Unido e Japão.

Em um primeiro momento, consultou-se o banco de dados do Banco Mundial, conhecido como *World Development Indicators – DataBank*, onde obteve-se acesso a informações relacionadas ao produto interno bruto, população e investimento em P&D. Tais dados foram representados em gráficos para mostrar a evolução do PIB per capita e investimento em P&D proporcional ao PIB. Na sequência, visando a exposição de dados relacionados à capacidade inovativa dos países, o banco de dados da *World Intellectual Property Organization* foi acessado, permitindo a aquisição de informações atreladas ao número total de patentes concedidas durante o período de 2001 a 2021. Ressalta-se que não houve qualquer tipo de filtragem desses dados a partir de setores específicos, tomando como base a capacidade pervasiva de aplicação dos conceitos de I4.0.

No momento em que as análises se concentram nos aspectos relacionados ao desenvolvimento do setor industrial dos países, o banco de dados do Banco Mundial voltou a ser acessado, o que permitiu a aquisição de dados vinculados ao valor adicionado pela manufatura em relação ao PIB, à participação de trabalhadores neste setor e a exportação de itens de alta intensidade tecnológica. A partir da análise descritiva, foi possível desenhar um quadro geral a respeito do processo de desindustrialização que a maioria dos países têm atravessado nos últimos anos, evidenciando a necessidade de que se estabeleça uma política industrial para revitalizar o setor.

#### 1.4 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS A PARTIR DA I4.0.

O quinto capítulo combina levantamento bibliográfico, com foco em relatórios industriais a respeito de tendências e desafios do setor, artigos científicos para identificar oportunidades, potencialidades e aplicações práticas das tecnologias emergentes, além de um estudo de relatórios estratégicos vinculados às iniciativas das Petrobras. Adicionalmente, é feita uma análise descritiva dos dados utilizados

para sustentar o cenário desafiador do setor e a transformação da mão de obra vigente nesse segmento no país.

Dessa forma, dados vinculados a *U.S. Energy Information Administration* foram acessados para ilustrar a volatilidade no preço do barril do petróleo, o que estabelece desafios sobre a tomada de decisão estratégia das empresas. Além disso, o banco de dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) também foi acessado para que se extraíssem informações sobre a formação dos profissionais vinculados à divisão 06 dentro da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE 2.0), elaborada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e que faz menção à extração de petróleo e gás natural dentro da seção de indústrias extrativas. Ademais, os dados relacionados ao nível de educação acabam sendo agrupados em diferentes níveis: fundamental completo e incompleto (incluindo analfabetos), médio completo e incompleto, superior completo e incompleto, mestrado e doutorado.

## 1.5 PETROBRAS COMO PILAR DA PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM I4.0 E DEPÓSITO DE PATENTES.

O sexto capítulo realiza a exposição dos dados que reforçam a importância da Petrobras no processo inovativo brasileiro, tendo em vista a centralidade da empresa frente ao processo de depósito de patentes e, além disso, o comprometimento com pesquisas vinculadas às novas tecnologias integrantes do conceito de I4.0.

Para o primeiro ponto, com foco no processo de patenteamento das invenções, a pesquisa busca replicar as análises realizadas por Bazzo e Porto (2013). Para isso, dados foram extraídos da base do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). A partir da lista de depósitos de patentes, foram selecionados apenas os pedidos vinculados a entidades brasileiras de natureza jurídica, limitando o total a 83.162 pedidos desde o ano 2000. Em seguida, os pedidos foram concentrados naqueles vinculados às empresas da Petrobras, abrangendo desde a matriz até o centro de pesquisa da companhia, resultando em 1.516 depósitos. Por fim, foi também avaliado o processo de coautoria com diferentes entidades jurídicas que variam entre empresas, universidades e institutos de pesquisa, sendo realizado um mapeamento

das redes existentes nesse sistema. Assim, foi novamente apresentado e reforçado o comprometimento da Petrobras na atuação como locomotiva do processo inovativo nacional.

Na sequência, a base de dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil (ANP) é acessada com base nos diferentes projetos encomendados pela agência, diante da sua responsabilidade de promover a pesquisa e adoção de novas tecnologias estabelecida por meio da Lei nº 9.478/1997. Essa obrigação se reflete em um requerimento contratual para os projetos de exploração, desenvolvimento e produção, onde as empresas devem investir 1% da receita bruta nos campos com participação especial e de 0,5% a 1% nos demais blocos. Tal prática é orientada pela resolução nº 918 de março de 2023<sup>2</sup>. A fim de dar transparência ao requerimento, a agência disponibiliza uma lista que contém os 4.230 projetos iniciados até julho de 2024, trazendo uma série de informações relacionadas aos objetivos, responsabilização, execução, qualificação e valor de cláusula para cada um.

A partir desses dados, uma leitura dos títulos e objetivos permitiu a discriminação de 622 projetos potencialmente vinculados à temática de I4.0, viabilizando uma especificação adicional a partir da identificação de palavras-chave nos objetivos, que pudessem distribuir o foco entre pesquisas relacionadas aos temas de inteligência artificial, aprendizado de máquina, robótica, computação em nuvem, blockchain e big data. Por fim, essa construção viabilizou a identificação das diferentes redes colaborativas iniciadas pela Petrobras em território nacional, com a participação de universidades, empresas e institutos de pesquisa, o que formaliza o sistema de inovação no setor de petróleo e gás.

Por fim, o último capítulo apresenta dois estudos de caso de projetos extraídos da base da ANP, que trazem informações que elucidam as operações promovidas pela Petrobras. Desse modo, o projeto do robô Annelida viabilizou a exposição de redes colaborativas por meio de artigos acessados na internet, enquanto o projeto Libra 4.0 foi avaliado a partir de um podcast em que diferentes atores do projeto dialogam a respeito das motivações, barreiras e operacionalização da rede colaborativa formada por diferentes empresas multinacionais atuantes no setor.

---

<sup>2</sup> Disponível em <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-918-2023-regulamenta-o-cumprimento-da-obrigacao-de-investimentos-decorrente-da-clausula-de-pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao-dos-contratos-para-exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas-natural?origin=instituicao>. Acesso em Dezembro de 2024.

## 2 POLÍTICA INDUSTRIAL COMO INSTRUMENTO DE TRANSFORMAÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA: EM BUSCA DO DESENVOLVIMENTO

O objetivo deste capítulo é apresentar o conceito de política industrial e discutir a sua importância diante da capacidade de viabilizar a atuação e envolvimento público nas dimensões produtivas e científicas da sociedade. Dessa forma, são definidas diferentes questões que serão abordadas no decorrer do capítulo: Quais os elementos que legitimam a atuação do Estado em uma política industrial? Quais os mecanismos disponíveis para estimular a transformação econômica? Como as políticas industriais contemporâneas são operacionalizadas frente a um mercado de inovação? Como a literatura atual trata o tema de política industrial frente aos conceitos de I4.0?

A justificativa para a construção deste capítulo se alinha com a necessidade de expor o tema de política industrial frente à capacidade de articular ações conjuntas entre atores envolvidos em um sistema de produção e inovação. Nesse ambiente, e conforme será exposto no terceiro capítulo, a I4.0 surge como uma política industrial que visa produzir e introduzir tecnologias emergentes que maximizam os aspectos colaborativos, sintonizando com as abordagens contemporâneas de política industrial desenvolvida a partir de redes colaborativas e sistemas de inovação.

A partir dessas questões, inicialmente são apresentados os elementos que justificam a atuação do Estado na construção de um ambiente institucional que sustenta relações comerciais e produtivas. Em seguida, os instrumentos públicos, a configuração institucional, os critérios de objetivação, a seletividade, compatibilidade e definição de metas são introduzidos para aprofundar a morfologia dinâmica de uma política industrial. Caminhando para o contexto recente destas políticas, há uma aproximação aos conceitos de sistemas de inovação, que estabelecem um ambiente institucional que incentiva a construção de redes colaborativas no processo de produção e inovação. Por fim, uma revisão sistemática da literatura é realizada de modo a conectar o conceito de política industrial com o tema de I4.0.

### 2.1 A NATUREZA CRÍTICA DA ATUAÇÃO DO ESTADO NO CONTEXTO DE POLÍTICA INDUSTRIAL.

Durante esta tese, o conceito de política industrial é encarado como o instrumento central de atuação do Estado no ambiente produtivo (não limitado apenas às atividades de manufatura), viabilizando oportunidades de desenvolvimento socioeconômico. Contudo, tamanha importância demanda que os elementos que justificam e constituem esta instrumentalização sejam apresentados, tais como a capacidade do Estado em se envolver e as respectivas funções e formas de operação, sendo estas sustentadas pelo conceito de instituições.

### 2.1.1 A COMPLEXA DEFINIÇÃO DE UM AGENTE DINÂMICO E SEU INSTRUMENTO DE ATUAÇÃO.

O primeiro passo para entender as formas de atuação do Estado no contexto de uma política industrial se dá pela definição deste agente público, o que se torna complexo diante da morfologia dinâmica e do comportamento polimorfo dessa entidade.

Na linha de conceituação do Estado, as dificuldades emergem a partir de um cenário onde sua definição flutua em uma história permeada por constantes transformações, marcada por inúmeras variações no relacionamento estatal com a população, instituído por regimes monárquicos, feudais e democráticos, para citar alguns, conforme demonstrado por Jessop (2016). Em primeiro lugar, o Estado acaba sendo aceito como um agente comum, capaz de exercer ações como qualquer outro ser humano. Nesta definição, existem recomendações sobre quais ações deveriam ou não ser tomadas. Em segundo lugar, destaca-se a personificação da figura estatal, evidenciada em regimes monárquicos, onde o rei possuía poderes ímpares que resultavam no controle absoluto sobre a sociedade. Por fim, uma terceira representação acaba sendo mais pessoal e próxima do entendimento contemporâneo, onde não há mais uma figura central de atuação (Jessop, 2016).

Diante da dificuldade de definição, Jessop (2016) contribui com um elemento crítico na forma em que as relações com o mercado de regulação, coordenação e influência são operacionalizadas. Neste sentido, estendendo a interpretação da forma especial de relação social, Jessop (2016) propõe uma definição de Estado como sendo “um conjunto complexo de **instituições**, organizações e interações envolvidas no exercício da liderança política e na implementação de decisões que são, em

princípio, coletivamente endereçadas aos seus sujeitos políticos” (Jessop, 2016, p.16, tradução e grifo próprio). A ênfase dada ao elemento institucional se torna crucial diante de uma iniciativa focada em analisar a instrumentalização de uma política industrial.

No que diz respeito às definições de instituições, elas são mais tradicionalmente conceituadas como “as regras do jogo em uma sociedade” (North, 1990, p. 3, tradução própria). Porém, uma definição aprofundada classifica-as como “sistemas ou conjuntos duráveis de normas e regras sociais que estruturam a interação social ao orientar, motivar, capacitar, formatar e restringir o comportamento humano” (Pessali, 2015, p. 126). Desse modo, a atuação estatal ocorre de tal maneira que todo um ambiente é construído em torno da sociedade e do mercado, onde as ações de investimento, produção e consumo são estabelecidas e operacionalizadas. Tamanha é a importância deste conceito que Chang (2000) destaca que “[...] o mercado é apenas **uma de várias instituições** que constituem o que a sociedade chama de economia de mercado, ou o que reconhecemos como capitalismo” (Chang, 2000, p. 14, tradução e grifo próprio). Ou seja, as instituições se tornam condicionantes à atuação do Estado, não limitada às atividades de política industrial. Assim, enfatizando o conceito de instituições dentro da definição de Estado proposta por Jessop (2016), é por meio da legitimidade política, concebida diante de um relacionamento social instalado em um território delimitado, que essa entidade é capaz de estabelecer medidas que afetam todos os demais agentes a partir de objetivos definidos, preferivelmente, em caráter social.

Por fim, buscando sintetizar as ideias propostas de definição do Estado e a sua relação com a sociedade, destaca-se que esse é um relacionamento de influência mútua. Ou seja, não somente o Estado define as instituições que afetam o comportamento da sociedade, mas essa própria matriz de ações e legitimações definem o que é o Estado dentro de um determinado recorte temporal. Conseqüentemente, o reconhecimento de qual morfologia é assumida pelo ator público sofre influência do contexto que circunscreve a sua forma de atuação, justificando o porquê de determinadas políticas terem mais ou menos sucesso em diferentes países, mesmo se as práticas adotadas são essencialmente as mesmas.

### 2.1.2 AS FUNÇÕES E DIFERENTES FORMAS DE OPERAÇÃO DO ESTADO.

A partir da definição de Estado como um conceito socialmente construído e baseado na forma de atuação por meio de instituições, Evans (1995) avança no sentido de identificar diferentes funções estatais que estabelecem o ambiente onde a política industrial se insere. Em um primeiro plano, diante das questões de segurança e soberania nacional, ao Estado é instituída a função de promoção de guerras, essenciais nos processos de delimitação territorial. Em seguida, na mesma linha, a garantia da ordem interna estabelece um ambiente estável e propício ao funcionamento do mercado, expondo uma relação de dependência entre ambas as instituições. As duas funções seguintes podem ser analisadas de forma conjunta, tendo em vista a respectiva interdependência e natureza crítica em uma política industrial: fomentar transformação econômica e garantia dos níveis mínimos de qualidade de vida.

Ao focarmos exclusivamente no fomento à transformação econômica, Evans (1995) destaca o entendimento de que o Estado é capaz de induzir a produção de riquezas. Assim, planejamentos estratégicos vêm sendo elaborados e implementados por inúmeros países, por meio de políticas industriais, a fim de posicionar a estrutura produtiva em posições estratégicas nas cadeias globais de produção, tendo em vista que a cesta de produtos exportados podem afetar trajetórias de desenvolvimento econômico (Hausmann et al., 2005).

Dentro desse envolvimento estatal com o ambiente produtivo, Evans (1995) destaca quatro formas distintas de operação não excludentes. O papel de custodiante, ou regulador, assumido pelo Estado, possui o objetivo de restringir, punir ou moldar a atuação do mercado, tendo em vista que resultados indesejáveis podem ocorrer, como poluição, preços abusivos, produtos de baixa qualidade e práticas anticompetitivas. Em segundo lugar, a forma de demiurgo estabelece firmas públicas para competir em mercados domésticos, baseada em cenários onde a iniciativa privada se coloca como incapaz de ofertar determinados produtos. A terceira forma, na posição de parceiro, o relacionamento do Estado com a iniciativa privada ocorre como um auxiliador durante os estágios iniciais de desenvolvimento, capacitando novos empreendimentos e instalação de novos modos de produção. Em quarto, por fim, a função de pastor se aproxima de um papel de demiurgo na medida em que

também busca o estabelecimento de empresas públicas, contudo, com um foco mais direcionado às práticas de auxílio.

Essas funções evidenciam um quadro onde não existe um antagonista nas relações entre a entidade pública e o mercado, e sim uma relação de interdependência onde as relações comerciais e trajetórias de transformação econômica são possibilitadas diante de um constante envolvimento do Estado nas relações sociais. Sendo assim, o “livre mercado” e a máquina capitalista se amarram às instituições públicas a fim assegurar múltiplas fontes de iniciativa, incentivos para prestar atenção aos sinais do mercado e cessar os empreendimentos fracassados (Nelson, 2006). Ou seja, a interdependência existente entre ambos enfatiza a impossibilidade de identificar qualquer mercado livre de instituições públicas e envolvimento estatal (Chang, 2000; Polanyi, 2000; Block, 2000). Contudo, a aproximação de ambas as entidades precisa se estabelecer em um nível intermediário, dando espaço às competências de planejamento e regulação exercidas pelo Estado, mas permitindo que demandas sociais e mercadológicas também influenciem na trajetória de desenvolvimento (Evans, 1995).

A contribuição dessas temáticas para o conceito de política industrial ocorre a partir da visão na qual não existe um protagonista absoluto nos processos de desenvolvimento econômico. A visão de que o contexto de livre mercado seria ideal do ponto de vista da alocação ótima dos recursos se torna infundada na medida em que sua própria existência se torna indissociável de uma atuação pública garantidora de ordem. Por outro lado, há o reconhecimento de que ao Estado não resta apenas o papel de regulador e promotor de instituições normativas, mas de atuação ativa no mercado por estimular a transformação econômica. Sendo assim, o contexto que se constrói é aquele em que ambas as entidades contribuem mutualmente para um interesse comum de transformação.

## 2.2 A CAPACIDADE DA POLÍTICA INDUSTRIAL DE FOMENTAR A TRANSFORMAÇÃO ECONÔMICA DOS PAÍSES.

Conforme exposto na seção anterior, uma das quatro funções do Estado busca afetar a estrutura produtiva. Para isso, a política industrial emerge como o instrumento capaz de mobilizar os agentes envolvidos em direção a um objetivo

estratégico de desenvolvimento. Apesar da nomenclatura expor um enfoque na atividade industrial, ressalta-se que essas políticas contemporâneas não estão limitadas apenas a este ambiente, permeando todas as estruturas produtivas capazes de gerar valor, como nas atividades extrativas, serviços, comércio ou manufatura. Sendo assim, uma conceituação que abraça essa interpretação define políticas industriais como aquelas que “estimulam atividades produtivas específicas e promovem mudança estrutural” (Rodrik, 2008, p. 3, tradução própria).

### 2.2.1 ELEMENTOS FUNDAMENTADORES DA INTERVENÇÃO E ATUAÇÃO PÚBLICA.

Dois conceitos centrais da política industrial estão fundamentados no momento em que a entidade pública exerce sua interferência na estrutura produtiva. O conceito de intervenção pública prevê uma situação em que o Estado fica omissos frente às relações produtivas, intervindo apenas em momentos de desequilíbrio nesta estrutura. Essa ideia é análoga a uma intervenção médica em um paciente debilitado ou intervenção militar em cenários de instabilidade na ordem pública. Porém, o conceito se insere no tema da estrutura produtiva a partir de intervenções motivadas por falhas de mercado, objetivando reequilibrar a alocação dos recursos disponíveis sobre um suposto ponto ótimo (Chang, 1996).

Algumas situações distintas podem ser interpretadas como falhas de mercado, que estabelecem um cenário onde apenas a intervenção do Estado é capaz de retomar um “nível sagrado” de alocação ótima dos recursos. Como primeiro exemplo, o conhecimento básico, adquirido por meio de pesquisas científicas, pode ser caracterizado como um bem público, desestimulando atores privados a desembolsar investimentos altos para alcançar conquistas científicas difíceis de serem monopolizadas (Mazzucato, 2014). Em segundo lugar, empresas consolidadas podem praticar preços comerciais abaixo do custo de produção, inviabilizando a sobrevivência de outros competidores. Esse cenário conhecido como *dumping* expõe uma segunda falha de mercado que penaliza ambientes competitivos, sendo necessária uma intervenção pública intermediada por agências reguladoras e

organizações defensoras da concorrência<sup>3</sup>. Em terceiro lugar, as atividades produtivas podem resultar em consequências indiretas ao ambiente externo à produção, reconhecidas como externalidades. Estas, por sua vez, podem ser negativas, como as que afetam o meio ambiente, fortalecendo a justificativa de intervenção governamental a fim de frear essas externalidades danosas (Aghion et al., 2011; Aiginger e Rodrik, 2020).

Destaca-se que as falhas de mercado expõem situações em que a intervenção pública se torna crucial para que as atividades produtivas possam maximizar o retorno e minimizar as consequências danosas ao ambiente externo. Contudo, elas delimitam um terreno minimalista acerca das capacidades do Estado de influenciar a evolução da estrutura de produção. Deste modo, Cimoli et al. (2007) destacam que essas intervenções ocorrem apenas nos casos mais severos de instabilidade do mercado, tendo em vista que essas falhas são identificadas em todo e qualquer tipo de configuração mercadológica. Além disso, a severidade é encontrada com maior facilidade em países subdesenvolvidos, tendo em vista que as instituições responsáveis de as enfrentar se equiparam ao nível de desenvolvimento do país (Stiglitz, 1989; Rodrik, 2008). Por fim, estas falhas de mercado estabelecem uma ideia na qual o envolvimento do Estado ocorre de modo reativo, o que minimiza as capacidades de atuação por meio de políticas industriais.

Mudando para a linha de atuação pública, esse conceito fundamenta as reais possibilidades que emergem da elaboração e implementação de políticas industriais, estabelecendo um terreno de envolvimento contínuo que permite trocas mútuas entre todos os agentes envolvidos com a atividade produtiva, direta e indiretamente. Dessa forma, ao invés de limitar o Estado ao papel reativo frente ao mercado, constitui-se um contexto em que um planejamento estratégico é traçado objetivando a transformação da estrutura produtiva. Neste cenário, o Estado assume uma função chave de coordenar os esforços produtivos e permitir a disponibilização de recursos compatíveis com a estratégia definida.

Essa configuração de um Estado coordenador encontra suporte a partir da ideia de que a posição assumida pelo país na cadeia de produção global contribui com a respectiva capacidade de desenvolvimento (Evans, 1995). Diante deste

---

<sup>3</sup> Um exemplo para o ambiente brasileiro é o Conselho Administrativo de Defesa Econômica, fundado em 1962, com a missão de zelar pela livre concorrência no mercado (CADE, 2021).

reconhecimento, o Estado incorpora a função de identificar a estrutura de custos da economia e de atuar como agente coordenador dos investimentos públicos e até mesmo os de cunho privado (Rodrik, 2004). Chang (2004) argumenta que muitos dos países hoje desenvolvidos passaram por um processo de identificação de estruturas produtivas antiquadas, com a consequente promoção de políticas industriais protecionistas, compatíveis com as respectivas épocas, que visaram a promoção, evolução e sobrevivência de setores não tradicionais na economia. Na medida em que essas políticas protecionistas alcançavam os objetivos definidos, países desenvolvidos divulgavam “boas práticas” e “boas instituições” que eram incompatíveis com as estratégias que estes mesmos países haviam estabelecido, “chutando a escada” e obstaculizando o desenvolvimento das demais economias (Chang, 2004).

O respaldo dessas práticas governamentais, promotoras do desenvolvimento socioeconômico, se faz valer a partir de evidências empíricas identificadas com relação ao processo de transformação da estrutura produtiva observado em países do leste asiático (Wade, 1990; Stiglitz, 1996). A experiência destes países enfatizam como uma atuação contínua do Estado, instrumentalizada por políticas industriais, viabiliza saltos de desenvolvimento socioeconômico. A experiência taiwanesa destaca como a reforma agrária, a sofisticação da produção agrícola, a promoção de investimentos em setores não tradicionais, a implementação de políticas voltadas à substituição de importação, e o foco dado à exportação, estabeleceram um complexo processo de desenvolvimento que situou o país como um dos principais polos de tecnologias de informação (Wade, 1994). No caso japonês, a atuação do Estado ocorreu por meio da indução e promoção de novas indústrias estratégicas, oferecendo as complementaridades necessárias a fim de alcançar os objetivos traçados. Por fim, essa atuação contínua do Estado é reforçada na experiência sul coreana, sobre a qual o envolvimento público contribuiu para o desenvolvimento industrial e situou o país em uma posição de liderança em níveis de competitividade internacional (Kim, 2005, CNI, 2020).

A níveis contemporâneos de política industrial, o envolvimento do Estado de forma contínua é idealizado, contudo, a partir de uma perspectiva de equiparação e trocas mútuas com diferentes agentes em um sistema de produção e inovação. Diante de um contexto centrado nos avanços científicos e tecnológicos, as políticas industriais se fundamentam em uma perspectiva colaborativa, o que é enfatizado e

destacado dentro da literatura relacionada ao tema de I4.0. Dessa forma, temas relacionados à absorção dos conceitos de hélice tripla e configuração de um sistema de inovação se sobressaem nos debates atuais de política industrial. Ambos os conceitos são minuciosamente trabalhados na seção seguinte.

### 2.2.2 A OPERACIONALIZAÇÃO DAS POLÍTICAS INDUSTRIAIS: SELETIVIDADE E COMPATIBILIDADE.

A ideia de seleção das políticas industriais se torna relevante a partir da suposição de que os recursos são escassos e devem ser alocados de tal maneira que maximizem o retorno produtivo. Assim, as formas de atuação pública são desagregadas em dimensões horizontais e verticais. Para a primeira, o enfoque é dado aos elementos complementares de uma estrutura produtiva, também interpretados como recursos utilizados dentro de uma cadeia de produção, como infraestrutura, universidades, cursos técnicos, oferta de mão de obra, etc. A ideia, portanto, é de que não existe um único setor se beneficiando da política de forma exclusiva.

Em paralelo, a perspectiva vertical de política industrial define que a atuação pública ocorre em um setor ou atividade específica, permitindo que o Estado defina um planejamento estratégico integral para transformar a estrutura instalada. Contudo, embora esta divisão esteja presente na literatura industrial, as discussões contemporâneas destacam a impossibilidade de dissociar uma atuação política de algum nível de discricionariedade em relação aos diferentes setores da economia (Andreoni e Chang, 2016). Como exemplo, uma política focada no desenvolvimento de aptidões científicas e tecnológicas, por meio de centros técnicos de pesquisa, contribui de forma desproporcional para setores e atividades intensivas em tecnologia e conhecimento. Desta forma, Andreoni e Chang (2016) destacam que, ao contrário de contestar a seletividade, deve ser atribuída uma importância maior ao processo de decisão de quais serão os setores afetados. Nesta linha, Stein e Júnior (2016) definem como uma fragilidade do Plano Brasil Maior, lançado em 2011, a objetivação de uma política vertical com perdas de recursos de seletividade e planejamento estratégico.

Na linha de compatibilizar o foco estratégico com os recursos utilizados, o contexto macroeconômico também pode implicar em obstáculos para os objetivos e

metas estabelecidas, o que também é visto quando observamos a experiência brasileira. Bresser-Pereira et al. (2016) destacam que o fracasso das políticas recentes está atrelado ao descaso com as políticas macroeconômicas. Reforçam, ainda, a importância dos instrumentos cambiais, fiscais e monetários anticíclicos. Segundo os autores, uma política industrial voltada para a convergência econômica deve se manter como uma política fiscal anticíclica, política monetária que mantenha a taxa de juros abaixo da taxa de crescimento da economia, política salarial que acompanhe os níveis de produtividade e política cambial que mantenha os níveis de competitividade (Bresser-Pereira et al., 2016).

As questões das políticas macroeconômicas também foram abordadas para o caso sul coreano, mas demonstrando clara predominância dos objetivos industriais frente à estabilidade macroeconômica (Chang, 1996). Entretanto, faz-se necessário que os instrumentos sigam o direcionamento das competências presentes no país (Rodrik, 2008). Um exemplo proposto pelo autor são os bancos de desenvolvimento, que implicam em um ambiente no qual as políticas de crédito podem ter maior facilidade de estabelecer uma legitimidade que auxiliaria no processo de afetar positivamente a estrutura industrial.

### 2.2.3 O DIRECIONAMENTO DE UMA POLÍTICA INDUSTRIAL PELAS METAS E OBJETIVOS.

A definição dos objetivos de uma política industrial não é um processo simples, tendo em vista a pluralidade de atores e interesses envolvidos. No lado dos atores privados, o desenvolvimento da capacidade produtiva e aprimoramento das competências competitivas podem servir de motivadores para o envolvimento com as políticas industriais. Do outro lado, sobre uma perspectiva social, os ganhos de produção atrelados à estrutura produtiva podem implicar em transbordamentos que contribuem com o desenvolvimento socioeconômico. Como agente intermediário, o papel do Estado é estabelecer um ambiente colaborativo transparente quanto aos objetivos privados, públicos e a relação de dependência entre eles (Aiginger e Rodrik, 2020).

Dessa maneira, o interesse privado nas políticas industriais ocorre na medida em que instrumentos de facilitação da atividade produtiva e inovativa são ofertados.

Como resultado, espera-se que as firmas sejam capazes de amadurecer e estabelecer novas estruturas organizacionais que elevem o nível de competitividade frente ao mercado externo. Sobre a ótica social, existem benefícios direta e indiretamente relacionados aos incrementos de produtividade, sofisticação tecnológica, qualidade dos produtos, acessibilidade, desenvolvimento à jusante e montante da estrutura produtiva, empregos, aumento no salário real e etc.

Na linha dos benefícios de uma política industrial, Mazzucato (2018) identifica uma oportunidade para estabelecer grandes avanços tecnológicos que contribuem com a estrutura social. A autora aborda o conceito de políticas orientadas às missões, nas quais o governo estabelece objetivos ambiciosos<sup>4</sup> que auxiliam no processo de transformação industrial. Um exemplo de missão foi a corrida espacial, na qual o governo americano definiu um objetivo central de levar o homem à lua, promovendo os arranjos complementares para que isso fosse possível. Os resultados dessa política são atrelados aos avanços sobre a engenharia espacial e os transbordamentos tecnológicos que penetraram diversos setores. Sendo assim, o ambiente social se depara com desafios complexos que demandam uma ação coordenadora e estratégica do Estado, voltada à definição de objetivos ambiciosos que sinalizam novas oportunidades para o mercado, sendo compatíveis com os interesses sociais.

Em termos concretos, a diminuição no ritmo de crescimento econômico, a retração nos postos de trabalho industrial, as mudanças sociais atreladas à globalização e os desafios ambientais se demonstram como obstáculos sobre os quais o planejamento estratégico governamental é requisitado. Contribuindo com essa questão, as novas tecnologias associadas ao contexto de I4.0, que vêm se desenvolvendo no decorrer deste século, oferecem soluções inovadoras para que estes problemas sejam enfrentados, permitem a implementação de uma estrutura cada vez mais produtiva e oferecem um novo ambiente competitivo onde os principais *players* ainda não foram totalmente definidos.

---

<sup>4</sup> Ao mencionar objetivos ambiciosos a autora reforça a ideia de que estes devem ser encarados como atingíveis pelos agentes privados, correndo o risco de não existir envolvimento caso os objetivos estejam fora do possível.

#### 2.2.4 A CONFIGURAÇÃO INSTITUCIONAL DE UMA POLÍTICA INDUSTRIAL CONTEMPORÂNEA.

A política industrial é um instrumento governamental que necessita do envolvimento dos agentes que estejam operando no setor, tendo a legitimidade dessa política como o elemento capaz de promover a aceitação pública e privada. Rodrik (2004, 2008) destaca três elementos centrais que influenciam a construção desse arcabouço institucional: liderança e suporte político, processo de deliberação e responsabilização.

O primeiro elemento está relacionado com o processo de aceitação da política pelos agentes produtivos e sociedade. Ao estabelecer uma liderança encarregada do processo de implementação, seja um ministro ou o próprio líder do governo, a necessidade acaba sendo mais difundida e o canal de reivindicações da indústria é estabelecido. Como exemplo, a Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior (PITCE), lançada em 2003, teve um papel fundamental em revitalizar o debate de políticas industriais no Brasil (Suzigan et al., 2020), mostrando uma visão alternativa de que é possível passar por um processo de desenvolvimento sustentado por instrumentos institucionais de apoio à indústria nacional.

Em segundo lugar, com base na ideia de autonomia e parceria abordada por Evans (1995), a construção de um ambiente de diálogo entre academia, indústria e governo é fundamental para o processo de aprendizado ao longo da implementação da política industrial. Nesse contexto, reconhece-se que obstáculos surgem ao longo da execução da política, mas esse ambiente de diálogo possibilita a adaptação dos instrumentos ao contexto dinâmico de interferência. Assim, uma política de sucesso precisa ser maleável diante desses ambientes onde as necessidades e demandas são variáveis, reforçando a importância de um relacionamento contínuo entre todas as partes envolvidas.

Por fim, a política industrial deve ser transparente quanto aos instrumentos, objetivos e metas. A exposição desses critérios reforça a legitimidade, tendo em vista que o público pode identificar as motivações e os ganhos provenientes da política. Um dos elementos que diferenciam o processo de substituição de importação implementado nos países do leste da Ásia, em comparação com os latinos, é o insucesso em estabelecer critérios transparentes que suportassem os subsídios e as políticas protecionistas estabelecidas (Bresser-Pereira et al., 2016).

Consequentemente, o estabelecimento de metas explícitas contribui ao facilitar o processo de cessar políticas protecionistas e cortar o cordão umbilical com perdedores (Rodrik, 2008).

Focando no caso brasileiro, Suzigan et al. (2020) destacam que as falhas nas políticas latino-americanas estão relacionadas à incapacidade de induzir mudanças permanentes no comportamento inovativo das firmas. Segundo os autores, os investimentos direcionados ao processo inovativo são positivamente correlacionados com o desempenho econômico. Ou seja, ascendem quando a economia está progredindo, mas retraem durante períodos de recessão. Sendo assim, a importância da construção de um arcabouço institucional, compatível com a estrutura brasileira, ressalta a necessidade de impactar a ação dos agentes de tal forma que os objetivos e metas das políticas sejam alcançados.

Em síntese, a política industrial pode ser entendida como um instrumento complexo de envolvimento do Estado com a função de transformar a estrutura produtiva. Sem se restringir às formas de intervenção pública, o Estado assume o papel de agente responsável por liderar um movimento coordenado entre todos os agentes envolvidos no processo produtivo. Ao estabelecer objetivos e metas estratégicas, a legitimidade da política pode ser aceita pelos demais atores, dando início à construção de redes colaborativas que potencializam as probabilidades de sucesso dessa transformação por meio do processo inovativo. O aspecto crítico da inovação e a operacionalização dessas redes colaborativas serão abordados na seção seguinte.

### 2.3 A OPERACIONALIZAÇÃO DE POLÍTICAS INDUSTRIAIS CONTEMPORÂNEAS POR REDES COLABORATIVAS.

O objetivo desta seção é abordar os conceitos teóricos que fundamentam as discussões contemporâneas a respeito de políticas industriais e sua respectiva operacionalização. Tendo o fomento à inovação como um dos objetivos da atuação pública, reconhece-se que diferentes elementos contribuem com o processo inovativo e, dentro dessas contribuições, inúmeros agentes podem ter maior ou menor participação. À luz disso, conceitos como “rede de empresas”, “hélice tripla” e “sistemas de inovação” constituem o ambiente sobre o qual as políticas industriais

buscam configurar uma dimensão colaborativa que permite a conexão entre os recursos disponíveis.

### 2.3.1 REDES DE EMPRESAS EM UMA CONFIGURAÇÃO COLABORATIVA.

A política industrial também acompanha a evolução do paradigma técnico que embasa as relações produtivas. Exemplo disso é o contraste entre políticas focadas na intensificação produtiva com as centralizadas na construção de um ambiente colaborativo. Durante o período de produção em massa, caracterizado pelo processo fordista, elementos apontados por Shima (2005, p. 340), como economia de escala, rigidez dos processos, elevado grau de divisão e especialização do trabalho, desperdício de materiais, grande uso de espaço físico e elevado consumo de energia, consolidavam um ambiente institucional onde a atuação pública se voltava para oferecer instrumentos compatíveis com esses recursos. Em contrapartida, diante do modelo toyotista de produção, onde os agentes produtivos estabeleciam maior comunicação, os incentivos estavam voltados a constituir escalas de inovação que demandavam a construção de uma estrutura colaborativa que aprimorasse as chances de sucesso durante um processo inovativo (Shima, 2005).

O destaque atribuído à inovação é decorrência de uma transformação incorrida sobre elementos competitivos, os quais se distanciavam da competição por preço. Nas palavras de Schumpeter (2017, p. 122, parênteses meu): “Esse tipo de concorrência (inovação) é tão mais eficaz que a outra (preço) quanto um bombardeio em comparação com arrombamento de uma porta [...]”. Desta forma, a fim de ampliar a capacidade competitiva, alianças estratégicas e redes colaborativas são constituídas diante de características únicas desenvolvidas por cada um dos participantes. Nesta linha, as trajetórias históricas estabelecem diferentes competências que se complementam nestas redes e permitem que o compartilhamento de informações resulte em vantagem competitiva para toda a estrutura. Conforme Shima (2005):

O principal objetivo das redes atuais é ampliar a integração e o relacionamento dinâmico entre seus diversos integrantes, numa perspectiva exclusiva de busca e aperfeiçoamento acelerado de tecnologias e de formas

de apropriação, através do compartilhamento de recursos e de conhecimentos detidos pelas firmas participantes da rede. (Shima, 2005, p. 345).

Em vista disso, observa-se que a estrutura produtiva é composta por diferentes agentes que competem e colaboram entre si, viabilizando um processo de evolução conjunta com a contribuição de todos os participantes. Assim, as políticas industriais se adaptam aos ambientes colaborativos, considerando-se que o próprio Estado possui competências únicas que complementam e são complementadas pelos atores privados.

### 2.3.2 HÉLICE TRIPLA E A OPERACIONALIZAÇÃO DE COMPETÊNCIAS DISTINTAS.

Os conceitos de “hélice tripla” e “redes de empresa” são similares em essência, prevendo a colaboração entre agentes com trajetórias históricas e competências heterogêneas, o que alavanca as chances de sucesso a partir da troca de informações. A diferença entre os conceitos se estabelece por conta dos atores envolvidos nessa cadeia, tendo em vista que, enquanto as redes se limitam às estruturas produtivas, a hélice tripla traz o governo e universidades ao ambiente. Para Etzkowitz (2008) a interação entre estes atores “é a chave para a inovação e o crescimento em uma economia do conhecimento” (Etzkowitz, 2008, p. 1, tradução própria), sendo este o núcleo da vantagem competitiva da firma (Nonaka e Teece, 2001).

No que diz respeito às competências de cada um dos agentes, essa estrutura colaborativa, composta por firmas, universidades e governo, é embasada pelas competências de desenvolvimento produtivo, ensino, pesquisa e o papel coordenador do Estado. Contudo, ressalta-se que a atuação de cada agente não é limitada pela sua função primária, sendo possível exercer as demais competências como funções adjacentes, como os processos de PD&I internos à firma, incubação e oferta de serviços pelas universidades e atuação do Estado, por meio de empresas públicas ou laboratórios públicos de pesquisa.

Com análise em paralelo à operacionalização de redes de empresa, Etzkowitz (2008, p. 8, tradução própria) destaca que “o regime de hélice tripla tipicamente inicia quando universidade, indústria e governo entram em um relacionamento recíproco com cada um de tal forma que cada elemento melhore o desempenho do outro”. Diante de uma iniciativa pautada por políticas industriais, esta estabelece que o início da estrutura não precisa ocorrer de forma orgânica, mas incentivada por objetivos e missões públicas estratégicas, permitindo que diferentes agentes nacionais possam estabelecer ligações colaborativas com os demais agentes, viabilizando um processo de desenvolvimento conjunto.

O conceito de hélice tripla é central no contexto de políticas para a I4.0, sendo identificada a aplicação empírica dessa abordagem diante das diferentes redes nacionais de inovação para a manufatura americana ou da própria plataforma de I4.0 estabelecida no projeto alemão. Nessa linha, o conceito se baseia nos recursos disponíveis e busca constituir um ambiente e operacionalização capaz de afetar de forma positiva todos os participantes de cada estrutura. Contudo, questões institucionais são deixadas em segundo plano, sendo mais aprofundadas diante dos conceitos de sistemas de inovação.

### 2.3.3 POLÍTICA INDUSTRIAL OPERACIONALIZADA PELO CONCEITO DE SISTEMA DE INOVAÇÃO.

Da mesma forma como “redes de empresas” e “hélice tripla” se apresentam como conceitos similares, os “sistemas de inovação” (SI) não se distanciam conceitualmente destas duas primeiras. Contudo, introduzem novos elementos e recortes que complementam as questões trazidas até aqui. Em síntese, os SI podem ser entendidos como uma configuração de rede, composta por agentes distintos, independente da orientação mercantil, que se inserem em um contexto institucional desenvolvido a fim de contribuir com todos os participantes no processo de gerar e difundir inovações. Schrempf et al. (2013) consideram esta abordagem como sendo a mais adequada em “descrever, analisar e entender o processo de inovação nos seus vários níveis, e como pode ser influenciado por *policy makers*” (p. 3, tradução própria).

Partindo do pressuposto de que o processo inovativo é incerto e custoso, o ambiente institucional em que as firmas se inserem contribui de modo a tornar mais

transparentes os desafios a serem enfrentados. Portanto, os SI reforçam a importância das instituições, demonstrando que este ambiente é tão fundamental quanto os agentes no sentido de viabilizar as conquistas da estrutura que está sendo formada.

No que diz respeito ao desenvolvimento do conceito de SI, este possui algumas ramificações que permitem a definição de diferentes focos na formação e operacionalização da estrutura. Dentre os diferentes caminhos conceituais, o primeiro e mais tradicional é composto pelo sistema nacional de inovação (SNI), que observa as instituições e elementos colaborativos a níveis macro. Um caso empírico que sustenta essa variação é o estudo de Freeman (1988), onde o autor destaca a importância governamental, por intermédio do Ministério da Indústria e Comércio Exterior (MITI), das reorganizações e interações internas à firma, além de aspectos sociais associados à educação e treinamento no desenvolvimento japonês.

Ainda em uma linha estabelecida em uma ótica territorial, os sistemas regionais de inovação (SRI) buscam identificar os motivos por trás de diferentes níveis de desenvolvimento em regiões de um mesmo país ou de nações distintas, sendo acrescentada à constatação de que existe uma tendência de concentração dos atores em localizações específicas (Asheim e Gertler, 2006). Dentre os elementos centrais que constituem a justificativa da abordagem, o caráter tácito do conhecimento impõe a necessidade de existir uma proximidade física para auxiliar na transferência de informações, o que é defendido por Asheim e Gertler (2006) e Asheim et al. (2011) na aglomeração de agentes mercantis e não mercantis.

Adicionalmente, o recorte tecnológico estabelece que atores podem estabelecer uma rede colaborativa a fim de explorar oportunidades atreladas a determinadas tecnologias ou matrizes tecnológicas. O conceito de sistema tecnológico de inovação (STI) pode ser entendido como uma “rede de agentes interagindo na área econômica e industrial sob uma infraestrutura institucional particular e envolvido na geração, difusão e utilização de uma tecnologia” (Carlsson e Stankiewicz, 1991, p. 94, tradução própria). Contrastando com as tecnologias da I4.0, as tecnologias constituintes podem ser exploradas e se tornarem objeto de um STI para desenvolver aptidões inovativas no país compatíveis com esse novo arcabouço tecnológico.

Por fim, os sistemas setoriais de inovação (SSI) absorvem ideias de diferentes ramificações entre os SI apresentados, com a necessidade de proximidade e

vinculação às matrizes tecnológicas. Conforme Malerba (2004, p. 16, tradução própria), um SSI pode ser entendido como “um grupo de agentes carregando atividades e relações, mercantis e não mercantis, para a criação, produção e venda desses produtos”. Desse modo, ao visualizar um setor como conjunto de atividades que buscam atender uma demanda existente, um SSI estabelece redes colaborativas com a missão de ofertar inovações compatíveis com os desejos do mercado.

Em resumo, entende-se que as políticas industriais contemporâneas, principalmente aquelas atreladas à I4.0, são definidas em um contexto intensivo nas atividades de ciência, tecnologia e inovação (CT&I). Assim, a justificativa e operacionalização destes instrumentos políticos são fundamentados pelos conceitos de SI, que centralizam as ideias de redes de empresa e hélice tripla, destacando a importância da colaboração entre os agentes pertencentes a este sistema. Somado a isso, as instituições contribuem com a formação de um ambiente transparente, sobre o qual as firmas se sustentam a fim de definir estratégias compatíveis com a demanda do mercado.

## 2.4 A VINCULAÇÃO DOS CONCEITOS DE POLÍTICA INDUSTRIAL E I4.0: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.

O objetivo desta seção é expor os resultados obtidos a partir de uma revisão sistemática, apresentada do QUADRO 1, que busca unir os conceitos de política industrial com as ideias de I4.0, tendo em vista a intenção de situar a presente tese em uma lacuna que se observa na literatura especializada. Com isso, e diante de um contexto em que o fluxo de trabalhos associados ao tema é crescente, o método sistemático permite o estabelecimento de critérios que permitem o aprofundamento teórico não viesado.

### 2.4.1 AVALIAÇÃO DAS POLÍTICAS INDUSTRIAIS BASEADAS EM TERMOS COMPARATIVOS.

O primeiro polo de trabalhos que consolidam o tema de I4.0 e política industrial busca realizar uma comparação entre as estratégias implementadas em diferentes

países, em especial na China, Alemanha e Estados Unidos. Lin et al. (2017) realizam uma comparação entre China e Taiwan e identificam uma diferença na ênfase de cada estratégia, tendo a China um norte nos radicais avanços tecnológicos e industriais, e também no ambiente político, enquanto Taiwan destina maior atenção à transformação industrial e construção de estruturas sistêmicas. Kuo, C.-C. et al. (2019) realizam uma comparação das políticas chinesas com as implementadas nos Estados Unidos e Alemanha, identificando que os três países destinam mais atenção às transformações na dimensão do ambiente de negócios, com priorização nos aspectos políticos.

China e Alemanha são novamente colocadas em comparação por Arbix et al. (2018). Para o lado chinês, os autores destacam a priorização nos processos de digitalização, automação e construção de parcerias estratégicas com grandes empresas, reforçando o processo de tomada de decisão centralizado pelo governo, o que pode se tornar um obstáculo na medida em que a sociedade se diversifica. O mesmo processo de tomada de decisão acaba sendo uma diferença elementar em relação à política alemã, tendo em vista o estabelecimento de uma participação ampla em assuntos estratégicos, envolvendo diversos atores. Simachev et al. (2021) destacam o papel central das políticas industriais no Vietnã, Irlanda e Turquia, que se voltaram à promoção de integração, transformação digital, assistência à pequenas e média empresas, e posicionamento dos países nestas novas tecnologias.

As políticas que vêm sendo implementadas no continente europeu também são objeto da literatura. Teixeira e Tavares-Lehmann (2022) realizam um trabalho exploratório com ênfase no levantamento documental e bibliográfico. Os autores destacam como a ideia de I4.0 tem sido interpretada como uma política defensiva, tendo em vista que muitos países promovem políticas buscando perpetuar uma posição de liderança alcançada no passado, sem deixar de lado o papel proativo de aumentar a produtividade e a expansão para novos mercados. As conclusões apontam para a evidente diferença em termos de infraestrutura digital e a necessidade de apoio governamental para financiamento dos novos projetos. Ainda na Europa, Dyba et al. (2022) avaliam o papel de hubs de inovação digital em popularizar o conceito de I4.0 no continente, focando em três regiões específicas: Vêneto e Friul-Veneza Júlia na Itália, a Grande Polônia e Baden-Württemberg na Alemanha. As conclusões destacam a participação do governo em adotar medidas que impulsionaram a adoção de I4.0 nas empresas e a identificação da região alemã como

a mais propensa a adotar as novas tecnologias. Por fim, o trabalho de Senna et al. (2023) compara as estratégias e barreiras conhecidas para a adoção das novas tecnologias pela manufatura, analisando como as políticas de 27 diferentes países têm endereçado essas questões. Os autores destacaram os investimentos, desenvolvimento da mão de obra e infraestrutura como os principais objetos das políticas.

Em síntese, as análises comparativas de políticas industriais destacam o papel da I4.0 em oferecer inúmeras oportunidades para os países elaborarem e implementarem políticas industriais. Desse modo, o instrumento político acaba sendo capaz de estabelecer missões estratégicas que se adequam às estruturas tecnológicas, produtivas e sociais de cada país, reforçando a inexistência de uma cartilha padronizada de implementação de uma política industrial.

#### 2.4.2 ANÁLISE DE INSTRUMENTOS E POLÍTICAS IMPLEMENTADAS.

Outro âmbito da literatura especializada busca realizar uma análise aprofundada das estratégias, instrumentos e motivações que emergem no contexto de cada país. Embora existam comparações com as políticas implementadas por outras nações, o foco é estabelecido sobre o objeto e implementação de cada política. No exemplo chinês, Li et al. (2021), destacam a importância das políticas para melhorar o ambiente externo para as capacidades inovativas das firmas, e também a importância de uma elaboração compatível com as verdadeiras necessidades dos empreendedores. Para a Rússia, Dezhina et al. (2015) mencionam como o país tem acumulado diversos instrumentos voltados à conexão de empresas com organizações científicas, identificando na manufatura avançada uma necessidade econômica real. As motivações americanas acabam sendo analisadas dentro da literatura quando Weiss (2021) destaca que o contexto geopolítico de ascensão da China influenciou a adoção de políticas fortes, buscando desenvolver o setor de manufatura avançada. Da mesma forma como as demais políticas passadas foram encaradas, o autor também encontra uma motivação vinculada aos aspectos de segurança nacional. A partir disso, Hemphill (2014) estabelece um debate acerca da fundamentação sobre a qual a política americana deve estar baseada no contraste da política industrial com as políticas de inovação. Conclui-se que o país deve se afastar das políticas

tradicionais e estabelecer uma política moderna voltada aos instrumentos inovativos, mesmo que ainda sejam identificadas ações que remetem às práticas clássicas. No contexto europeu, Borowicz (2021) destaca que as políticas emergem impulsionadas por três principais motivações: a transição energética, o aumento da eficiência em mercados singulares e a digitalização de negócios avançados. Apesar de a União Europeia criar condições favoráveis para esses processos, sua implementação depende da articulação dos estados-membros em ações mais específicas. Nessa linha, Brodny e Tutak (2023) destacam o sucesso do governo tcheco em desenvolver inteligência artificial por meio de altos investimentos, e também o sucesso da Estônia com políticas governamentais de longo prazo.

Artigos relacionados com o contexto espanhol também foram identificados na literatura. Braña (2019) estabelece questões centrais que motivam a atuação pública no sentido de transparecer as limitações nacionais e auxiliar nos aspectos de falhas de coordenação. Ao observar a intensificação da digitalização, o autor destaca problemas que emergem sobre as dimensões de empregos e automação de funções. O país Basco e a região da Catalunha também são objeto de posicionamento do ambiente industrial frente aos avanços técnicos. Sandulli et al. (2021) destacam que, no primeiro, encontra-se um SI influenciado por políticas passadas, mas com falta de base científica e de conhecimento. Em contrapartida, para o segundo, embora seja um grande polo industrial espanhol, a identificação com a I4.0 ainda é insuficientemente difundida, requisitando políticas de divulgação. Em suma, os autores identificam diferentes caminhos viáveis para a adoção do conceito de I4.0, mas que dependem das condições pré-existentes do SI instalado.

Em relação à China, Zhang et al. (2021) apontam para a posição estratégica das tecnologias de Internet das Coisas, que fundamentam o conceito de I4.0. Sobre estas, os autores destacam a participação central do governo chinês em promover um ambiente de IoT, protocolos, áreas de aplicação e previsão de tendências tecnológicas. O foco nas tecnologias digitais também vem sendo estabelecido pelo governo russo, que busca uma transição do modelo de crescimento do petróleo para inovação e desenvolvimento dessas tecnologias (Romanona e Kuzmin, 2020). Casalet e Stezano (2021) também observam o aspecto crítico das tecnologias digitais sobre o desenvolvimento mexicano, sobre o qual associações industriais e o apoio governamental em CT&I têm estabelecido capacitações básicas para o lançamento da I4.0. Além disso, Diegues e Roselino (2023) avaliam a evolução da guerra

tecnológica entre China e Estados Unidos, destacando como o país asiático tem buscado uma transformação permanente da produção doméstica e uma independência da produção americana.

Por fim, questões envolvendo critérios geográficos e envolvimento com setores tradicionais da indústria também são identificados. Em primeiro lugar, Sunley et al. (2021) avaliam questões geográficas no Reino Unido, identificando a concentração da manufatura avançada em setores tradicionais. Esse contraste das novas tecnologias e setores tradicionais também é evidenciado por Cleave et al. (2017), quando os autores apontam para uma transição do planejamento de setores tradicionais para aqueles baseados nas tecnologias emergentes. Ainda na Europa, a política do Smart Specialization, lançada em 2014, é avaliada por Wigger (2023), que destacou o questionamento em volta da política para a diminuição de disparidades regionais e a sustentação em competências já comprovadas, ao invés de fomentar novas especializações. O desenvolvimento regional de Israel é endereçado por Zonnenshain et al. (2020), onde os autores trazem diversas medidas implementadas pelo governo durante os anos de 2014 e 2015, que buscaram expandir o desenvolvimento industrial para o norte do país, que se tornou, por sua vez, objeto das políticas de I4.0 a partir do respectivo advento. Por fim, aspectos regionais são novamente mencionados por Grodach e Gibson (2019), sendo estes capazes de diferenciar as prioridades políticas.

Em suma, a revisão de políticas busca identificar aspectos que se sobressaem em cada contexto específico, seja pelas motivações de segurança nacional estabelecidas pelos Estados Unidos, adaptação dos sistemas de inovação instalados à I4.0, priorização das tecnologias digitais ou influências de aspectos regionais sobre o desenvolvimento dos novos setores. Entretanto, observa-se uma lacuna em termos de aprofundamento das políticas e em como estas se envolvem com as cadeias produtivas instaladas em cada país.

#### 2.4.3 OPORTUNIDADES MOTIVADORAS E BARREIRAS PREVENTIVAS À ADOÇÃO DA I4.0.

Outro ponto abordado pela literatura refere-se a um contraste dado às oportunidades que emergem de um novo contexto baseado nas tecnologias que

apoiam a I4.0. Nesse sentido, Frolov et al. (2017a) realizam uma análise SWOT<sup>5</sup> orientada à implementação desse conceito na Rússia. Ainda sobre este país, Frolov et al. (2017b) também reforçam como o conceito permite aumentar a competitividade dos produtos em diferentes segmentos industriais. No caso chinês, Lu et al. (2020) destacam a importância do setor de veículos elétricos e apontam para a necessidade de estabelecer políticas que balanceiam requerimentos tecnológicos avançados com as demandas e práticas de mercado. Ainda no âmbito de transporte e logística, Popkova et al. (2021) defendem a importância da digitalização deste setor, também reconhecendo a importância da participação do governo, de empresários e da sociedade na discussão.

Adicionalmente, Zhou et al. (2020) observam oportunidades de ganhos de eficiência energética com a aplicação de uma economia circular, sustentável e inteligente, tendo a transição facilitada pelo governo e por políticas de inovação. Vassiliadis e Hilpert (2020) discorrem sobre os benefícios atrelados à transformação da manufatura, tendo em vista a insensibilidade maior frente às crises e a manutenção de empregos de qualidade. Bettiol et al. (2023) destacam os benefícios da I4.0 para a produtividade em mais de 7%, alcançado esse resultado diante de uma entrevista com 1.229 firmas na região norte da Itália. No ambiente do mercado de trabalho para mulheres, Von Dietrich e Garcia (2022) destacam a oportunidade dessa transformação tecnológica para aumentar a inserção desse grupo. Por fim, no continente asiático, Chung et al. (2022) destacam como a adoção dessas tecnologias tem melhorado o desempenho da cadeia de oferta de pequenas e médias empresas coreanas. Contudo, nota-se a necessidade do governo em melhorar a percepção das características das tecnologias inteligentes.

A I4.0 também é interpretada como uma grande oportunidade de estabelecer um processo de catching-up dos países menos desenvolvidos em relação aos ricos. Nesse sentido, Barzotto et al. (2020) expõem como regiões atrasadas podem se desenvolver a partir do fortalecimento das capacidades de colaboração dentro da região e com outros autores. Dentro dessa perspectiva de desenvolvimento, Lim et al. (2020) apresentam um caminho alternativo baseado em inovações sobre itens de baixo custo com desempenho aceitável, encontrando um nicho de mercado ainda a

---

<sup>5</sup> A análise SWOT consiste em um mapeamento de forças, fraquezas, oportunidades e ameaças diante do contexto em que a análise está sendo aplicada.

ser explorado. No caso brasileiro, Siltori et al. (2021) apontam para as oportunidades atreladas à redução de trabalhos manuais, emergência de negócios inovativos, redução de acidentes de trabalho, integração das atividades de uma cadeia de valor e melhoria nos aspectos de ergonomia física e cognitiva.

Em contraste às oportunidades, as barreiras à implementação também são expostas a fim de facilitar o processo de planejamento de atuação e intervenção pública. Tomando como base as firmas de manufatura na Malásia, Tay et al. (2021) destacam que a intensidade de conhecimento, tecnologias, capital, educação e força de trabalho tem sido um dos principais desafios no processo de transição. No mesmo contexto, Abdul-Hamid et al. (2021) reforçam a necessidade de políticas que apoiem a implementação de políticas voltadas à adoção da I4.0 dentro de uma economia circular. No caso da Polônia, Jankowska et al. (2023) destacam as barreiras da implementação dessas tecnologias por conta de investimentos insuficientes, de processos administrativos subótimos e da falta de apoio governamental. Para a Colômbia, Rojas-Berrio et al. (2022) apontam para a falta de conectividade, falta de conhecimento tecnológico e resistência à mudança. No caso canadense, Carey e Mordue (2022) discorrem a respeito dos altos custos de implementação, da falta de profissionais qualificados e da falta de financiamento. Cugno et al. (2021) destacam que as firmas italianas possuem diferentes níveis de conhecimento sobre os incentivos governamentais, ressaltando a necessidade de uma atuação contínua do governo para garantir que esses incentivos sejam devidamente comunicados. Ghadimi et al. (2022) destacam os riscos atrelados à implementação da I4.0 na Irlanda a partir da falta de padrões, do risco de capital, da falta de benefícios econômicos claros, da insuficiência de talentos e de atrasos na manufatura durante a implementação. Por fim, barreiras específicas são apresentadas por Nemec et al. (2022), destacando a necessidade de que essas tecnologias garantam transparência na administração pública. Cezarino et al. (2019), avaliam a estrutura brasileira a partir das dimensões econômicas, sociais, tecnológicas e institucionais, enquanto Figueiredo e Graglia (2021) também discutem o panorama nacional e seus principais desafios.

#### 2.4.4 ATUAÇÃO ESTATAL COMO INCENTIVO À ADOÇÃO DA I4.0.

Diante da diversidade de artigos remanescentes relacionados à I4.0, esta subseção organiza e centraliza as principais ideias, destacando a importância de políticas industriais na formulação de uma estratégia nacional de desenvolvimento. Dessa forma, as demais referências abordam questões que podem ser associadas a um grupo específico, embora apresentem sobreposição com as categorias já discutidas. Assim, apenas as questões centrais serão apresentadas a seguir.

Dean et al. (2021) retomam a discussão atrelada à Austrália e destacam o potencial do conceito de I4.0 no que tange ao aumento de competitividade da indústria nacional (não limitada pela manufatura). Baker et al. (2021) contrastam as políticas aplicadas nos EUA e Canadá e identificam papéis distintos assumidos pelo governo em cada país, embora se assemelhem em pontos atrelados à importância de clusters industriais em uma perspectiva regional, contexto produtivo, sinergias colaborativas e papel de redes intermediárias. Na linha da regionalização, Hervás-Oliver (2021) estuda o papel da I4.0 a partir de Distritos Industriais Mashalianos na região de Valência e indústria de brinquedos, identificando o papel das políticas de inovação em incentivar a adoção e desenvolvimento das tecnologias relacionadas e na organização de ações colaborativas. Hervas-Oliver et al. (2019) observam o papel das políticas de inovação e aplicações práticas em regiões e clusters industriais em Castellón, ressaltando a importância de atores coletivos e cooperações bottom-up. O processo de *catching-up* da região norte da Irlanda é avaliado por Brownlow e Budd (2023). Adicionalmente, Labory e Bianchi (2021) destacam que capacidades dinâmicas devem ser desenvolvidas pelas regiões a fim de se adaptarem às mudanças impostas pela I4.0, tomando a região de Emília-Romanha como exemplo, que também é objeto de estudo por Mosconi e D'Ingiullo (2023). Por fim, o tema regional também embasa a pesquisa de Hervas-Oliver et al. (2021), onde os autores avaliam a atuação de hubs de inovação na região de Valência.

A dimensão setorial também recebe trabalhos acerca da aplicação e funcionalidade da I4.0. A indústria de eletrônicos do Vietnã é observada por Ngoc e Binh (2019), que reforçam a participação do Estado no setor, o desenvolvimento de políticas voltadas à dependência de capital estrangeiro, a criação de clusters industriais e as políticas educacionais. As questões educacionais do país também são exploradas por Van Song et al. (2020), ressaltando a importância do Estado e as políticas locais no desenvolvimento de recursos humanos em PMEs. Em paralelo,

Durazzi (2021) destaca a importância de profissionais formados em disciplinas de ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM).

Aspectos de suporte relacionados à implementação das políticas também são avaliados. Pini (2019) estuda a probabilidade de negócios gerenciados por famílias em investir em I4.0, reforçando o papel de políticas para esse processo. Mohiuddin et al. (2023) apontam para o papel exercido pelos governos em países emergentes. Bonvillian (2014) destaca a evolução de agências relacionadas à inovação, chegando até os institutos que colaboram com o desenvolvimento da manufatura avançada. Prodi et al. (2022) focalizam no papel desempenhado pela política *Mittelstand 4.0: digital production and work processes* implementada na Alemanha, destacando o papel de centros de competência em conseguir agregar e expressar as necessidades latentes das PMEs por meio de iniciativas tecnológicas e projetos. Wang et al. (2021) também analisam a importância de instituições neste contexto, falando sobre como as tecnologias financeiras e a qualidade institucional se tornaram fundamentais para o desenvolvimento inovativo dos BRICS. O suporte por meio da capacidade de compra governamental se soma às questões auxiliares, tendo em vista o papel instrumental da ação pública, que é abordada por Day e Merkert (2021). O Brasil também é objeto de pesquisa de Cunha et al. (2023), onde os autores analisam a interação e autonomia dos aparatos administrativos do governo federal no desenvolvimento de uma política de inovação. Na mesma linha, Cunha e Mendes (2022) analisaram as capacidades estatais associadas ao desenvolvimento de política de inovação tecnológica no contexto da Câmara Brasileira da Indústria 4.0.

Por fim, questões teóricas são aprofundadas em termos de uma revisão do conceito de I4.0 e de exposições adicionais da literatura acerca do tema de I4.0. Reischauer (2018) destaca como o discurso de I4.0 serve para a institucionalização de sistemas de inovação na manufatura. Na mesma linha, Lund e Vildåsen (2022) enfatizam como a narrativa incentivou que as firmas não ficassem de fora em termos de implementar as novas tecnologias. Diegues et al. (2023) propõem uma tipologia de política industrial perante o diálogo entre abordagens neoschumpeterianas e desenvolvimentistas, trazendo elementos que tornam possível a reflexão sobre as políticas mais efetivas nesse contexto de grande transformação da produção global. Além disso, o conceito é abordado na Coreia do Sul com o objetivo de chamar a atenção da população, frequentemente sendo referida como a quarta revolução industrial (Sung, 2018).

Em síntese, a revisão sistemática da literatura expõe a existência de inúmeros direcionamentos relacionados aos temas de política industrial com I4.0. Identificam-se três polos centrais voltados às análises comparativas das estratégias adotadas: uma revisão das políticas e dos instrumentos utilizados, além da introdução de oportunidades e barreiras associadas ao desenvolvimento proposto. Entretanto, justificando a construção desta tese, observa-se uma lacuna no aproveitamento de setores com vantagens comparativas e inserção internacional para estimular a produção de tecnologias de I4.0. Ou seja, a motivação vinculada à hipótese de pesquisa desta tese torna-se inovadora, na medida em que busca defender a ideia de que o protagonismo e a sofisticação tecnológica da Petrobras podem liderar um processo de oferta de inovações e geração de transbordamentos para o sistema nacional de inovação.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.

Os objetivos deste capítulo estão divididos em quatro questionamentos centrais. Em primeiro lugar, procura-se expor os elementos que legitimam a atuação do Estado por meio de uma política industrial. Nesta linha, os aspectos de relacionamento da figura pública com a dimensão social estabelecem instituições que configuram todo o ambiente sobre a qual o mercado e as relações comerciais são operacionalizadas. A partir desses elementos legitimadores da atuação pública, compete ao Estado atuar com a intenção de incentivar a transformação econômica e o desenvolvimento socioeconômico.

Dessa forma, as políticas industriais são apresentadas como o principal instrumento elaborado e implementado pelo Estado a fim de influenciar as organizações e atividades produtivas. Longe de serem caracterizadas por uma morfologia estática, estas políticas são apresentadas diante de um extenso arcabouço de conceitos e tipificações que endereçam o segundo questionamento proposto. Este questionamento relaciona-se à ideia de que os casos de sucesso ocorrem na medida em que os instrumentos utilizados se compatibilizam com os recursos disponíveis ou com as metas e objetivos definidos. Assim como os atores envolvidos, estas políticas são passíveis de um processo evolutivo e adaptativo aos paradigmas técnicos e

científicos de cada período, o que justifica o aprofundamento de conceitos atrelados às redes colaborativas.

Em seguida, as discussões se direcionam ao questionamento de operacionalização das políticas em um mercado intensivo em inovação, caracterizado por colaborações estabelecidas pelas firmas diante das motivações para complementar competências específicas e fomentar a troca de informações. Tendo em vista a complexidade do processo inovativo, além dos riscos intrínsecos à atividade, as firmas, o governo e os institutos de pesquisa estabelecem um ambiente colaborativo onde todos se voltam ao processo de inovação. Dentro dessa abordagem, o conceito de SI se sobressai por conta da amplitude do tema, reforçando a participação ativa de agentes mercantis e não mercantis na abordagem, sendo idealizada por inúmeras políticas voltadas à I4.0.

Por fim, uma revisão da literatura é realizada para verificar a evolução teórica que envolve o tema de política industrial com a emergência do conceito de I4.0, identificando uma lacuna teórica que possa ser preenchida por essa tese. Nesta linha, são identificados trabalhos comparativos e analíticos sobre as políticas implementadas, explorando oportunidades e barreiras, entre outros aspectos. Contudo, nota-se a ausência de estudos que mapeiem a cadeia produtiva, visando avaliar a compatibilidade de toda essa estrutura com os conceitos de I4.0. Dessa maneira, argumenta-se que o mapeamento desta estrutura para o setor de petróleo e gás no Brasil, liderado pela Petrobras, se torna inédito na medida em que se sustenta na vantagem comparativa alcançada por essa indústria a fim de fomentar a oferta tecnológica e geração de transbordamentos para a economia.

### 3 NOVAS OPORTUNIDADES DE APLICAÇÃO DE TICS CONDICIONANDO A EMERGÊNCIA DO CONCEITO DE I4.0

O conceito de política industrial abordado no capítulo anterior demonstra como o Estado é capaz de fomentar a transformação econômica, seja por meio da introdução de inovações tecnológicas ou pelo incentivo à oferta delas. Deste modo, as atuações públicas se inserem em setores estratégicos que vão ao encontro do planejamento governamental e dos recursos disponíveis em cada país, respeitando as vantagens comparativas alcançadas e incentivando a formação de redes colaborativas que contribuem com a CT&I. No que diz respeito à seleção dos setores e tecnologias estratégicas, as TICS habilitam um ambiente inteligente de produção mediante a adoção e utilização destas tecnologias, sendo esta ideia aprofundada diante do termo de I4.0.

Considerando esse cenário proposto pelas evoluções indissociáveis do setor de TICS, que viabilizam as ideias de I4.0, faz-se necessário o entendimento dos elementos que caracterizam e sustentam esses conceitos. É por meio do mapeamento dessas questões que políticas industriais podem ser implementadas, pois as chances de sucesso de uma atuação pública aumentam com a compatibilização dos instrumentos e as características do objeto de atuação. Por isso, este capítulo pretende responder as seguintes questões: Quais as características das TICS e como elas permitem a emergência da I4.0? Quais os elementos motivadores e habilitantes da I4.0? Quais as principais características das tecnologias pertencentes a esse conceito? As respostas desses questionamentos contribuem com a construção de um quadro que possibilita questionamentos futuros acerca do envolvimento dessas tecnologias com o setor de petróleo e gás no Brasil.

Assim, a primeira seção realiza a apresentação das características centrais do setor de TICS, que emerge a partir das tecnologias de computação e evolui com a difusão do processo de digitalização dentro da sociedade e nas cadeias de produção. Levando em consideração a natureza dinâmica e pervasiva dessas tecnologias, busca-se aprofundar os elementos relacionados a esse setor, o que se torna fundamental para o entendimento das estruturas inteligentes de produção promovidas pela introdução dos conceitos de I4.0.

A segunda seção aborda a emergência deste conceito, que surge a partir de uma política estratégica da Alemanha, onde se busca a manutenção do protagonismo

manufatureiro, estabelecendo um objetivo central de transformação das firmas nacionais em organizações inteligentes. A constituição de ambientes compatíveis com esses ideais demanda que sejam introduzidas tecnologias intensivas em adquirir, processar e transmitir informações, exaltando a importância do setor de TICS. A partir deste conceito, discussões da literatura atrelada às motivações e implicações da I4.0 são introduzidas, reforçando a relevância do tema dentro de políticas industriais. Por último, é apresentado um modelo referencial de arquitetura que busca facilitar o processo de transformação das firmas em entidades inteligentes.

Finalmente, a partir do reconhecimento de que o ambiente de I4.0 é constituído por inúmeras soluções tecnológicas emergentes, a terceira seção apresenta algumas tecnologias, como sistemas ciberfísicos, internet das coisas, inteligência artificial, big data, blockchain, computação em nuvem e cibersegurança. Assume-se que o reconhecimento destas tecnologias viabiliza o entendimento da complexidade do tema e, além disso, fundamenta construções teóricas que se inclinam aos potenciais benefícios ofertados dentro desse ambiente.

### 3.1 A HABILITAÇÃO DE UM NOVO AMBIENTE PRODUTIVO MEDIANTE EVOLUÇÃO DAS TICS.

Conforme o discutido na introdução, as TICS estabelecem a base de uma nova evolução pertencente à terceira revolução industrial, sustentada pelas tecnologias de computação, que viabilizam as atividades de processamento e comunicação de dados. Essas tecnologias têm impactado profundamente a sociedade, tendo em vista a natureza pervasiva que estabelece uma tendência de digitalização e a necessidade de desenvolver uma infraestrutura capaz de atender a demanda crescente por essas tecnologias, seja pelas firmas ou pela sociedade em geral.

Contudo, tendo em vista a grande variabilidade de tecnologias e processos vinculados ao termo de TICS, que está em constante expansão, a delimitação deste setor acaba sendo uma tarefa complexa, mas necessária, na medida em que se busca identificar oportunidades inerentes aos avanços tecnológicos que vêm ocorrendo. Por isso, recorrendo à literatura especializada nessas tecnologias, há o reconhecimento de um ambiente formado por quatro camadas distintas e inter-relacionadas

representadas pela FIGURA 1: o fabricante de equipamentos, os operadores de rede, os desenvolvedores de aplicativos e conteúdo e, por fim, os consumidores (Fransman, 2010).

FIGURA 1 - QUATRO CAMADAS QUE CONFIGURAM O SETOR DE TICS



FONTE: Fransman (2010)

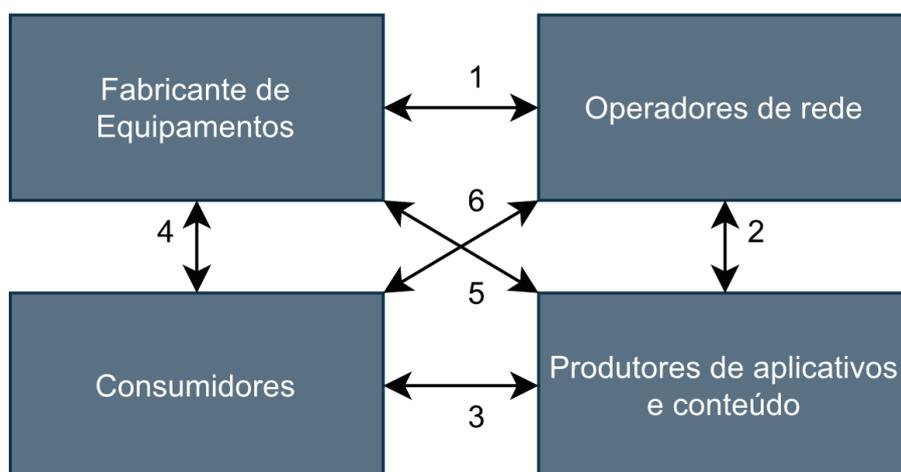
Dentro dessa dinâmica, cada camada possui um papel indispensável para o processo de evolução da estrutura. Em primeiro lugar, os fabricantes de equipamentos ofertam produtos que definem os limites de processamento e estabelecem padrões dentro do mercado. Os operadores de rede, por sua vez, utilizam os equipamentos produzidos para disponibilizar uma infraestrutura comunicativa que integra os objetos e usuários à internet, estabelecendo a comunicação por meio das redes de telefonia fixa e móvel. Em seguida, a camada dos desenvolvedores de aplicativos e conteúdo estabelecem plataformas digitais que orientam o mercado, além das soluções digitais para atendimento de serviços públicos, entretenimento, operações bancárias, comércio e etc. Por fim, essa estrutura é destinada aos consumidores, mas utiliza os comentários recebidos para estabelecer um processo de desenvolvimento interno e orientar as estratégias produtivas.

Além dos papéis assumidos, Fransman (2010) destaca as relações colaborativas estabelecidas dentro do ambiente de TICS, que são reconhecidas por meio de seis relacionamentos simbióticos.<sup>6</sup> O primeiro ocorre entre os fabricantes de

<sup>6</sup> Além das relações estabelecidas, Fransman (2010) destaca a existência de quatro dimensões dos relacionamentos simbióticos: fluxo financeiro (compra e venda); fluxo material (provisão e produção); fluxo informacional e fluxo de *inputs* para o processo de inovação.

equipamentos e os provedores de rede, mediante a aquisição dos materiais necessários para o estabelecimento de uma infraestrutura que permite a disponibilização das redes. O segundo denota as relações indissociáveis de alguns aplicativos com a infraestrutura de rede. No terceiro, os consumidores acessam os aplicativos e conteúdos por meio de fluxos financeiros (assinaturas e compra de licenças), ou de forma gratuita, quando os próprios aplicativos se beneficiam com a aquisição de dados atrelados aos clientes.

FIGURA 2 - SEIS FORMAS DE RELACIONAMENTOS SIMBIÓTICOS DO SETOR DE TICS



FONTE: Fransman (2010)

Elaborado pelo autor.

O quarto tipo, mais distante das espécies tradicionais de relacionamento, é estabelecido entre os consumidores e os fabricantes de equipamento, como na compra de celulares, modems, antenas e etc. Na quinta forma, estabelecida entre desenvolvedores de aplicativos e fabricantes de equipamento, é configurado um fluxo informacional que permite expandir os horizontes de inovação sobre os quais os aplicativos se apoiam diante de plataformas.<sup>7</sup> Por fim, os consumidores também estabelecem uma relação com os operadores de rede a fim de obter serviços de internet, telefonia e etc.

<sup>7</sup> Neste caso, os relacionamentos de tipo 2, entre provedores de rede e desenvolvedores, também é estabelecido com similar relevância, tendo em vista a necessidade de compatibilizar toda a estrutura com os aplicativos e conteúdos disponibilizados.

Assim, a magnitude e variabilidade de tecnologias e processos que compõem as camadas das TICS reforçam a existência de oportunidades que emergem neste contexto. Nessa linha, Steinmueller (2001) destaca que, por meio do aproveitamento das oportunidades que surgem, alguns países podem pular etapas no processo de desenvolvimento econômico. Ressalta-se, contudo, a importância atrelada à existência de alguns pré-requisitos apoiadores do argumento: a capacidade de absorção, acesso e *know how*; a capacidade em tecnologias complementares, e a integração do mercado à jusante. Experiências como a de Taiwan, abordadas por Wang (1999), destacam o papel do Estado em dar início ao processo de absorção destas competências.

Na linha das propostas de Steinmueller (2001), Niebel (2018) realiza uma tentativa de validação empírica das situações de *leapfrogging* motivada pela adoção dessas tecnologias, tomando como base a experiência em países desenvolvidos, emergentes e no processo de desenvolvimento. Em primeiro lugar, destaca-se uma correlação positiva e estatisticamente significativa entre a adoção das TICS e o crescimento econômico. Entretanto, esse foi um resultado identificado para todos os grupos de países, o que não sustenta a afirmação de que estas tecnologias podem alavancar o desenvolvimento com intensidade diferente para cada grupo.

Além das propostas de Steinmueller (2001), outros autores desenvolveram pesquisas correlacionando as TICS com diferentes dimensões do desenvolvimento. Narayana (2011) destaca a importância de uma infraestrutura de telecomunicação para o setor das TICS, o que enfatiza os processos de digitalização que se intensificam com o passar dos anos. Na mesma direção, Roller e Waverman (2001) destacam que *spillovers* tecnológicos e externalidades de rede têm contribuído com os benefícios das TICS para o desenvolvimento econômico, o que destaca novamente a importância destas tecnologias para as estratégias nacionais de desenvolvimento.

Tendo em vista essas contribuições teóricas, é possível reforçar que as TICS têm impactado as trajetórias de desenvolvimento econômico de forma agressiva e, além disso, na medida em que a infraestrutura digital se torna indispensável, ela expande os horizontes de oportunidades nesse setor. Diante dessa perspectiva de evoluções tecnológicas, sobre as quais se admite que tecnologias revolucionárias sejam caracterizadas com potencial de desenvolvimentos incrementais, o conceito de I4.0 emerge diante de um cenário onde essas soluções inovadoras, pertencentes ao

setor de TICS, se voltam para a respectiva aplicação desses produtos e serviços para o ambiente industrial.

Em síntese, nota-se que a complexidade do setor de TICS pode ser avaliada a partir de uma estrutura em quatro camadas centrais inter-relacionadas: fabricantes de equipamentos, operadores de rede, fabricantes de aplicativos e conteúdo e consumidores. Diante da amplitude de atividades que configuram o setor, um número compatível de oportunidades de desenvolvimento são apresentadas para países que independem do estágio de desenvolvimento atual, mas também reforça a importância de elementos básicos que viabilizam a implementação e utilização destas tecnologias, como a infraestrutura digital. Diante das soluções tecnológicas que emergem de modo incessante, um conceito atual é estruturado para as ideias que envolvem a aplicação dessas inovações ao ambiente industrial, sustentado pelo tema de I4.0.

### 3.2 I4.0: AVANÇOS TECNOLÓGICOS EM DIREÇÃO À PRODUÇÃO INTELIGENTE.

Dois elementos centrais atrelados às TICS sustentam as discussões propostas nesta seção: oportunidades inexploradas e característica pervasiva. Em primeiro lugar, as camadas das TICS retratam como o setor possui trajetórias de desenvolvimento que sustentam a existência de oportunidades inexploradas, o que motiva a atuação pública de tal modo que esse ambiente seja explorado por uma política industrial. Em paralelo, a característica pervasiva permite que essas estratégias de desenvolvimento sejam orientadas aos mais diversos setores e esferas da sociedade. Sendo assim, emerge-se uma ramificação da literatura de TICS concentrada na respectiva aplicação destas soluções tecnológicas em um ambiente de produção, viabilizando a construção de fábricas e cadeias de produção inteligentes.

#### 3.2.1 I4.0 COMO CONTINUIDADE À TERCEIRA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL.

Uma das principais questões discutidas sobre o conceito de I4.0 foi a partir de uma visão tecnocrática em que se estabeleceu esse conceito como sendo uma quarta revolução industrial. Mas apesar das fragilidades teóricas, nota-se que essa narrativa

teve uma importância fundamental em motivar países a adotar políticas industriais voltadas à implementação e desenvolvimento destas tecnologias, que serão tratadas no capítulo 5, p. 76. Entretanto, à luz da literatura que tem evoluído desde a introdução do tema, defende-se que o conceito ainda está inserido em um contexto de terceira revolução, sustentada pelas TICS.

Dentro dessa perspectiva de narrativas atreladas à visualização da I4.0 como a promotora de uma quarta revolução, Brynjolfsson e McAfee (2016) tiveram uma participação crítica. Os autores introduziram o tema com o desenvolvimento de uma concepção baseada na emergência de uma segunda “era das máquinas”. Segundo os autores, a primeira “era” marcou o período das três primeiras revoluções industriais,<sup>8</sup> que permitiram a superação dos limites físicos idiossincráticos à natureza humana. Nesta linha, as máquinas e equipamentos empregados auxiliavam na produtividade na medida em que os trabalhadores eram fisiologicamente incapazes de expandir a produção sem a introdução de novas tecnologias. Logo, os autores visualizam a I4.0 como a promotora de uma segunda era, onde as limitações cognitivas são superadas com a introdução de equipamentos que absorvem e processam informações instantaneamente (BRYNJOLFSSON e MCAFEE, 2016).

São três os elementos centrais que Brynjolfsson e McAfee (2016) abordam de modo a sustentar as ideias propostas: o crescimento exponencial na capacidade de processamento, o movimento pervasivo de digitalização e os esforços recorrentes de caráter inovativo. O primeiro se baseia na Lei de Moore, que destaca que a capacidade de processamento dos microchips e semicondutores evolui de forma exponencial, enquanto os custos de produção permanecem relativamente estáveis. O principal benefício que pode ser extraído deste contexto é que as firmas se tornam cada vez mais eficientes em lidar com a transformação de dados em informações com valor comercial, permitindo uma maior adaptação aos cenários dinâmicos de competição e demanda.

No caso dos elementos de digitalização, este acaba sendo um dos principais contribuintes às atividades de processamento, tendo em vista que a transformação de informações analógicas em digitais expande as capacidades das firmas para adquirir informações valiosas, permitindo uma tomada de decisão baseada em um conhecimento mais consolidado sobre o contexto inserido. Além disso, a digitalização

---

<sup>8</sup> Revoluções motivadas sustentadas pela introdução da máquina à vapor, eletricidade e computação.

está embasada em um processo no qual a conexão dos produtos à rede permite que o tráfego de dados se intensifique, habilitando os produtores a exercer uma antecipação às mudanças de demanda, mediante um processo de retroalimentação de informações em uma cadeia de produção. Por fim, o elemento relacionado aos esforços inovativos se beneficia da junção do processamento com a digitalização, permitindo que novas oportunidades sejam visualizadas, fomentando atividades de P&D nas firmas.

Apesar dos importantes elementos enfatizados por Brynjolfsson e McAfee (2016), o entendimento é de que todos esses avanços pertencem a um processo de aprofundamento das tecnologias que viabilizaram a terceira revolução industrial. Ou seja, retratam um processo de evolução tecnológica baseado em potenciais inexplorados. Em vista disso, destaca-se a contribuição de Hirsch-Kreinsen (2016, p. 19, tradução própria) ao defender que “apenas com alguma dificuldade se distingue (a I4.0) em relação aos conceitos de seu antecessor – tecnologias de produção baseadas em TI – e, portanto, falar em um salto em direção a uma quarta revolução”. Sendo essa argumentação compatível com Diegues e Roselino (2019), Xu et al. (2018) e Brixner et al. (2020), com estes identificando que a continuidade dos *bits*, considerados como fator chave, e o microprocessador, tido como tecnologia central do processo, acabam embasando a sobreposição entre ambos os conceitos de TIC e I4.0.

### 3.2.2 ORIGEM E MOTIVAÇÃO DO CONCEITO DE I4.0.

Apesar do reconhecimento de que a I4.0 configura um processo de continuidade das evoluções tecnológicas inerentes ao setor das TICS, a origem e difusão do tema se estendem em um ambiente político onde existe a necessidade de atrair os agentes envolvidos e estabelecer um processo de aceitação política. Por isso, as narrativas de emergência de uma quarta revolução industrial foram importantes na difusão do tema. A própria origem do conceito está relacionada a uma proposta política de retomada do crescimento e fortalecimento da manufatura alemã, sendo apresentada na Hannover Messe em 2011, na Alemanha. Em paralelo, as discussões foram direcionadas a um plano estratégico que pretende fortalecer a implementação

de fábricas inteligentes diante de um ato conjunto estabelecido entre o poder público, empresas privadas e universidades (Kang et al., 2016; Rojko, 2017).

Remetendo ao capítulo anterior, onde se ressalta a ideia de que o Estado atua como agente transformador da economia, a origem do conceito de I4.0 reforça essa linha argumentativa, tendo em vista que a emergência do tema ocorre de forma indissociável do desejo do governo alemão de estabelecer uma política industrial para o país. Desse modo, se enaltece que um país desenvolvido foi capaz de identificar possíveis ameaças frente à crescente demanda por flexibilidade produtiva e competição internacional, e capaz também de estabelecer um plano estratégico voltado à aplicação e desenvolvimento de tecnologias emergentes para inovar nos modos de produção e fortalecer a posição de liderança. Contudo, apesar da disponibilidade dos recursos na Alemanha, essa estratégia pode servir de exemplo para a aplicação nos mais diversos países, diante da característica pervasiva que viabiliza a construção de um ambiente de produção inteligente. Além disso, pode-se apoiar em setores com vantagens comparativas nos quais as políticas industriais podem fortalecer a competitividade internacional e gerar efeitos de transbordamentos para o sistema produtivo e científico.

Além dos aspectos relacionados às motivações políticas, que concretizaram a emergência do tema, alguns autores destacam elementos habilitadores distintos. Em primeiro lugar, Lasi et al. (2014) apontam para a existência de duas óticas distintas que estabelecem o terreno para essas discussões: a ótica de oferta (*technology-push*) e a ótica de demanda (*application-pull*). Para a primeira, a tendência de mecanização, automação, digitalização, conectividade e miniaturização estabeleceu um terreno para a adoção de novos instrumentos de produção inteligente, configurando a base da ideia de I4.0. Em paralelo, o mercado competitivo e intensivo em inovações, a importância da flexibilidade produtiva, a tendência de descentralização, a busca por eficiência na produção e a pressão dos consumidores influencia as firmas a adotarem novos métodos de produção que se compatibilizem com uma estrutura de mercado fluída, indo na linha das mudanças tratadas por Roselino e Diegues (2020), onde se destaca a emergência de estruturas fluidas de organização produtiva, evidenciando um caráter distintivo de menor enraizamento destas estruturas.

Outra linha da literatura está centrada nos aspectos relacionados à importância da demanda no mercado. Para essa corrente, o consumidor acaba assumindo um papel central, tendo em vista a orientação e o processo de

retroalimentar informações à cadeia de produção. Reafirmando essas questões, Neugebauer et al. (2016) destacam um suposto papel primordial de atender ao consumidor, enfatizando a importância dos dados e a construção de um relacionamento com esta base de usuários para que seja estabelecido um fluxo de informações que possa contribuir com a posição competitiva da firma. Sendo assim, Rojko (2017) afirma que se estabelece um movimento de competição orientado à demanda do mercado. Mas apesar da indiscutível importância desta demanda nas estratégias das firmas, destaca-se que, por vezes, essa linha pode subestimar as demais questões supramencionadas, como a evolução natural das tecnologias e a própria consolidação de parcerias estratégicas entre as firmas para avançar os paradigmas produtivos do período.

Por fim, uma terceira corrente busca identificar as motivações para a consolidação da importância da I4.0, sustentando-se em uma suposta escassez de mão de obra barata e estabelecimento de uma crise energética (Wan et al., 2015). Desse modo, os países poderiam estar atraídos aos novos conceitos diante do esgotamento de mão de obra disponível e da procura por mecanismos de produção mais baratos no longo prazo. Entretanto, as argumentações acabam sendo rasas no sentido de que, diante de estruturas fluidas de produção, a modularização permite que estágios da cadeia continuem sendo estabelecidos em países com custos mais atrativos. Adicionalmente, as visões otimistas de que os novos processos de produção automatizados viabilizariam a retomada da produção nos países desenvolvidos, particularmente nas regiões com nível de renda mais alto, também não se sustentam, na medida em que os ganhos de produtividade precisam se situar em patamares de 70% para viabilizar a retomada da produção que vem da China para os Estados Unidos (Andersson et al. 2018; Butollo, 2021).

### 3.2.3 AMEAÇAS RELACIONADAS À IMPLEMENTAÇÃO DA I4.0.

Os elementos relativos à I4.0 que foram trazidos até o momento compartilham uma visão romantizada a respeito dos benefícios que podem ser extraídos. No entanto, não foram explicitadas as principais dificuldades inerentes a essa transição. Em primeiro lugar, o movimento de substituição entre um método de produção tradicional para um promovido pelo novo conceito demanda a existência de elementos

que podem ser escassos para um grupo relevante de empresas. Além disso, o aumento nos níveis de conectividade podem aumentar a vulnerabilidade das estruturas produtivas e sociais frente às ameaças cibernéticas. Por fim, a transição de elementos físicos para digitais acaba gerando questões sociais relativas a profissionais que precisam se qualificar frente às demandas do mercado de trabalho, com o risco de perder o emprego para profissionais mais capacitados.

Zhou et al. (2016) destacam que a transição<sup>9</sup> da Indústria 3.0 para a 4.0 deve respeitar alguns critérios reforçados pelo plano estratégico alemão: construção de uma rede fundamentada por sistemas ciberfísicos; pesquisas de temas de fábrica e produção inteligente; realização de integrações verticais, horizontais e *end-to-end*; padronização dos sistemas; gerenciamento eficiente; infraestrutura de banda larga; segurança; configuração do trabalho; treinamentos; estabelecimento de um arcabouço institucional e melhoria da eficiência no uso de recursos. Adicionalmente, Rojko (2017) reforça que o estágio atual de desenvolvimento e implementação demanda uma garantia de estabilidade na produção durante a transição, além de investimentos em níveis graduais para a adoção dos novos recursos e entendimento prévio sobre o conceito. Por fim, Kagermann (2015) destaca os desafios associados às políticas industriais no sentido de adotar uma abordagem sistêmica de inovação, de promover padronização e de encarar o novo cenário juntamente com os trabalhadores.

Özdemir e Hekim (2018) avaliam quatro assimetrias relacionadas à ideia de I4.0, sobre as quais se entende que alguns pressupostos acabam supervalorizando os benefícios, enquanto ignoram alguns elementos que podem incorrer em problemas futuros. Em primeiro lugar, uma conectividade excessiva se torna vulnerável a colapsos de rede, afetando toda a estrutura de uma só vez. Por isso, torna-se necessária uma rota de fuga para que um ambiente com menores níveis de conexão seja mantido, permitindo a sustentabilidade do negócio nesses momentos de crise. No segundo ponto, há uma preocupação relacionada às bolhas de opiniões, onde a interação entre todos acaba se inclinando para a formação de uma única ideia, afetando a pluralidade de pensamento. Em terceiro lugar, a avaliação de descobertas científicas e tecnológicas como revolucionárias frequentemente ignora seus impactos

---

<sup>9</sup> Destaca-se que uma transição da Indústria 3.0 para 4.0 não estabelece uma revolução nos métodos de produção, mas uma evolução com a introdução de instrumentos inteligentes ao ambiente interno e externo das firmas.

em dimensões políticas, como a acumulação de investimentos e a organização. Por fim, o determinismo tecnológico deixa de lado a ótica social, sobre a qual é estabelecido um ambiente onde há ganhos para um grupo limitado de empresas e malefícios para um número relevante de pessoas, que podem, por exemplo, perder seus empregos, conforme apresentaremos a seguir.

No último dos elementos introduzidos há um destaque para o papel dos trabalhadores diante desse novo contexto da I4.0. Tendo em vista uma tendência de substituição de tarefas triviais por robôs e máquinas, muitos funcionários podem perder o emprego, embora exista uma visão em que os impactos são encarados de forma positiva. Gorecky et al. (2014) destacam que o real efeito das novas máquinas é de potencializar a qualificação dos trabalhadores, sendo a flexibilidade humana encarada como chave frente a esse cenário. Diante dessa ideia, as funções dos trabalhadores seriam as de ditar a estratégia produtiva e supervisionar a implementação, ou seja, com uma atuação diante de um planejamento construtivo. Entretanto, embora seja possível visualizar para eles uma nova posição, fica claro que os mais qualificados seriam favorecidos pela substituição dos menos qualificados. Roblek et al. (2016) reforçam que um dos principais desafios da I4.0 é o da manutenção do emprego.

### 3.2.4 ELEMENTOS HABILITANTES E OPERACIONALIZAÇÃO DA I4.0.

Quando abordamos o tema de I4.0, tendo em vista as evoluções tecnológicas e aplicações inovadoras promovidas pelo paradigma das TICS, se estabelece um ambiente onde tecnologias emergentes e intensivas em comunicação e processamento se inserem em etapas distintas dentro de uma cadeia de produção, configurando um ambiente inteligente e comunicativo, indo ao encontro das motivações alemãs de promover a transformação das fábricas. Dentro deste cenário, três elementos acabam promovendo a base que habilita a emergência e aplicação destas ideias de produção inteligente: recurso, processo e infraestrutura.

No que diz respeito à dimensão de recurso, os dados gerados durante o ciclo de vida do produto se estabelecem como fatores chave. Toda intervenção física e digital gera dados de forma orgânica, sendo possível estabelecer um processo de reintrodução ao ambiente de produção, seguindo do processamento e finalizando com

a transformação em uma informação relevante para substanciar a tomada de decisão dos atores executivos, sendo eles os funcionários do chão de fábrica ou alta gerência. Com isso, os consumidores também assumem um papel mais participativo nesta cadeia, tendo em vista que a utilização do produto gera dados que permitem o mapeamento das tendências observadas sobre a demanda, servindo de insumo aos processos de definição estratégica das firmas. A tecnologia de RFID (identificação por radiofrequência) é um exemplo de recurso que pode ser utilizado durante o ciclo de vida de um produto, tendo em vista a atribuição de um número de identificação para cada produto que viabiliza um acompanhamento em tempo real dos estágios produtivos e logísticos sobre os quais ele se encontra.

Com relação à dimensão de processo, Kagermann (2015) destaca a digitalização como elemento central de uma nova onda de inovações. Queiroz et al. (2019) reforçam a necessidade deste processo diante da adoção de novas práticas configuradas sobre a I4.0 e cadeias digitais de valor. É diante do processo de digitalização que ações tomadas no mundo físico podem ser integradas ao virtual. Ou seja, se os dados são os recursos centrais dessa estrutura, a digitalização permite que exista uma maior disponibilização, sejam eles gerados por entradas automáticas nos computadores das firmas ou por falhas não identificadas pelos operadores de produção sobre as linhas de montagem. É por meio da introdução ao mundo digital de todos os recursos disponíveis pelas firmas que a comunicação entre máquinas (M2M) e humanos com máquinas (H2M) se torna realidade. Nesta linha, reforça-se a questão de pertencimento da I4.0 ao paradigma das TICS, que promove a evolução deste processo de digitalização.

A última dimensão habilitadora desse processo está relacionada à infraestrutura de rede, que passou por um processo crucial de desenvolvimento que aumentou o número de dispositivos conectados à internet e permitiu que estes fossem inseridos ao ambiente das firmas. A rede permite a existência de uma infraestrutura comunicativa, sobre a qual as questões espaciais se tornam irrelevantes aos processos de produção. Diante da transição do padrão IPv4 para o IPv6, aumentando o número de endereços de IP disponíveis, novos dispositivos acabaram sendo remodelados a fim de habilitar as funcionalidades de rede, permitindo a comunicação entre eles. É diante desta novidade tecnológica que se enxerga a oportunidade de trazer essa infraestrutura para os processos internos e externos das firmas, tornando

os mecanismos de produção inteligentes para que consigam dialogar entre si e com seus respectivos operadores de forma independente aos fatores de proximidade.

É por meio da convergência dessas três dimensões que a ideia de I4.0 se torna operacional, fundamentada na conversão de métodos físicos para digitais, e também no estabelecimento de cadeias digitais de oferta (Queiroz et al., 2019; Rojko, 2017). A conversão permite que exista maior flexibilidade e margem para reconfigurações sobre o processo de produção, permitindo que as firmas se mantenham alinhadas com as transformações que são dinamicamente incorridas sobre o mercado. Adicionalmente, existe um ambiente de interoperabilidade e conectividade, permitindo fluxos de informações que transitam sobre relacionamentos H2M, M2M e H2H (Queiroz et al., 2019).

Em relação às cadeias digitais de oferta, os mesmos elementos relacionados à flexibilidade, interoperabilidade e conectividade são aplicados, embora devam ser interpretados sobre relacionamentos inter-firmas. A sintonia entre o ambiente interno e externo das firmas permite uma adequação mais acelerada dos mecanismos de oferta sobre as forças de demanda. O relacionamento da firma produtora se torna menos sensível às interferências com os respectivos fornecedores, permitindo que níveis de eficiência sejam atingidos em termos dos recursos utilizados e da logística envolvida. Assim, o produto ou serviço pode começar a ser interpretado como um produto de uma rede colaborativa ao invés de uma única estrutura, o que converge com os pressupostos de estruturas fluídas e tendência de modularização destas cadeias (Roselino e Diegues, 2020; Kagermann, 2015; Rojko, 2017).

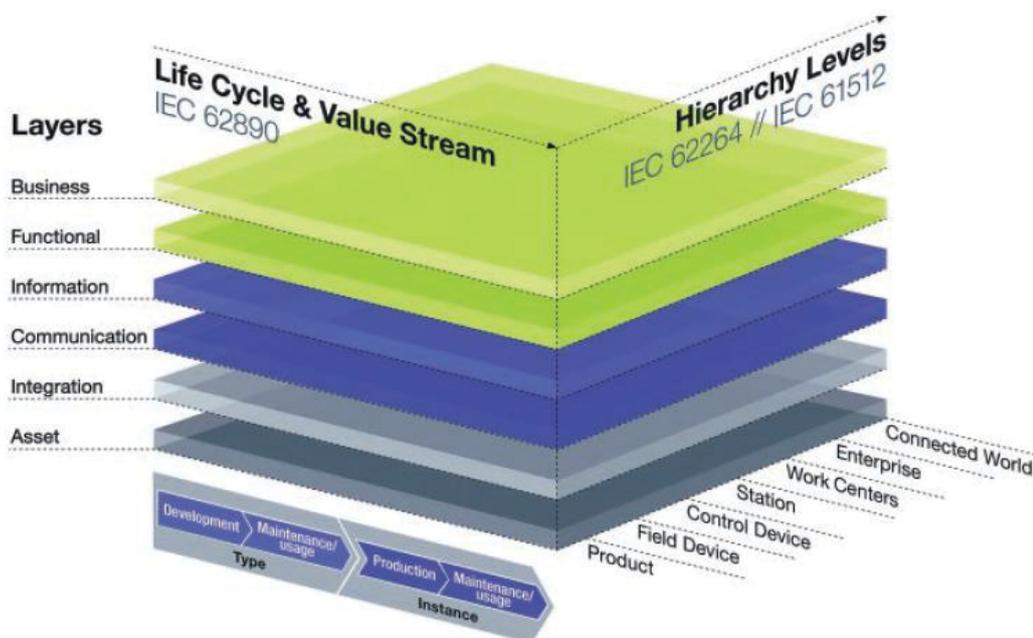
Essas questões de intercomunicação entre os diferentes módulos de produção permitem a realização de dois termos centrais que envolvem a I4.0: fábrica inteligente e produção inteligente. Em relação ao primeiro, quando existem organismos e unidades inteligentes de produção, estabelece-se uma fábrica inteligente. No segundo caso, o que configura uma produção inteligente é a manufatura de um produto que integra a informalização e industrialização (Wan et al. 2015).

Tomando como pressuposto que a aplicação da I4.0 parte de tecnologias existentes, dependendo apenas de uma reorientação de como estas estão sendo utilizadas, um dos principais desafios se torna reconhecer como os padrões disponíveis se enquadram no novo conceito de I4.0. Dessa maneira, um modelo referencial de arquitetura (RAMI 4.0), proposto por um dos grupos de pesquisa da

plataforma alemã, busca estabelecer os elementos que devem ser avaliados de modo a adequar a estrutura produtiva à nova ideia (VDI, 2017).

Logo, a RAMI 4.0, demonstrada na FIGURA 3<sup>10</sup>, estabelece um modelo baseado em três dimensões: ciclo de vida do produto, hierarquia funcional e níveis funcionais. Dentro do ciclo de vida do produto, este acaba sendo diferenciado entre tipo ou instância, que percorre todo o caminho que se inicia nas ideias e conceitos básicos do produto nas etapas de P&D, adentra às esferas de desenvolvimento e, por fim, ao produto já realizado. Dentro da segunda dimensão, a hierarquia funcional se divide entre produto, dispositivos de campo, dispositivos de controle, estações, unidades de trabalho, empresa e conexão externa, onde todas as empresas, consumidores e fornecedores estão conectados. No que diz respeito à terceira dimensão, são definidos aspectos verticais de arquitetura, segregando aspectos relacionados aos dispositivos, integração, comunicação, informações, funções e negócios.

FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DO MODELO REFERENCIAL DE ARQUITETURA PARA I4.0.



FONTE: VDI (2015)

<sup>10</sup> Os termos IEC 62890, IEC 62264 e IEC 61512 representam normas internacionais que destacam os princípios básicos para o gerenciamento do ciclo de vida de sistemas e componentes, integração entre sistemas de manufatura e empresariais e a definição de modelos e terminologias para o controle de processos em indústrias que operam com produção em lotes.

Considerando os elementos acima, o objetivo é reconhecer as diferentes esferas que afetam o ambiente de produção e estimulam a adoção de mecanismos que viabilizem a comunicação entre todas as dimensões. Nesse cenário, a operacionalização da I4.0 é concretizada com o auxílio de algumas tecnologias que integram o processo e que viabilizam a inserção destas dimensões em um mundo digital e conectado.

### 3.3 TECNOLOGIAS INTEGRADAS AO CONTEXTO DE I4.0.

Depois de abordados os elementos básicos que definem a origem do tema e a respectiva operacionalização, torna-se necessário um debate relacionado às tecnologias emergentes que tornaram o ambiente de produção inteligente possível. Destaca-se que não há um número pré-definido de tecnologias que compreendem o tema, mas, ao contrário, o que se encontra são diversas discussões relacionadas a novos desenvolvimentos que tomam como base um núcleo de funcionalidades que contribuem para os processos de interação, aquisição de dados, processamento, transferência e afins. Ghobakhloo (2018) destaca a existência de 12 princípios constituintes e 14 tendências tecnológicas, sobre as quais essa seção busca apresentar algumas que substanciam os levantamentos quantitativos apresentados na terceira seção.

Antes de apresentar as principais tecnologias integrantes, destaca-se que a maioria dos textos que abordam esses elementos mencionam o papel crucial dos sistemas ciberfísicos (CPS). Ao invés de ser avaliado a partir de uma tecnologia específica, os CPS devem ser encarados como uma ideia de funcionamento de tecnologias complementares (infraestrutura de rede, sensores, atuadores, banco de dados e etc) que permitem a intercomunicação entre distintos mecanismos de produção, e também o processamento de informações que substanciam a tomada de decisão dos agentes executivos. Dessa forma, o objetivo central destes sistemas é o estabelecimento da comunicação entre organismos físicos e digitais, permitindo a emergência de um ambiente conectado e inteligente.

Tendo como característica a aplicação de inúmeras tecnologias, que vêm demonstrando uma tendência de barateamento, esses sistemas acabam sendo

implementados pelas firmas em busca da configuração de uma fábrica inteligente (Zhou et al., 2016). Lee et al. (2015) constroem um arcabouço teórico que estabelece cinco níveis centrais que auxiliam no processo de implementação, que se baseiam em critérios de conectividade e gerenciamento de dados.

No primeiro nível, é necessário o estabelecimento de uma infraestrutura inteligente de conexão, sobre a qual se permite a aquisição de dados precisos e confiáveis pelas máquinas e equipamentos. O segundo nível caracteriza o processo de transformação dos dados adquiridos em informações que podem ser utilizadas no processo de análise de desempenho e debate sobre melhorias. No intermédio dos cinco níveis há o estágio cibernético, responsável pelo armazenamento das informações adquiridas e habilitador da comunicação com os níveis de avaliação. No quarto nível se estabelece o processo cognitivo onde a informação é processada pelos usuários, tornando possível a ação de simulações, testes, confirmações de hipóteses e diagnóstico colaborativo pelos agentes envolvidos. Por fim, os resultados alcançados pelo nível anterior são auto executados pelo sistema diante de ajustes e melhorias observadas pelos agentes tomadores de decisão e executadas pelas próprias máquinas e equipamentos (Lee et al. 2015).

Um exemplo prático de implementação de uma solução baseada nos CPS é tratado por Jazdi (2014) diante de uma máquina de café industrial. Neste caso, houve a inserção de uma unidade de controle, aqui identificada como CPS, que atuou de forma a intermediar a comunicação entre o equipamento com tecnologias de nuvem, permitindo aquisição de dados e execução de comandos. Como consequência, tornou-se possível um processo de avaliação de manutenções necessárias sobre a máquina, de entendimento de recursos escassos que deveriam ser reabastecidos e, além disso, possibilitou-se uma maior personalização dos cafés produzidos, o que dialoga diretamente com a finalidade de estabelecer um ambiente comunicativo onde o consumidor assume um papel na produção dos bens.

### 3.3.1 INTERNET DAS COISAS: A INFRAESTRUTURA COMUNICATIVA DA I4.0.

A tecnologia de internet das coisas (IoT) possui muitos elementos e objetivos semelhantes aos definidos sobre os CPS. Contudo, existe uma abrangência maior no sentido de estar presente no contexto dos usuários. As tecnologias que formam a base

da funcionalidade são aquelas relacionadas às TICS, contudo, proporcionam um direcionamento evolutivo por oferecer maior conectividade, aquisição e transformação de dados. Uma conceituação de IoT diante de ambientes inteligentes é apresentada por Gubbi et al. (2013):

Interconexão de dispositivos de detecção (sensores) e atuadores que promovem a habilidade de compartilhar informações entre plataformas por meio de uma estrutura unificada, desenvolvendo um modo de operação comum para permitir aplicações inovativas. Isto é alcançado por uma detecção onipresente, análise de dados e representação das informações em uma computação em nuvem como estrutura unificadora (GUBBI et al. 2013, p. 1647, tradução e parênteses próprios).

Nesse contexto, todos os objetos físicos estão conectados à internet, gerando consequências benéficas para os respectivos usuários. Ou seja, por meio da utilização de dispositivos e sensores de identificação, conforme proporcionado pelas tecnologias de RFID, permite-se um acompanhamento logístico dos produtos, incorrendo na geração de dados em escalas crescentes. Contudo, Gubbi et al. (2013) destacam que novos desenvolvimentos devem ocorrer sobre essas tecnologias, principalmente no quesito de transformar a respectiva utilização em uma dimensão orgânica – naturalizando as funcionalidades deste novo ambiente.

Em primeiro lugar, é necessário que os dispositivos tenham conhecimento acerca dos usuários e das funcionalidades disponíveis, gerando um maior número de informações compatíveis com os cenários onde as tecnologias estão inseridas. Em sequência, se torna preciso desenvolver uma arquitetura de *software* e infraestrutura de rede capazes de processar as informações geradas. Por fim, ferramentas analíticas podem ser desenvolvidas com o objetivo de habilitar um comportamento flexível e autônomo por esses dispositivos.

Em decorrência das inúmeras vertentes relacionadas às funcionalidades que são oferecidas pela IoT, Atzori et al. (2010) destacam três orientações distintas associadas à interpretação das tecnologias: orientação de rede, coisas e semântica. No primeiro caso, a preocupação maior está nos elementos que permitem e contribuem com a possibilidade de habilitar a comunicação entre os dispositivos. A visão de IoT sobre a orientação das coisas estabelece o foco nos dispositivos que acabam sendo utilizados, como os sensores, atuadores, objetos inteligentes, RFID e

etc. Por fim, a terceira orientação se volta aos elementos de análise de todo o contexto, focando na semântica dos dados gerados, visualizando uma oportunidade de desenvolver informações relevantes para o objetivo de permitir um comportamento autônomo dos dispositivos. É a partir da convergência dessas três orientações que a real operacionalidade e funcionalidade dos dispositivos de IoT se apresentam (Atzori et al., 2010).

Um aprofundamento das orientações mencionadas anteriormente, que são estabelecidas diante de elementos distintos sobre a funcionalidade de IoT, é apresentado por Al-Fuqaha et al. (2015), onde existe uma subdivisão entre as etapas de identificação, sensores, comunicação, computação, serviços e semântica. A parte de identificação fica responsável pela função de individualizar os objetos diante de alguma tecnologia disponível, usualmente exemplificada pelas *tags* de RFID. Tendo sucesso na primeira etapa, sensores são utilizados para identificar cada um dos dispositivos da rede, captando e armazenando informações do produto identificado. Em seguida, com o objetivo de possibilitar a emergência de um ambiente inteligente, ocorre a etapa de comunicação, onde objetos distintos transmitem informações entre si e desencadeiam novas ações.

As informações transferidas são processadas e computadas, o que é essencial para que decisões assertivas sejam tomadas com base nos recursos disponíveis. Por penúltimo, os elementos de serviços entregam as funcionalidades que podem ser oferecidas aos usuários mediante as aplicações, seja pelo condicionamento da temperatura em um quarto, o apagar das luzes em determinado horário, a ativação do alarme na ausência dos moradores, entre outros exemplos. Por fim, o elemento semântico se torna responsável pelo processo de obtenção de conhecimento diante dos demais processos, que interagem entre si e, por meio disso, geram novos dados e informações que alimentam o sistema.

Em síntese, a IoT se apresenta como uma tecnologia estabelecida e uma das bases do funcionamento de CPS, onde a preocupação central está no processo de identificação, comunicação e análise de dados em um ambiente inteligente. O objetivo central desta estrutura é estabelecer um contexto em que os dispositivos estão em constante comunicação, gerando dados que são processados e que retroalimentam a infraestrutura de tal modo que soluções inteligentes sejam oferecidas aos usuários.

### 3.3.2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E APRENDIZADO DE MÁQUINAS: A HUMANIZAÇÃO DOS COMPUTADORES.

Uma terceira tecnologia central dentro do ambiente de I4.0 diz respeito à inteligência artificial (IA) e o método de aprendizado de máquinas, reconhecido em inglês como *machine learning* (ML), que está inserido no ambiente de IA. Embora exista esse inter-relacionamento entre ambos, enquanto a literatura de IA se preocupa com o processo de análise e tomada de decisão por parte dos computadores, os métodos de ML focam no aprendizado com base em dados e regressões preditivas. Uma definição conjunta acaba sendo ofertada por Kaplan e Haenlein (2019, p. 3):

[...] nós definimos IA como a habilidade do sistema de interpretar dados externos de forma correta, aprender com estes e utilizar o aprendizado adquirido para alcançar objetivos e tarefas específicas por meio de uma adaptação flexível. [...] IA utiliza informações adquiridas por meio de IoT e fontes de big data como recursos para a identificação de regras e padrões por meio de abordagens proporcionadas pelo aprendizado por máquinas, que descreve métodos que auxiliam os computadores a aprenderem sem serem explicitamente programados (Kaplan e Haenlein, 2019, p.3, tradução própria).

Diante desta definição, as funcionalidades de IA podem ser subdivididas em três estágios distintos de progresso que estão diretamente relacionados com a capacidade das informações serem processadas, analisadas e transformadas em recursos que sustentam a tomada de decisão pelos dispositivos (Kaplan e Haenlein, 2019). Em um primeiro estágio é apresentada a IA limitada, onde há identificação de faces pelo Facebook, voz pelos assistentes virtuais, carros autônomos, análise do ambiente por dispositivos fotográficos e afins. No segundo, a IA geral operacionaliza ações paralelas às exercidas pelos humanos, como racionalização, planejamento e resolução de problemas, o que traz benefícios sob uma ótica de linhas de produção autônomas a partir da detecção e resolução de defeitos e ineficiências. Por fim, o último estágio, denominado de super IA, é caracterizado pela existência de um conhecimento holístico do ambiente e níveis de consciência que tornam os humanos redundantes.

Em síntese, a tecnologia de IA, tomando proveito dos mecanismos de ML, se torna essencial em um contexto em que o fluxo de dados é acelerado e existe a

necessidade de extrair informações de valor econômico destes recursos disponíveis. Diante disso, as funcionalidades acabam sendo centrais em um ambiente inteligente, onde a eficiência produtiva e automatização dos processos são elementos centrais e fundamentadores do conceito de I4.0.

### 3.3.3 *BIG DATA* COMO REPOSITÓRIO PARA NÍVEIS CRESCENTES DE DADOS.

O ambiente inteligente idealizado pela I4.0 estabelece uma conjuntura na qual toda e qualquer tipo de ação gera dados que podem ser incorporados ao sistema de análise da estrutura. Esses dados, contudo, não possuem uma garantia de estruturação que permita o fácil acesso, leitura e processamento. Além disso, o fluxo crescente de informações disponíveis impõe um novo desafio relacionado à capacidade de armazenamento. É diante nesse contexto que as ferramentas de *big data* surgem, motivadas em auxiliar no processo de captação, armazenamento e análise dos dados.

Apesar de difícil conceituação, a definição de *big data* acaba surgindo por alguns elementos que auxiliam no processo de entendimento dos critérios que definem um banco de dados como sendo *big data*, além de expor os principais desafios da disciplina. Embora não tenha estado explicitamente preocupado com a disciplina de *big data*, Laney (2001) descreve um cenário enfrentado pelo *e-commerce*, cujos conceitos contribuem com o debate acerca do tema. O autor descreve três características marcantes sobre os dados que estavam sendo criados, que continuam presentes (embora mais intensivos) no ambiente de *big data*.<sup>11</sup>

Em primeiro lugar há uma preocupação com o volume de dados disponíveis, sendo esse um debate contemporâneo e dinâmico acerca da definição de tamanho que um banco de dados precisa assumir para ser entendido como *big data*. Conforme as tecnologias de informação se desenvolvem, a tendência é expandir a capacidade de criação de dados e, desta forma, a estipulação de um tamanho específico (em *terabytes* ou *pentabytes*) pode se tornar defasado em um curto período (Gandomi e Haider, 2015). No segundo ponto, a velocidade de emergência, de captação, de

---

<sup>11</sup> Estas três características acabam sendo popularmente conhecidas como os “três Vs” relacionados à *big data*: volume, velocidade e variedade.

armazenamento e de análise são avaliados. Sobre isso, os desenvolvimentos relacionados a IoT expandem o horizonte de sensores e dispositivos capazes de gerar informações e, por conta disso, demandam desenvolvimentos recorrentes sobre a capacidade de se analisar dados em tempo real (Gandomi e Haider, 2015). Por fim, Laney (2001) destaca a variedade de dados disponíveis, o que implica em obstáculos específicos sobre os critérios de estruturação dos bancos de dados. Ao invés de existir uma captação em termos estruturados, como se vê com as populares planilhas de Excel, onde existem categorias e observações organizadas, temos por outro lado dados como os de formato de vídeo, foto e som, que dificultam uma análise direta.

Além dos "três Vs" (volume, velocidade e variedade) expostos por Laney (2001), algumas companhias defendem outros critérios que devem ser avaliados a partir da estrutura de *big data*, expandindo a categorização para "seis Vs", adicionando veracidade, variabilidade e valor. Para o primeiro, algumas formas de obtenção de dados, e os próprios organismos envolvidos no processo (como em um questionário online), podem resultar em informações falsas e enviesar uma possível inferência. No caso da variabilidade, se encontra uma heterogeneidade dentro dos fluxos de informação, decorrentes de picos e baixas em termos de geração. Exemplo disso pode envolver uma análise de *tweets* na plataforma do X durante um período de eleição, gerando números expressivos de informações a respeito dos sentimentos políticos, enquanto o fluxo contrai durante períodos sem qualquer eleição programada. Por fim, um dos elementos centrais está no processo de adquirir valor a partir dos dados. Devido ao grande número de informações disponíveis, muitos destes podem não possuir qualquer tipo de valor econômico para a empresa que os adquire. No entanto, a partir de métodos de filtragem, é possível obter uma seleção mais compacta que possa servir para etapas de tomada de decisão por parte das firmas.

Em termos gerais, embora o tema de *big data* possa ser interpretado em termos mais abstratos com relação às demais tecnologias, isso transcorre das características evolutivas sobre as quais todo o novo ambiente inteligente está envolvido. A *big data* se torna uma ferramenta diante dessa conjuntura dinâmica, permitindo que todos os obstáculos relacionados à cadeia que flui da criação até análise dos dados sejam acessados e enfrentados.

### 3.3.4 COMPUTAÇÃO EM NUVEM COMPETINDO COM A NECESSIDADE DE CAPITAL FÍSICO.

A computação em nuvem vem sendo uma tecnologia que não somente facilita a adoção da I4.0, mas que tem contribuído com a remodelação do mercado, tendo em vista os efeitos observados em facilitar o acesso por parte de firmas menores, com utilização das principais ferramentas de operação sem que haja a existência de limitações geográficas. Com relação a isso, uma conceituação relevante é exposta por Mell e Grance (2011, p. 2):

Computação em nuvem é um modelo para habilitar o acesso onipresente, conveniente e *on-demand* à rede para um grupo de recursos computacionais compartilhados (redes, servidores, armazenamento, aplicações e serviços) que podem ser rapidamente provisionados e lançados com esforços mínimos de gerenciamento ou interação com o provedor do serviço (Mell e Grance, 2011, p. 2, tradução própria).

Desse modo, os modelos tradicionais de negócio que envolviam a aquisição de capital físico, que resultava na ocupação de um espaço relevante em fábricas e escritórios, foram substituídos por aplicações cujo acesso transcorre pela rede. Muitos sistemas integrados de gestão empresarial (ERP) acabam adotando essa prática e são vendidos como forma de assinatura às empresas que recorrem a estes recursos. Empresas como Amazon, Google, Microsoft e Oracle fazem proveito de suas respectivas infraestruturas consolidadas e embarcam em um ramo de negócio no qual se permite diferentes tipos de modelos, como: *software* como serviço, plataformas como serviço ou infraestrutura como serviço (Mell e Grance, 2011)<sup>12</sup>.

No cenário da I4.0, a computação em nuvem é, por muitas vezes, atribuído o papel de intermediador entre as soluções logísticas relacionadas ao fluxo de informações entre máquinas ou o de armazenamento das informações adquiridas durante todo o ciclo de vida do produto. Dessa forma, atuam tanto pelo lado de estabelecer um serviço de comunicação como com a oferta de um banco de dados capaz de armazenar estas informações. O papel se torna ainda mais central frente aos setores onde as limitações geográficas acabam sendo influentes, tendo em vista

---

<sup>12</sup> Os termos originais em inglês são: *Software as a Service* (SaaS); *Platform as a Service* (PaaS) e *Infrastructure as a Service* (IaaS).

que a centralização de aplicações e recursos sobre um nível específico permite que as distâncias geográficas reais sejam substituídas por alternativas virtuais (Queiroz al., 2019; Stock e Seliger, 2016).

### 3.3.5 BLOCKCHAIN: DE AMEAÇA À CENTRALIZAÇÃO FINANCEIRA PARA INSTRUMENTO DE VALIDAÇÃO PÚBLICA.

A tecnologia do *blockchain* emergiu como o código base que sustenta as operações com criptomoedas, tendo origem diante da *Bitcoin*. De início, o contexto relacionado ao mercado de criptomoedas demonstrava um teor de ameaça ao poder público, tendo em vista o objetivo de criar uma alternativa frente às operações financeiras, onde torna-se desnecessário um agente intermediador dessas transações. Como consequência, havia forte pressão dos países para que esse método não se popularizasse, tendo em vista que enfraqueceria o poder governamental de atuar dentro de um mercado desregulamentado.

Entretanto, o que surgiu como uma ameaça logo foi encarado como uma tecnologia emergente com potencial para contribuir com diversos serviços públicos, principalmente envolvendo critérios de validação e transparência. A tecnologia é operacionalizada por meio de princípios relacionados a uma corrente de blocos interconectados e interdependentes, sendo cada um destes blocos um registro de uma transação criptografada (Al-Saqaf e Seidler, 2017). Devido a esse processo de interconexão entre cada transação e da forma como o *blockchain* foi programado, necessitando do processo de mineração<sup>13</sup> para atingir um consenso coletivo de verificação, tornou-se possível que outros recursos fossem validados sem a necessidade de uma entidade intermediadora.

À luz da I4.0, a tecnologia de *blockchain* pode trazer resultados positivos sobre aspectos relacionados à validade de contratos com fornecedores, parcerias estratégicas, contratação de funcionários, entre outras questões burocráticas. Além disso, torna-se importante ressaltar que o *blockchain* ainda é uma tecnologia em desenvolvimento, ou seja, muitas funcionalidades ainda devem ser exploradas e

---

<sup>13</sup> A mineração refere-se ao processo pelo qual transações são verificadas e adicionadas ao blockchain. Este processo envolve resolver complexos problemas matemáticos usando alto poder de processamento computacional.

ofertadas ao público, abrindo espaço para uma intervenção pública para que essas novidades atendam às necessidades governamentais. De todo modo, os critérios relacionados ao anonimato envolvido com a validação das transações, somado à dependência direta dos códigos programados, implicam em um ambiente onde sejam desenvolvidos estudos sobre os riscos envolvidos com as transações, principalmente diante de ameaças cibernéticas.

### 3.3.6 SEGURANÇA CIBERNÉTICA FRENTE A UM AMBIENTE TOTALMENTE CONECTADO.

A realização da I4.0 possibilita a configuração de um ambiente onde há comunicação intensiva durante a cadeia de produção e, além disso, transborda efeitos sobre os consumidores em um cenário em que todos os eletrônicos emitem e recebem informações, que são utilizadas de modo a proporcionar diversos recursos aos usuários. Apesar desta conjuntura comunicativa estabelecer um avanço no desenvolvimento socioeconômico, algumas questões sensíveis emergem no que refere à segurança das informações transacionadas entre os dispositivos inteligentes. Dessa forma, a área da cibersegurança busca assegurar a liberdade no processo de desenvolvimento e operação destas tecnologias, concomitantemente à manutenção da privacidade e vigilância sobre as ameaças virtuais.

Violação, adulteração, invasão e infecção por vírus são algumas ações que os criminosos cibernéticos promovem diante de dispositivos e usuários não preparados para navegar neste ecossistema. Um dos elementos que contribui para o sucesso destes indivíduos é o fato de que o ambiente de IoT integra uma grande variedade de dispositivos ao ambiente virtual, consolidando um contexto em que produtos não tradicionais à rede apresentam deficiências que resultam na necessidade de barreiras de proteção contra atividades cibernéticas ilícitas. Assim, os novos produtos inteligentes, embora possibilitem a expansão da fronteira de ideias e utilização pelos usuários, emergem como os elos mais fracos em relação à segurança das novas redes de computadores (Kolias et al., 2017).

O resultado deste ambiente conectado é avaliado em um relatório produzido pela Accenture (2021), onde 4.744 executivos de empresas pertencentes a 18 nacionalidades e 23 indústrias distintas destacaram como a área de cibersegurança

está sendo encarada pelos empreendedores no ano de 2021. No que diz respeito à evolução no número de tentativas de infiltração, identificou-se um crescimento de 31% na comparação dos anos de 2020 e 2021, que foram facilitados por meio de comunicações estabelecidas com empresas terceirizadas (Accenture, 2021). Dentro deste contexto, analisado de forma concomitante à idealização da I4.0, onde a cadeia produtiva evolui em direção à construção de uma verticalização artificial, o estabelecimento de uma rede comunicativa com fornecedores sujeita todos os atores envolvidos aos riscos provenientes de ameaças cibernéticas. Desse modo, o relatório ainda fornece informações a respeito dos investimentos voltados à área de segurança, apresentando um quadro onde 82% dos entrevistados expandiram investimentos nestas tecnologias e, além disso, houve expansão de 15% sobre o orçamento destinado à área de TI.

Em síntese, as áreas apresentadas nesta seção, que começam diante da realização de CPS até o estabelecimento de barreiras cibernéticas, demonstram como o contexto da I4.0 é constituído por inúmeras oportunidades tecnológicas que podem ser exploradas diante de uma política industrial compatível com as estratégias e vantagens comparativas nacionais. Observa-se que todas as tecnologias acabam sendo interrelacionadas e afetam a eficácia uma das outras. Ou seja, a realização do conceito de I4.0 ocorre mediante um pleno entendimento e aplicação destas tecnologias. Por fim, as novas oportunidades de desenvolvimento abrem portas para o fortalecimento de novas ameaças, que devem ser consideradas diante dos processos de implementação visando a segurança das informações que trafegam diante de uma cadeia produtiva digital e inteligente.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.

Na medida em que a I4.0 e as novas tecnologias pertencentes ao setor de TICS contribuem com a retomada de discussões atreladas às políticas industriais, o objetivo central deste capítulo esteve direcionado à apresentação dos elementos básicos e centrais que constituem cada uma dessas esferas, buscando elucidar questões relacionadas à vinculação das TICS e I4.0, aos elementos motivadores e habilitantes desse conceito, e às características das principais tecnologias integrantes. Nesta linha, reconhece-se que o entendimento desta estrutura se torna indispensável

na medida em que existe uma competição entre diferentes políticas industriais direcionadas ao tema. Desse modo, a compatibilização dos instrumentos utilizados com as estruturas que devem ser afetadas aumentam as chances de sucesso da atuação pública.

O setor de TICS é apresentado como o ambiente geral que engloba o conceito de I4.0. Logo, reconhecem-se as duas características centrais de oportunidades inexploradas e natureza pervasiva, que contribuem com os potenciais do setor na mesma medida em que se aumenta a complexidade de delimitação deste. A fim de ultrapassar as barreiras de definição, o referencial de quatro camadas introduzido por Fransman (2010) cumpre o papel de apresentar o ambiente de TICS. Assim, permite-se não apenas o reconhecimento das tecnologias chaves como o funcionamento desta estrutura que proporciona uma ramificação que contribui com a emergência do conceito de I4.0.

Na linha das ideias defendidas pelo conceito de I4.0, afirma-se que o tema se apoia na introdução das TICS nas mais diversas cadeias de produção, possibilitando a construção de um ambiente inteligente que aproxima os aspectos físicos e digitais inerentes às atividades de fabricação de produtos e prestação de serviços. Em seguida, observa-se que a emergência do tema ocorre devido a uma política industrial do governo alemão em manter a posição de liderança na manufatura global e, deste modo, reforça a importância do planejamento estratégico e atuação governamental. Por fim, levando em consideração as óticas tecnocratas e romantizadas atreladas à I4.0, são apresentados alguns limitantes relacionados à dificuldade de implementação e considerações especiais que precisam ser endereçadas na medida em que essas tecnologias ameaçam o mercado de trabalho contemporâneo.

Partindo do entendimento de que a ideia de I4.0 é construída pela introdução de tecnologias emergentes pertencentes ao setor de TICS, busca-se apresentá-las e destacar as aplicações possíveis. Com isso, reconhece-se não somente como a ideia é operacionalizada, por meio da comunicação intensiva entre CPS, com IA e interpretação e armazenamento de dados por meio da *big data* e computação em nuvem, mas também se facilita o reconhecimento de como essas tecnologias podem ser aplicadas e introduzidas ao setor de petróleo e gás no Brasil.

#### 4 PANORAMA ECONÔMICO E INDUSTRIAL DE PAÍSES PROMOTORES DE POLÍTICAS DE I4.0

Os capítulos anteriores promoveram discussões complementares atreladas a um desejo de transformação econômica. Nesta linha, a política industrial é identificada como um instrumento de ação pública que estimula a colaboração entre agentes inseridos em um sistema nacional de produção e inovação. Além disso, o sucesso destas políticas pode estar condicionado à existência de janelas de oportunidades, onde se identifica entre elas a I4.0. Entretanto, apesar de se reconhecer os instrumentos e definir os objetivos da política, é necessário um mapeamento relacionado às condições de oferta atreladas ao ambiente de produção e inovação instalado em diferentes países, além dos efetivos esforços relacionados ao emprego de políticas direcionadas ao conceito, que é o objetivo deste capítulo. Sendo assim, surgem as seguintes questões: Qual o nível de desenvolvimento dos países que têm implementado políticas de I4.0? Como é o quadro do ambiente de oferta industrial desses países? Essa abordagem se justifica diante do reconhecimento de que fatores específicos a cada país, estrutura de mercado e setor contribuem com o processo de mudança tecnológica (Dosi, 1988).

O grupo de países abordado neste capítulo é composto por diferentes nações que se movimentam em um planejamento estratégico vinculado à I4.0 por meio de diferentes políticas percorridas ao longo do capítulo. Além disso, destacam como países com sucesso na produção industrial se condicionam às novas estruturas de produção que ameaçam o *status quo*. Sendo assim, os Estados Unidos, a Alemanha, a França, o Reino Unido, o Japão, a Coreia do Sul, a China e o Brasil são avaliados em termos das políticas que vêm sendo implementadas e indicadores relacionados à estrutura produtiva, econômica e de inovação.

Dentro desse contexto, a primeira seção promove uma análise discursiva de dados vinculados ao desenvolvimento econômico e inovativo destes países. Em primeiro lugar, indicadores relacionados ao nível de renda per capita apresentam a heterogeneidade econômica, reforçando o caráter plural destas tecnologias de se adaptarem às estratégias específicas de cada nação. Em seguida, o investimento em P&D proporcional ao PIB apresenta os esforços inovativos estabelecidos pelos países em um cenário de competitividade internacional sustentado por soluções inovativas. Por fim, a efetividade destes esforços é abordada à luz das patentes concedidas.

O ambiente industrial se torna o foco da segunda seção por conta dos benefícios vinculados à implementação de um ambiente de produção inteligente. Inicialmente, o valor adicionado em relação ao PIB é apresentado a fim de reforçar a importância do setor de manufatura. Em seguida, inclinando-se sobre os debates de postos de trabalho nesse segmento, o capítulo evidencia a evolução para os países. Por fim, o nível de complexidade produtiva da cesta de exportação dos países é abordado por meio de indicadores relacionados à intensidade tecnológica dos bens comercializados com o exterior.

#### 4.1 PLURALIDADE DE MOTIVAÇÕES COM BASE NO DESEMPENHO ECONÔMICO E INOVATIVO.

Esta seção pretende evidenciar como uma política industrial, voltada à I4.0, pode ser implementada por países de forma independente do estágio de desenvolvimento econômico, respeitando a ideia de que o sucesso pode estar condicionado ao nível de maturidade de setores competitivos dentro das vantagens comparativas. Dessa forma, vê-se que as novas tecnologias emergentes permitem que estratégias sejam elaboradas de acordo com as metas e contextos específicos de cada país, como a manutenção do pioneirismo inovativo pela indústria, a intensificação da complexidade da carteira produtiva, o enfrentamento de problemas sociais estruturais ou a institucionalização dos esforços de desenvolvimento tecnológicos e inovativos em um mercado internacional. Destaca-se, diante dos diferentes objetivos estabelecidos por cada país, o conceito de missões abordado por Mazzucato (2018) ao visualizar como o processo inovativo pode estar direcionado ao enfrentamento destes obstáculos.

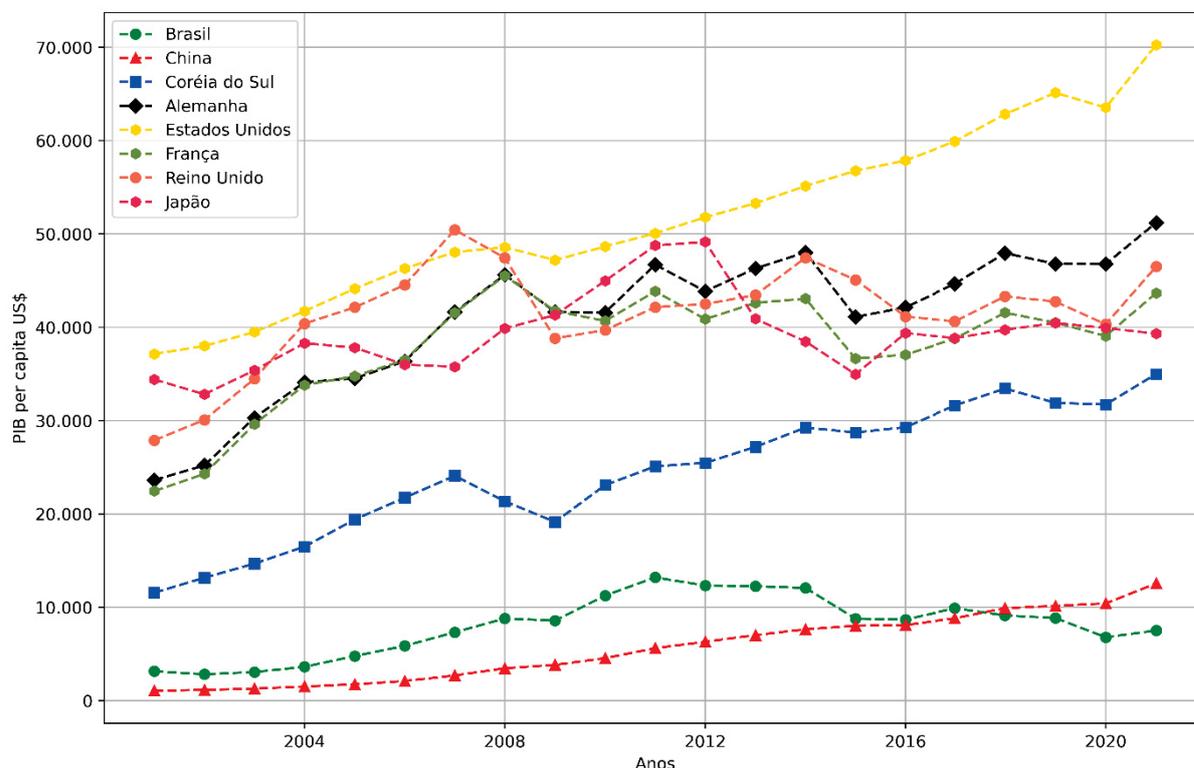
Entretanto, embora as tecnologias associadas ao setor das TICS se configurem pela sua natureza perversa, ressalta-se que essas estratégias de políticas industriais devem respeitar a compatibilidade entre competências e recursos disponíveis com as ações e objetivos propostos. À luz do exposto, a construção desse quadro de desenvolvimento é realizada a partir de dados relacionados ao nível de desenvolvimento econômico, financiamento de atividades de P&D e aplicações de patentes, os quais permitem uma análise descritiva dos cenários observados sobre os países de interesse.

#### 4.1.1 ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO COMO MOLDADOR DOS OBJETIVOS ATRELADOS À IMPLEMENTAÇÃO E PRODUÇÃO DE I4.0.

Conforme mencionado na introdução desta seção, as políticas industriais de I4.0 viabilizam a existência de ramificações sobre os objetivos atrelados à atuação pública. Nesse sentido, países menos desenvolvidos observam uma oportunidade de superar problemas estruturais persistentes, como a construção de infraestrutura básica, o fortalecimento das instituições, organizações e amadurecimento das empresas a fim de habilitar saltos de desenvolvimento em direção ao *catching-up*. Em paralelo, países desenvolvidos buscam o fortalecimento das posições de liderança sobre as atividades produtivas, a solidificação de redes colaborativas e a capacidade de ofertar novos postos de trabalho qualificados.

Logo, o GRÁFICO 1 evidencia as diferenças observadas sobre os níveis de desenvolvimento em relação ao PIB per capita existentes nas análises relacionadas aos países selecionados. Contudo, as diferenças encontradas nos níveis de renda não impedem a implementação de políticas de I4.0, mas, ao contrário, reforçam a necessidade de compatibilização dos recursos disponíveis com os objetivos propostos e alinhamento com as vantagens comparativas alcançadas por cada país.

GRÁFICO 1 – EVOLUÇÃO DO PIB PER CAPITA, EM DÓLARES E VALORES CORRENTES, ENTRE O PERÍODO DE 2001 A 2021



FONTE: WDI (2023)

Elaborado pelo autor.

Os diferentes níveis de renda dos países reforçam a ideia de independência entre o estágio de desenvolvimento econômico com a ambição de implementar uma política de I4.0. Países com menores níveis de renda, comparativamente aos demais, como Brasil e China, podem estabelecer políticas que buscam no desenvolvimento destas tecnologias a instituição de um processo de *catching-up* econômico e tecnológico. O *Made in China 2025*, política nacional divulgada em 2015, reconhece um arsenal de oportunidades de novos ciclos de revoluções científicas e transformações industriais que derivam da I4.0 (国务院, 2015). Nota-se ainda que apenas recentemente a China ultrapassou o Brasil em níveis de renda per capita, embora isso não tenha impedido o país de elaborar e implementar inúmeras políticas agressivas em direção à independência produtiva e científica. Em contrapartida, a experiência brasileira peca pela omissão de um planejamento central, embora iniciativas como o ProFuturo e a Câmara Brasileira de Indústria 4.0 tenham sido

estabelecidas (Câmara I4.0, 2019; MCTIC, 2017). Além disso, observa-se uma revitalização do tema de políticas industriais por meio da Nova Indústria Brasil, que busca combater o processo de desindustrialização, baseando-se no conceito de missões da Mazzucato (2018) e estabelece uma política explícita de transformação digital para a indústria (Governo Federal, 2024).

Essas novas tecnologias permitem ações que não somente contribuem com a continuidade de um desenvolvimento econômico estabelecido, mas que favorecem o enfrentamento de problemas estruturais persistentes, como evidenciado na estratégia da Coreia do Sul. Embora o país tenha demonstrado sucesso no processo de desenvolvimento motivado por políticas industriais, educacionais e de inovação (Kim, 2005), os novos esforços nacionais se direcionam para um caminho que busca a inserção da sociedade em um novo ciclo de desenvolvimento. Essas ações se sustentam diante do sentimento de que a sociedade coreana não se beneficiava dos processos de desenvolvimento recentes, sendo ameaçadas pelas novas tecnologias. Sendo assim, se estabelece um relatório intitulado de I-Korea 4.0 a fim dar clareza a um planejamento de inteligência, inovação, inclusão e interação (PCFIR, 2017).

Por fim, a emergência dessas tecnologias estabelece uma ameaça potencial ao protagonismo historicamente estabelecido por nações referência na produção e inovação no setor de manufatura. Desse modo, Estados Unidos, Alemanha, França e Reino Unido buscam restabelecer e reforçar a posição de liderança alcançada por meio dessas políticas. A *Advanced Manufacturing Partnership* (AMP), lançada pelo governo Obama em 2011, buscou retomar a posição de liderança na manufatura (PCAST, 2012), o que também ocorre diante da Plataforma Indústria 4.0 desenvolvida no ano de 2015 na Alemanha (EC, 2017). Além disso, a Indústria do Futuro se estabelece como o plano francês que busca uma reaproximação do nível de desenvolvimento tecnológico e integração digital do país com os demais (L'industrie du futur, 2013). No que diz respeito ao Japão, políticas como a Iniciativa Revolução Robótica apresentada em 2015 e o plano Indústrias Conectadas de 2017 retratam os esforços nacionais na direção de se adaptar às novas tecnologias. Finalmente, o projeto Catapulta é estabelecido no Reino Unido, a fim de fomentar diferentes redes colaborativas que reforçam as competências inovativas da região.

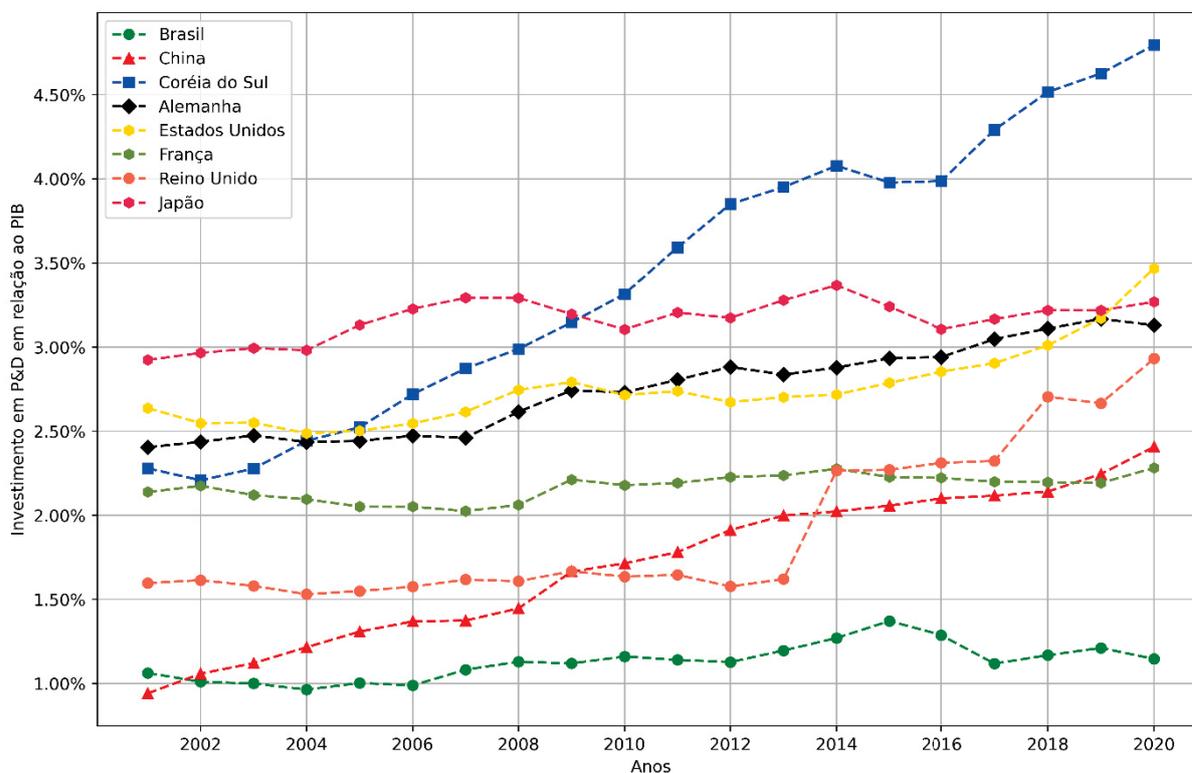
Em síntese, destaca-se que os diferentes níveis de renda dos países não estabelecem obstáculos à implementação de políticas industriais. Ao invés disso, reforçam a ideia de que os países devem estabelecer ações que se direcionem aos

objetivos estratégicos de cada nação, respeitando as trajetórias históricas de desenvolvimento e os recursos disponíveis. Ademais, políticas centrais acabam sendo introduzidas e aprofundadas no decorrer do capítulo.

#### 4.1.2 APOIO À ATIVIDADE INOVATIVA A PARTIR DO INVESTIMENTO EM P&D.

Tendo em vista a viabilização de cadeias de produção flexíveis, potencializadas pela introdução do conceito de I4.0, as oportunidades de inovação se expandem na medida em que processos produtivos se tornam abertos à personalização. Nesta linha, a fim de transparecer o ambiente inovativo instalado em cada país, o indicador abordado no GRÁFICO 2 se refere ao investimento em P&D proporcional ao PIB. Ressalta-se que esse esforço, embora crítico, não é exclusivo no sentido de contribuir com a atividade inovativa, tendo em vista a inexistência de um processo linear padrão para atingir sucesso nessas empreitadas. Entretanto, isso nos serve de indicativo de uma potencial estrutura de inovação instalada em cada país.

GRÁFICO 2 – EVOLUÇÃO DO INVESTIMENTO EM P&D EM RELAÇÃO AO PIB DURANTE O PERÍODO DE 2001 A 2020.



FONTE: WDI (2024)

Elaborado pelo autor.

Inicialmente, partindo de uma análise conjunta com a tendência de crescimento econômico coreano observado no GRÁFICO 1, os esforços atrelados às atividades de P&D fundamentam uma estratégia que se apoia na construção de um ambiente de inovação. Por isso, assume-se que a atividade inovativa tem se enraizado a partir das estratégias de engenharia reversa, de fomentação de conglomerados industriais, de investimentos em educação e demais ações tomadas pelo país em sua história recente (Kim, 2005). Na perspectiva dos planejamentos voltados à I4.0, as estratégias coreanas colocam a inovação como um dos direcionamentos centrais (PCFIR, 2017). Em contraste com a experiência coreana, o Japão também possui um histórico envolvimento do governo com a formação de um ambiente inovativo sólido, a partir da construção de sistemas nacionais de inovação evidenciados por Freeman (1988).

Vislumbrando comportamentos estáveis de investimento em P&D, torna-se necessário o entendimento do que as nações têm operacionalizado para fomentar e

promover as atividades inovativas nesse cenário de emergência de novas tecnologias. Dentro da AMP, redes de institutos nacionais de inovação, que se prendem a núcleos tecnológicos específicos, reforçam os conceitos de hélice tripla e parceria público-privada (PPP), tendo em vista a constante comunicação estabelecida entre empresas, universidades e agências federais de pesquisa e financiamento. Nesse ambiente, há uma colaboração mútua que viabiliza a aceleração do desenvolvimento científico e tecnológico com a aplicação comercial dos novos produtos (NSTC, 2013). Essa forma operacional também é introduzida na experiência britânica, onde o projeto Catapulta fomenta as atividades de P&D a fim de aproximar a pesquisa da indústria (Catapult, 2023). Paralelamente, a Plataforma Indústria 4.0 possui um grupo de trabalho especializado na área de tecnologias e cenários de aplicação a fim de dar clareza aos agentes participantes da estrutura.<sup>14</sup> Por fim, a experiência da Indústria do Futuro francesa vai ao encontro das demais políticas, reforçando a ideia de colaboração entre os agentes participantes por meio de *hubs* que facilitam a troca de informações.<sup>15</sup>

Diante de uma estratégia de instalar um ambiente inovativo para exportar soluções tecnológicas ao mercado internacional, a China tem demonstrado fortes iniciativas de expansão dos investimentos direcionados a essas atividades. Desta forma, as estratégias agressivas de desenvolvimento se compatibilizam com ações de expansão dos recursos que buscam criar um ambiente inovativo compatível com as estruturas observadas em países referência. Por fim, compatível com o desempenho atrelado ao PIB per capita, o Brasil demonstra baixos esforços inovativos durante o período observado, o que acaba penalizando a competitividade nacional no mercado interno e externo. Entretanto, o baixo índice de investimento em P&D brasileiro em nível macro não limita as ações nacionais em setores específicos, o que ressalta a importância desta tese de identificar na Petrobras a capacidade de suportar uma política que gere transbordamentos para o setor e economia brasileira. Conforme mencionado anteriormente, as oportunidades atreladas à I4.0 podem servir de inspiração para que novas iniciativas sejam aceitas pela sociedade e pelo mercado, a fim de dar início a uma transformação dos hábitos inovativos nacionais.

---

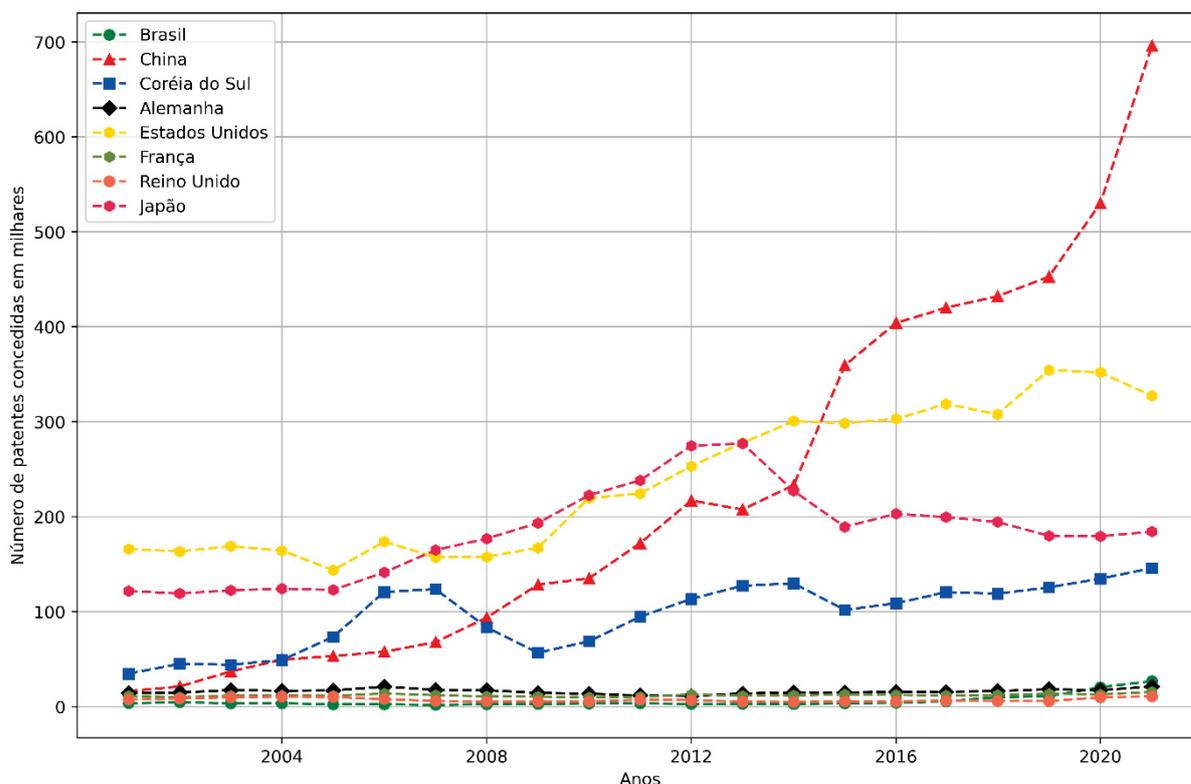
<sup>14</sup> Os grupos e objetivos específicos podem ser acessados por meio do endereço <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/ThePlatform/Structure-Organization/PlatformWorkingGroups/platform-working-groups.html>. Acesso em março de 2023.

<sup>15</sup> As missões da Indústria do Futuro podem ser acessadas por meio do endereço <http://www.industrie-dufutur.org/nos-missions-2/>. Acesso em março de 2023.

#### 4.1.3 CONSOLIDAÇÃO DO DESEMPENHO INOVATIVO A PARTIR DE PATENTES CONCEDIDAS.

Além dos esforços destinados à estruturação de um ambiente inovativo, apoiado por medidas nacionais de intensificação de articulações internas, torna-se necessário que haja mais informações relacionadas à análise de indicadores que apontem para os resultados efetivos de cada país nesse âmbito. Sendo assim, o GRÁFICO 3 destaca a evolução dos países em termos do número de patentes concedidas durante o século XXI. Importante reforçar que não houve seletividade baseada em critérios de recorte tecnológico, pois assume-se que a natureza pervasiva dos benefícios atrelados à I4.0 pode impactar os mais diversos setores da economia, independentemente da intensidade tecnológica.

GRÁFICO 3 – EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PATENTES CONCEDIDAS, EM MILHARES, DURANTE O PERÍODO DE 2001 A 2021.



FONTE: WIPO (2023)

Elaborado pelo autor.

Diante do exposto acima, observa-se que a China tem evoluído de forma incomparável com os demais países no número no que diz respeito às patentes concedidas, o que enfatiza o desejo de transformação do país diante de sua política nacional. Deste modo, as oportunidades atreladas ao conceito de I4.0 se tornam estratégicas para a consolidação do país como um mercado de inovações para o mundo. Na sequência, observa-se que os Estados Unidos também demonstram um desempenho intensivo, em termos absolutos, de crescimento nas patentes concedidas, apoiando a retomada da imagem de um país exportador de inovações estabelecido em sua respectiva história industrial. Destaca-se, contudo, que uma das motivações da política americana decorre do declínio no número de inovações de bens de alta e baixa intensidade tecnológica (PCAST, 2011).

Em seguida, o Japão tem demonstrado um decréscimo na habilidade inventiva a partir do número de patentes, e, para tanto, reforça a importância das políticas nacionais que vêm sendo implementadas de apoio a diferentes tecnologias disruptivas, como robótica, inteligência artificial, veículos autônomos, entre outros (Kloc, 2022). De modo intermediário, a Coreia do Sul se apresenta com uma evolução singela, o que causa desconfiança a partir de uma análise concomitante com os esforços ímpares no quesito de investimento em P&D. Contudo, isto apenas reforça a ideia de que esse tipo de investimento não é exclusivo em relação às ações capazes de gerar resultados. Além disso, é importante destacar que a concessão de patentes não se concretiza em uma inovação de forma imediata, tendo em vista a necessidade de introduzir esses avanços no mercado.

Essas ressalvas se tornam aplicáveis à comparação entre o desempenho alemão, francês, britânico e brasileiro, onde, apesar dos países se situarem muito abaixo dos demais, os reais impactos podem ser distintos perante o grupo, tendo em vista os resultados atrelados às inovações de cada país. Adicionalmente, destaca-se o caráter homogêneo no desempenho inventivo de países como a Alemanha, tendo em vista a inexistência de um período no qual a concessão de patentes esteve abaixo de 10.000, enquanto o resultado brasileiro passou da casa dos milhares apenas em 2008, reforçando que esse processo é muito mais enraizado em outros países. No âmbito da efetivação dos resultados desses esforços inventivos, enfatiza-se a natureza crítica das políticas que objetivam a aproximação entre pesquisas científicas e tecnológicas com o mercado, endereçadas pelos Estados Unidos e Reino Unido. Desse modo, entende-se que apenas o número de patentes não reflete um real

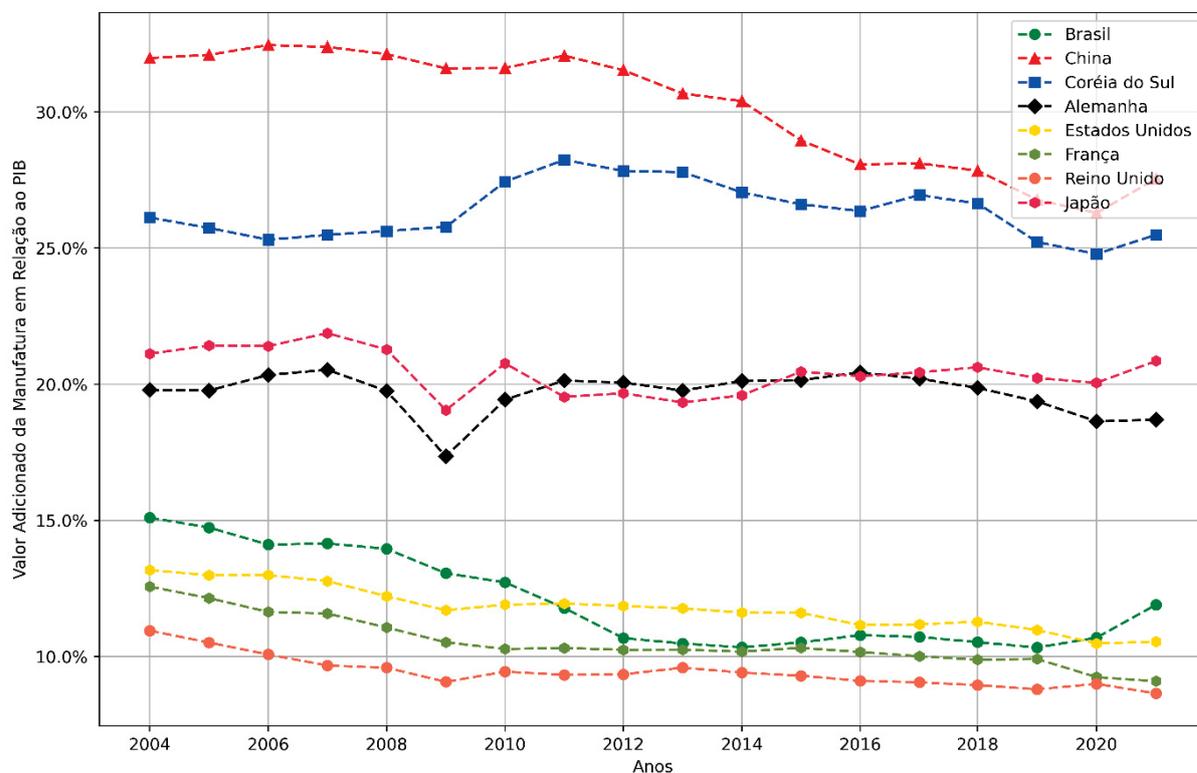
desempenho inovativo, mas reforça a necessidade de construção de um ambiente que permita a aplicação dessas soluções nas cadeias produtivas e no mercado.

#### 4.2 INFRAESTRUTURA INDUSTRIAL COMO APOIO PARA A ELABORAÇÃO DE UMA POLÍTICA VOLTADA À I4.0.

Este capítulo destacou anteriormente que, apesar das políticas de I4.0 não se limitarem aos países mais desenvolvidos, aqueles menos desenvolvidos precisam compatibilizar as estratégias com os recursos disponíveis. Diante disso, busca-se observar não somente as características da indústria instalada em cada país, mas também apresentar os motivos pelos quais a revitalização da indústria tem sido almejada (Chang e Andreoni, 2021; Daudt e Willcox, 2018; Kuo et al., 2019).

O primeiro indicador abordado ilustra a participação da manufatura em relação ao PIB, que é apresentado no GRÁFICO 4. Entende-se que, durante o processo de manufatura, insumos primários e intermediários passam por uma cadeia de produção que gera valor adicionado por meio de um produto final. Ressalta-se que diferentes processos industriais podem trazer maiores ganhos do que outros, principalmente aqueles intensivos em conhecimento que se sustentam por meio de competências específicas desenvolvidas pelas trajetórias de cada país em termos de *path dependence*. Em síntese, assume-se que quanto maior for a participação deste processo na formação do PIB, maior é a dependência e a necessidade de dar continuidade às políticas que buscam revitalizar a estrutura industrial, tendo em vista as ameaças potenciais de um mercado em transformação.

GRÁFICO 4 – EVOLUÇÃO PERCENTUAL DO VALOR ADICIONADO DA MANUFATURA EM RELAÇÃO AO PIB DURANTE O PERÍODO DE 2004 A 2021.



FONTE: WDI (2024)

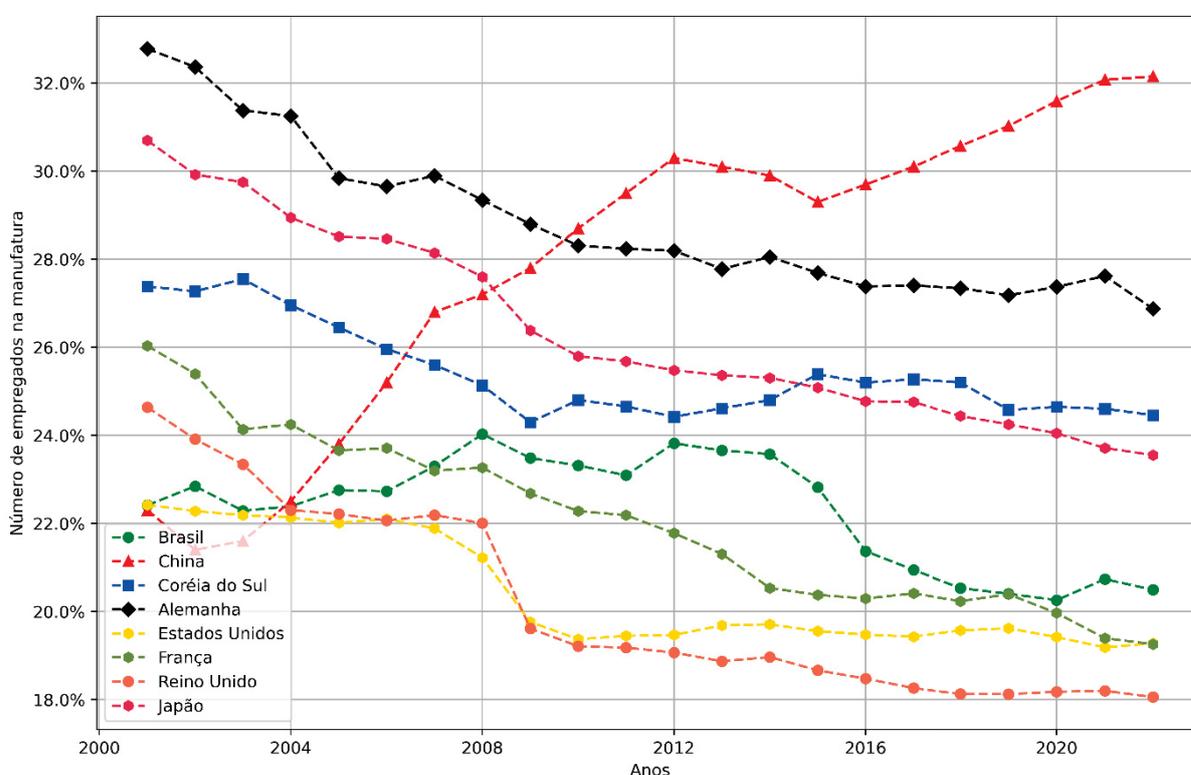
Elaborado pelo autor.

O que se observa para os oito países é um decréscimo da participação da manufatura na formação do PIB, o que pode ser resultado de diferentes motivos, mas encarados de forma crucial pelas políticas americana e francesa. Em primeiro lugar, entende-se que o desenvolvimento recente pode fazer a indústria perder espaço para o setor de serviços, embora se encontre certa relutância na literatura (Chang, 1996). Na sequência, a digitalização dos processos produtivos pode desintensificar a mão de obra sobre a produção. No caso de países tradicionalmente caracterizados como polo de mão de obra barata, o desenvolvimento econômico recente, que pode ter sido fruto da inserção de diferentes multinacionais nos respectivos países, encarece os trabalhadores e penaliza a sustentabilidade destas políticas (Kuo, 2019, Rodrigues et al., 2021). Assim, as atividades industriais que permanecem sendo intensivas em mão de obra acabam transacionando para outros países em busca de um mercado de trabalho mais barato. Nessa linha, o caso chinês é avaliado como sendo um dos países que acaba perdendo espaço diante de um enfraquecimento de vantagens

competitivas tradicionais, como o baixo custo de fatores de produção (Li, 2017; Li e Pogodin, 2019).

Um indicador complementar ao exposto acima, abordado no GRÁFICO 5, diz respeito à oferta de emprego na manufatura entre os países selecionados. Destaca-se, a fins de desenvolvimento socioeconômico, que os níveis de produtividade crescentes permitem que as empresas ofereçam maiores salários aos trabalhadores, sendo um dos pilares por trás das iniciativas de retomada da industrialização por meio da I4.0.

GRÁFICO 5 – EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DE TRABALHADORES NA MANUFATURA ENTRE O PERÍODO DE 2001 E 2022.



FONTE: WDI (2024)

Elaborado pelo autor.

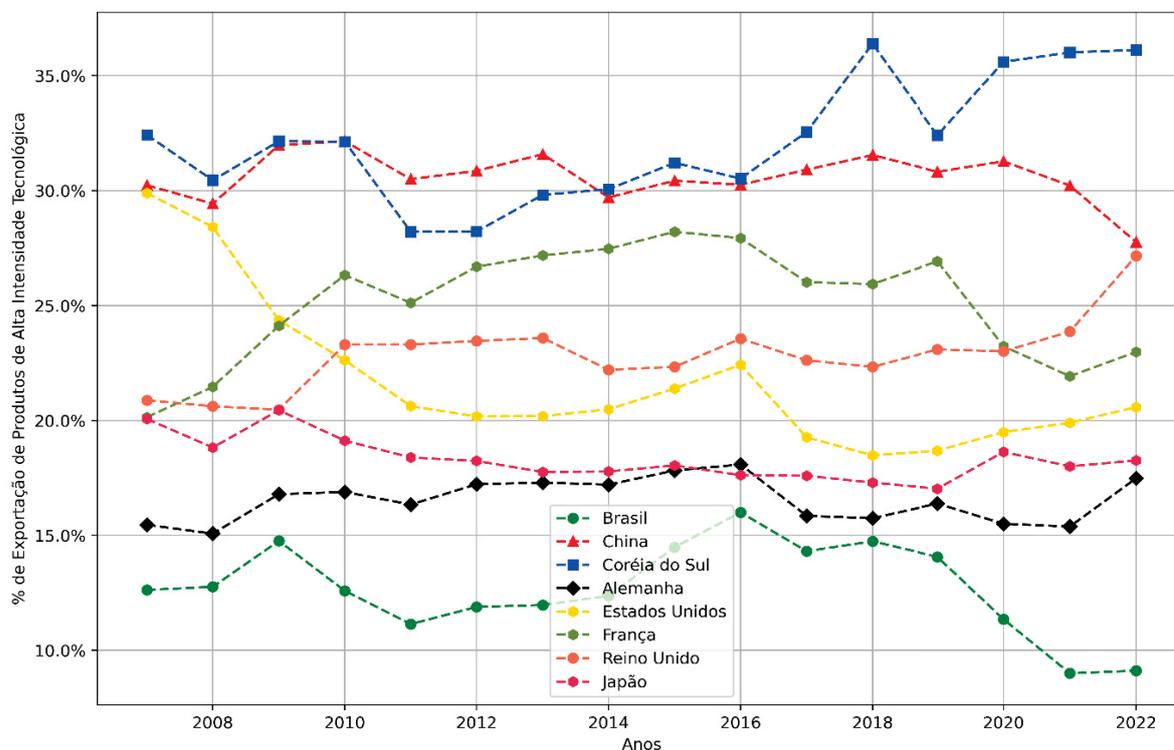
Em análise paralela ao valor adicionado pela manufatura, o decréscimo no número de empregados acaba sendo condizente com as inferências apresentadas anteriormente. Um comportamento distinto, ao menos durante a primeira década e início da segunda, é o crescimento expressivo do número de empregos na China, o que pode estar relacionado à intensificação da globalização, à modularização da

produção e aos eventos de *outsourcing* das empresas, que estabelecem fábricas em países com mão de obra barata. Contudo, à luz do desenvolvimento chinês recente, o mesmo evento de emigração da produção tem ocorrido de forma a procurar novas oportunidades em países com mão de obra mais acessível.

Em uma análise individualizada do Brasil, destaca-se que o crescimento no número de trabalhadores entre os anos de 2003 ao ápice em 2008 se compatibiliza com a evolução do PIB per capita apresentado no GRÁFICO 1, permitindo uma argumentação favorável à ideia de que a manufatura contribui com o desenvolvimento econômico. Entretanto, os dados mais recentes aproximam a oferta de trabalho nacional a níveis em que apenas um de cada cinco trabalhadores está inserido na manufatura, o que, mais uma vez, agrava os resultados recentes de baixo desempenho econômico. Dentro dos aspectos de refortalecer as posições de trabalho na manufatura, o governo americano tem intensificado políticas que visam enaltecer as carreiras dentro das fábricas (PCAST, 2011). Ademais, a queda na taxa de emprego geral também é observada como um dos problemas estruturais que fomentam a elaboração de políticas na Coreia do Sul (Chung e Chung 2021; Kim e Choi, 2019).

Buscando finalizar as análises referente ao quadro industrial dos países, o último indicador abordado no GRÁFICO 6 faz menção ao foco da indústria de cada país em termos da intensidade tecnológica sobre o total exportado pela manufatura. Os resultados apresentados não buscam defender que países melhores posicionados possuem uma estrutura industrial com maior nível de intensidade tecnológica, mas permite a inferência de que estes países estariam mais concentrados nestas atividades, habilitando uma possível introdução de conceitos de I4.0 para uma maior faixa da indústria nacional.

GRÁFICO 6 – EXPORTAÇÃO DE ITENS DE ALTA INTENSIDADE TECNOLÓGICA<sup>16</sup> EM RELAÇÃO AO TOTAL EXPORTADO DOS PAÍSES DURANTE O PERÍODO DE 2009 A 2022.



FONTE: WDI (2024)

Elaborado pelo autor.

Os dados acima se compatibilizam com os resultados expostos no GRÁFICO 4, referente ao valor adicionado da manufatura em relação ao PIB, sendo fiéis aos desempenhos da China e Coreia do Sul, reforçando o foco destes países em fortalecer a indústria nacional por meio de esforços crescentes em P&D. Espera-se que as políticas de introdução do conceito de I4.0 sejam capazes de transformar o ambiente de produção a fim de aumentar a inteligência nos processos, que por sua vez aumenta o valor adicionado nos produtos e beneficia a competitividade em mercados internacionais. Em paralelo, com relação ao forte declínio americano, reforça-se o objetivo central da política de recuperar a indústria por meio da AMP (PCAST, 2011).

No caso brasileiro, o desempenho abaixo dos demais é compatível com as questões previamente discutidas, que identificam um baixo crescimento econômico, baixos níveis de investimento em P&D, baixo número de postos de trabalho na

<sup>16</sup> A determinação dos segmentos de alta intensidade tecnológica segue a classificação da OCDE para produtos com alta intensidade em P&D, como nos setores aeroespacial, de computação, farmacêutico, de instrumentos científicos e de maquinário elétrico.

manufatura e participação desta sobre o PIB. Ressalta-se, novamente, que estes desempenhos podem ser encarados como oportunidades referentes a lacunas que são passíveis de preenchimento, a fim de sustentar a elaboração e implementação de uma política voltada à I4.0.

Em resumo, esta seção se volta para a apresentação do ambiente de oferta industrial instalado nos diferentes países analisados. A partir de uma ótica de valor adicionado pela manufatura, o objetivo central da I4.0 é o de estabelecer um processo inteligente de produção capaz de transformar insumos básicos em produtos diferenciados que auxiliem na inserção dos países em cenários competitivos internacionais. Dessa forma, observa-se um contraste entre essas questões para a China e Coréia do Sul e um decréscimo por parte dos Estados Unidos, o que acaba sendo corrigido pela política que vem sendo implementada pelo país.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.

O objetivo deste capítulo foi apresentar um quadro geral relacionado ao ambiente econômico, industrial e inovativo de países que têm tomado a vanguarda na implementação de políticas vinculadas ao conceito de I4.0. As discussões propostas sustentam a pluralidade do conceito, tendo em vista que países com diferentes trajetórias de desenvolvimento se apoiam sobre esta janela de oportunidade a fim de atingir objetivos distintos, como a manutenção e retomada da posição de liderança na manufatura, o protagonismo em tecnologias emergentes, a inserção da população nas estratégias de desenvolvimento, a inserção do país na fronteira tecnológica e produtiva e, por fim, a institucionalização de um plano de desenvolvimento nacional.

Segundo esse objetivo, a primeira questão abordada esteve relacionada ao nível de desenvolvimento econômico e aos esforços relacionados à atividade de inovação. Em relação ao primeiro indicador, nota-se que a I4.0 emerge em um momento oportuno, tendo em vista a instabilidade nos desempenhos de desenvolvimento econômico alcançados nos últimos anos. Sendo assim, esforços conjuntos de atores nacionais podem ser motivados a fim de retomar níveis de desempenho alcançados durante o início do século XXI. Em seguida, a diferenciação sobre o tratamento dado à inovação é evidenciada, apoiando-se na inexistência de uma “receita de bolo”, a fim de lograr sucesso nessas atividades. Ou seja, o que se

evidencia é que os países podem construir estratégias que se compatibilizem com os recursos disponíveis em território nacional.

Buscando elucidar a segunda questão relacionada ao ambiente de manufatura, que se coloca como o principal objeto passível de ser afetado pela implementação da I4.0, o cenário observado é de decréscimo da participação deste setor nos países. Dessa forma, as políticas industriais implementadas podem buscar restabelecer um nível de participação que beneficie o restante da sociedade, tendo em vista as características do setor de promover ligações à jusante e montante sobre a estrutura produtiva, intensidade de inovações, produtividade crescente, promoção de empregos com maiores salários e etc.

Em síntese, a importância das tecnologias associadas ao conceito de I4.0 é ressaltada neste capítulo na medida em que, diante de um grupo de países com estágios de desenvolvimento e recursos distintos, observa-se que a inserção destas ideias tem sido priorizada por cada um deles. A característica pervasiva, elemento idiossincrático do setor de TICS, permite que essas tecnologias sejam utilizadas a fim alcançar metas e objetivos exclusivos de cada país, que possuem motivações e problemas estruturais enraizados na história de cada desenvolvimento socioeconômico. Cada nação estabelece um plano de ação que busca otimizar a utilização de recursos nacionais a fim de estabelecer uma rede colaborativa baseada em conceitos sistêmicos de inovação, para que se possa enfrentar essas barreiras e tirar proveito das oportunidades que emergem. Assim, o próximo capítulo estabelece o setor de petróleo e gás brasileiro como objeto passível de políticas de I4.0 a fim de reforçar as competências inovativas em um ambiente crítico para a independência, competitividade e desenvolvimento nacional.

## 5 14.0 APLICADA AO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS: SUPERAÇÃO DOS DESAFIOS CORRENTES POR MEIO DA DIGITALIZAÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar como os conceitos de I4.0 podem ser aplicados ao setor de petróleo e gás (P&G), especialmente pela Petrobras, a fim de superar os desafios emergentes no setor e posicionar a firma na vanguarda das soluções tecnológicas. Serão estabelecidos questionamentos específicos que norteiam as discussões propostas: Como o estágio atual do setor motiva a adoção de práticas de digitalização? Como as tecnologias de I4.0 contribuem com a competitividade das empresas do setor? Como a Petrobras pode ser inserida nesse contexto a fim de sustentar uma política voltada à adoção e desenvolvimento de I4.0?

Esses questionamentos são justificados diante de um cenário recente de volatilidade no preço do petróleo, incertezas geopolíticas, pressão para transição energética e contestação do papel estratégico dessas empresas, onde essas tecnologias se tornam capazes de impulsionar um período de transformação digital. Mediante a digitalização de inúmeros processos, as empresas se beneficiam diretamente da redução de custos e aumento da eficiência produtiva, além da possibilidade de difundir essas tecnologias para todo o sistema nas quais as empresas estão inseridas, o que está alinhado com as expectativas desta tese de avaliar a capacidade da firma de petróleo em impulsionar essa evolução na indústria nacional.

Partindo deste contexto, a primeira seção apresenta uma discussão relacionada ao ambiente atual onde as empresas de P&G operam. Deste modo, se nota a volatilidade no preço do petróleo estabelecido desde a metade da década passada, resultando em uma sensibilização durante a tomada de decisão por parte das empresas que começam a balancear as ações de investimento e planejamento estratégico. Em paralelo, também são apresentadas discussões embrionárias a respeito da necessidade de digitalizar o setor, tendo em vista os inúmeros benefícios vinculados à redução das incertezas operacionais, manutenção dos ativos e coordenação de um processo logístico inteligente.

A segunda seção apresenta uma revisão da literatura a respeito das principais oportunidades, aplicações e estudos de caso que vinculam as tecnologias de I4.0 com os processos dentro do setor de P&G. Esta seção se torna crítica diante do reconhecimento da transversalidade atingida pelas novas soluções tecnológicas que

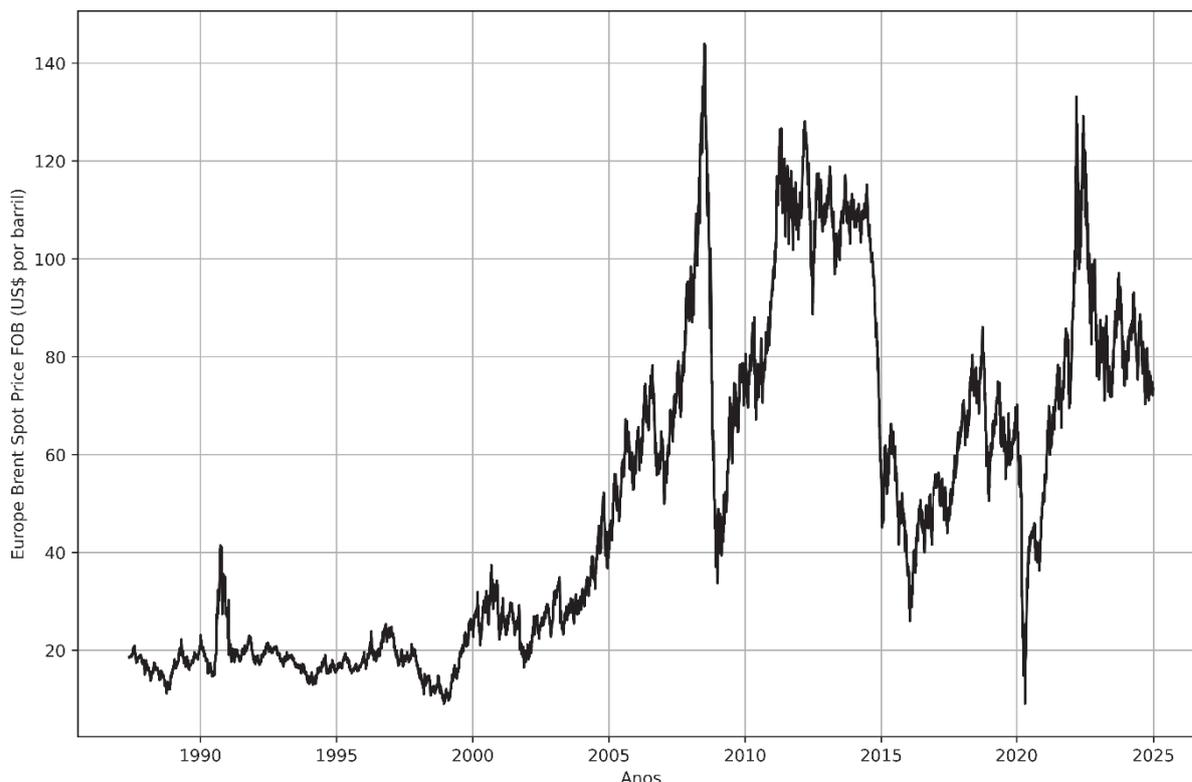
são capazes de atingir todos os estágios no setor, como exploração, desenvolvimento, produção, logística e afins.

Na sequência, a última seção se concentra no contexto brasileiro ao reconhecer a importância estratégica que a Petrobras assume no país diante do papel histórico de contribuir com o desenvolvimento socioeconômico nacional. Em primeiro lugar, a seção apresenta elementos que motivaram o surgimento da empresa e os desafios atuais que precisam ser superados, principalmente no que diz respeito a recuperar a confiança da sociedade acerca do respectivo papel de promotora do desenvolvimento. Ademais, aspectos relacionados ao planejamento estratégico de digitalização da empresa são introduzidos, destacando que essa transformação pode gerar frutos diretos e indiretos sobre toda a estrutura produtiva nacional. Por fim, um projeto piloto de digitalização da empresa é introduzido, apontando para os principais desafios identificados.

## 5.1 NECESSIDADE DE DIGITALIZAÇÃO FRENTE A INCERTEZAS MERCADOLÓGICAS

Dentro dos últimos 10 anos, a indústria de P&G tem enfrentado desafios relacionados à tomada de decisão estratégica durante períodos de volatilidade constante no preço do barril de petróleo, conforme exposto no GRÁFICO 7, embora o ano de 2024 tenha se sobressaído como um dos mais estáveis nos últimos 25 anos. Dessa forma, as estratégias empresariais acabam balanceando questões relacionadas aos investimentos em custo de capital, à manutenção do retorno aos acionistas e a atender as pressões constantes de viabilizar um processo de transição energética (Deloitte, 2022, 2024).

GRÁFICO 7 - PREÇO EM DÓLARES DO BARRIL DE PETRÓLEO ENTRE OS ANOS DE 1987 ATÉ 2024.



FONTE: Thomson Reuters (2024)

Elaborado pelo autor.

O relatório elaborado pela Deloitte (2024) destaca três pontos estratégicos que devem ser priorizados pelas empresas do setor durante o ano de 2025. Em primeiro lugar, há uma centralidade imposta à disciplina de capital, considerando que as empresas devem realizar investimentos certos diante de um ambiente marcado por incertezas macroeconômicas, geopolíticas e regulatórias. O relatório também destaca a iniciativa de dar centralidade ao consumidor dentro das cadeias de valor e, para isso, acaba recorrendo a inúmeras iniciativas de tecnologias digitais, que se tornam o terceiro elemento crítico para as empresas.

No que tange às tecnologias digitais, o relatório destaca os benefícios associados a inovações que reduzem custos e alavancam capacidades digitais para entregar produtos com altas margens e com baixa emissão de carbono para os clientes. Dentro desse ambiente, há o destaque para algumas empresas tradicionais do setor, como Schlumberger e Baker Hughes, que colaboram a fim de se tornarem empresas energéticas tecnológicas, vendendo soluções para as demais do setor.

Nesta linha, o Brasil tem destaque no que se refere à liderança em adoção de fontes de energias renováveis.

Diante do exposto acerca dos desafios identificados para o setor, o World Economic Forum (2017) propõe uma iniciativa de transformação digital que é justificada por esses desafios, somando-se a eles a escassez de profissionais qualificados. Destaca-se que, apesar de métodos operacionais rígidos, a utilização dessas tecnologias digitais pelo setor teve início em meados da década de 80, quando o objetivo era de aprimorar o entendimento acerca dos recursos presentes nos reservatórios, dos potenciais de produção, do aumento na eficiência produtiva e da melhoria nos aspectos vinculados à saúde e segurança dos trabalhadores, o que continua sendo um elemento crítico na operação sustentável das mais diversas empresas atuantes no segmento.

Partindo desse contexto introdutório, a iniciativa enumera quatro temas centrais acerca da transformação digital planejada para essa década: gerenciamento digital do ciclo de vida dos ativos, ecossistema circular e colaborativo, modelos de negócio com engajamento dos consumidores e fortalecimento da transição energética, o que continua aplicável aos desafios e tendências identificados pelo relatório da Deloitte (2024). Nota-se que há uma procura de transformar a estrutura organizacional a fim de dar prioridade às estruturas fluídas, nas quais há constante comunicação com fornecedores e consumidores, além de dar destaque aos métodos inteligentes de monitoramento dos ativos e produtos. Entretanto, tais elementos enfrentam desafios que precisam ser superados por meio de políticas públicas e empresariais a fim de possibilitar essa transformação, como a atualização do ambiente regulatório, a padronização dos equipamentos e estruturas de produção, o estabelecimento de um sistema de colaboração entre os atuantes no setor e a inexistência de profissionais qualificados para atuar nesse novo ambiente digital (WEF, 2017).

Apesar dessas iniciativas digitais em meados da década de 80, há um reconhecimento de que existe um distanciamento crescente entre as ações de inovação no setor de P&G com os demais, o que se acentuou ainda mais durante o período da pandemia, onde a baixa demanda por petróleo reduziu as receitas das empresas do setor (Matkovskaya et al., 2021). Contudo, esses momentos de crise serviram para a autoavaliação e percepção de que se torna necessária uma política voltada à diversificação da carteira de ativos. Dessa forma, havendo a busca por

atender a demanda crescente por fontes renováveis de energia, Devold e Moen (2019) destacam que as tecnologias digitais estão sendo utilizadas no planejamento, construção e operação de ativos, viabilizando a conexão e maximização de valor pela produção.

Por fim, a escassez de profissionais qualificados com novas habilidades vinculadas ao ambiente digital acaba sendo endereçada por Georgiou et al. (2021). Os autores identificam que a transformação digital no setor está ocorrendo a passos lentos devido às limitações relacionadas ao capital humano. Destaca-se que há uma procura crescente por profissionais com competências vinculadas às atividades de análise de dados, tendo em vista toda a estrutura promovida pela I4.0 que se apoia em uma infraestrutura de informações que precisam ser analisadas em tempo real.

Em síntese, o ambiente atual do setor se estabelece diante de um período de incertezas vinculadas às decisões estratégicas com foco na disciplina de capital, no aumento da centralidade do consumidor e no investimento em novas tecnologias. Logo, as tecnologias que sustentam a emergência do conceito de I4.0 permitem que se estabeleçam novas práticas produtivas que venham a alavancar os níveis de eficiência e viabilizar uma transição energética menos turbulenta, partindo da premissa de que as barreiras sejam superadas por meio de políticas públicas e empresariais, como com a definição de um novo ambiente regulatório, a globalização de padrões tecnológicos, o fomento de um sistema de inovação, e reforma da arquitetura de dados das empresas, entre outros elementos. Assim, surge uma oportunidade para a Petrobras se situar como uma das principais ofertantes de soluções tecnológicas para essa estrutura, apoiando-se na competitividade já estabelecida pela empresa e também no protagonismo assumido na adoção de energias renováveis.

## 5.2 TRANSFORMAÇÃO DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS PELAS TECNOLOGIAS DE I4.0.

Esta seção pretende apontar como a literatura tem abordado o ambiente de I4.0 dentro do setor de P&G, com enfoque nas oportunidades, aplicações e estudos de caso. Destaca-se que muitas das discussões permanecem em um campo de ideias e projeções, tendo em vista a escassez de políticas formais de digitalização para o

setor. Entretanto, muitas das discussões corroboram para o entendimento de quais fatores precisam ser discutidos a fim de que as iniciativas estejam apoiadas por recursos fundamentais e permitam reais ganhos de eficiência e produtividade no ambiente de produção. Além disso, o debate acerca da inserção e desenvolvimento dessas tecnologias reforça a existência de intensidade tecnológica e de conhecimento presente nas atividades do setor.

### 5.2.1 SUBDIVISÕES ATRELADAS ÀS ATIVIDADES DE PETRÓLEO E GÁS.

As atividades dentro do setor de P&G podem ser subdivididas em três etapas centrais, as quais facilitam o entendimento das oportunidades e benefícios atrelados à aplicação das tecnologias e conceitos de I4.0: *upstream*, *midstream* e *downstream*.

A divisão de *upstream* engloba todos os estágios vinculados às atividades de exploração, desenvolvimento e produção de P&G. No estágio inicial, as empresas adquirem dados sísmicos a fim de processar informações e inferir a respeito dos potenciais de extração de hidrocarbonetos em determinadas reservas e poços. A quantidade de informações extraída e processada é elevada, sendo crucial para a tomada de decisão final de investimento que permite a evolução para o próximo estágio. Na fase de desenvolvimento é construída toda a infraestrutura necessária para viabilizar a extração *onshore* ou *offshore*, demandando elevados aportes financeiros para adquirir e instalar os ativos necessários. Por fim, o estágio de produção é atingido quando o *first oil & gas* é produzido, demandando monitoramento e gerenciamento constante dos ativos com o propósito de evitar possíveis pausas não planejadas, o que acarreta prejuízos elevados para a operação.

Na sequência das atividades pertencentes à divisão de *upstream* são estabelecidas as etapas de processamento, armazenamento e transporte de P&G durante a divisão de *midstream*. Aqui, não somente as informações a respeito dos ativos e equipamentos empregados são críticas, mas toda a logística que envolve o processo. Conforme destacado no segmento de produção, interrupções inesperadas acabam sendo financeiramente danosas para o setor e, com isso, torna-se crucial estabelecer uma cadeia logística que maximize a extração de valor com segurança e eficiência.

Por fim, todo o P&G produzido é transportado para estações de refino, que configuram a divisão de *downstream*. Nesse estágio, torna-se crítico o constante monitoramento dos equipamentos, segurança das operações e identificação do grau de pureza dos combustíveis e produtos, a fim de que atenda a demanda dos consumidores e normas estabelecidas. Sendo assim, nota-se que toda a estrutura e operação do setor acabam configurando inúmeros processos e atividades que se beneficiam de ambientes conectados, que facilitam as tarefas de gerar e processar informações. Na sequência, a literatura destaca algumas oportunidades e aplicações que exemplificam como as tecnologias emergentes podem ser utilizadas a fim de contribuir com os processos estabelecidos.

#### 5.2.2 OPORTUNIDADES E BENEFÍCIOS ASSOCIADOS ÀS TECNOLOGIAS DIGITAIS NO SETOR DE P&G.

O trabalho de Lu et al. (2019) realiza um levantamento da literatura a respeito das inúmeras aplicações tecnológicas para o setor, enunciando essa transformação como uma fase de P&G 4.0. Os autores expõem as contribuições para cada um dos segmentos supramencionados de *upstream*, *midstream* e *downstream*, destacando uma movimentação para uma fase de inteligência dentro do setor. Com respeito às oportunidades e possíveis aplicações, contrastando com os desafios apresentados na primeira seção, concluem que os principais benefícios estão associados a ganhos de eficiência produtiva e retração dos custos. Em relação às estratégias de implementação, inicialmente são apresentadas recomendações para a etapa de preparação, defendendo apoio governamental para difusão do conhecimento, formação de profissionais qualificados, criação de uma infraestrutura integrada de dados e cooperação interempresarial. No caso da etapa de operação, defende-se a padronização tecnológica, a atenção às interações tecnológicas, a construção de redes, a coleção de dados e a quebra de monopólio no licenciamento de *softwares*.

Elijah et al. (2021) destacam aplicações tecnológicas em cada etapa dentro da divisão de *upstream*, tendo em vista os principais desafios relacionados à volatilidade de preço, alto custo de operação, competitividade, questões ambientais, tomada de decisão imediata e complexidade na perfuração e produção. Com base na análise de 223 documentos, os autores destacam a importância da inteligência

artificial nas tarefas de estimação e previsão e, em contrapartida, a necessidade de estudos adicionais a respeito dos benefícios associados à manufatura aditiva e realidade aumentada. Por fim, concluem que a maioria dos trabalhos estão em estágios conceituais e laboratoriais, o que é condizente com o cenário onde ainda se estimula a aplicação dessas tecnologias no setor. Ainda na divisão de *upstream*, Gooneratne et al. (2020) contribuem com aplicações tecnológicas dentro do processo de perfuração dos poços de P&G, destacando aplicações de dados e a comunicação com técnicos e especialistas.

Uma revisão sistemática acerca da transformação digital no setor de energia também é realizada por Maroufkhani et al. (2022), onde é apresentado o enfoque tecnológico nos segmentos de *big data*, mineração e visualização de dados, *machine learning* e inteligência artificial. Essas aplicações acabam contribuindo com a melhoria de processos, redução de custos operacionais, segurança e meio ambiente, redução de custos com capital e aumento na produção. Novamente, os autores destacam que a divisão de *upstream* acaba sendo priorizada, o que vai ao encontro do fluxo de informações crescente vinculado à aquisição e processamento de dados sísmicos, monitoramento e gerenciamento de ativos de produção, priorização da segurança dos trabalhadores em plataformas, entre outros. Na linha das questões relacionadas ao fluxo de informações no setor, Saroha e Pal (2020) destacam que este processo já tem sido otimizado, embora com fragilidades ainda nas etapas de análise e interpretação de dados. No mesmo sentido, Bailie e Chinn (2018) destacam a inteligência artificial como sendo a tendência do futuro para que se contribua com a eficiência produtiva, tomada de decisão e redução de custos no setor.

Na linha de aplicações tecnológicas específicas para o setor, Wanasinghe et al. (2020) enfatizam os benefícios atrelados à utilização de tecnologias de internet das coisas, enumerando potenciais aplicações e desafios, com base em uma revisão de 66 artigos. Dentro das principais utilizações há o destaque para monitoramento remoto dos ativos, manutenção preventiva, automação e controle, segurança e saúde dos trabalhadores, colaborações e gêmeos digitais, cadeia de oferta e gerenciamento de frota. Nesse sentido, são apontados como desafios: a prontidão tecnológica, a interoperabilidade, o armazenamento e análise de dados, a manutenção, a seleção de ferramentas e a cibersegurança.

Tendo em vista o fluxo crescente de dados e a sensibilidade inerente ao setor de P&G, os aspectos relacionados à cibersegurança são observados por Progoulakis

et al. (2021) diante da identificação de duas principais óticas de combate às ameaças cibernéticas: humana e empresarial. Em primeiro lugar, a dimensão humana acaba sendo chave no processo de prevenção nas questões de vazamento das informações adquiridas ou contaminação por programas maliciosos. De um ponto de vista empresarial, os autores destacam o processo de treinamento dos funcionários e o estabelecimento de barreiras na rede interna como mecanismos preventivos.

Dentro do mesmo cenário de informações crescentes, a tecnologia de *big data* é analisada por Gurianov et al. (2020) dentro dos projetos de desenvolvimento de campos, destacando o aumento no volume de informações a respeito do processo de perfuração, fraturas hidráulicas, modelos geológicos e hidrodinâmicos. Os autores expõem alguns casos que têm sido implementados por diferentes empresas no setor, como BP, Chevron, Shell e Gazpromneft. Destaca-se que, por meio de marcadores nos campos, permite-se a aplicação de tecnologias de *machine learning* na obtenção de dados, no registro das operações e na transferência automática para os bancos de dados, viabilizando a construção de ambientes inteligentes e autônomos relacionados à aplicação destas tecnologias no setor.

Outro levantamento da literatura é realizado por Dhamija (2022), quando o autor realiza uma análise bibliométrica baseada em 19.101 documentos a respeito da aplicação do conceito de I4.0 em diversos setores na África do Sul, com P&G incluído no tema. É destacada a visualização de cinco *clusters* vinculados ao conceito: tecnologias de informação e tomada de decisão; IoT e padrões inovativos; manufatura e segurança; tecnologia da informação e segurança; cadeia de oferta e previsão tecnológica.

Por fim, algumas contribuições são realizadas diante de um cenário de benefício direto à segurança e desenvolvimento dos trabalhadores. Wanasinghe et al. (2021) destacam a aplicação de tecnologias emergentes na construção de um arcabouço que conecta os domínios humano, físico e cibernético. A aplicação de tecnologias voltadas à aquisição, interpretação e comunicação de dados viabiliza a emergência de benefícios atrelados à saúde e segurança, colaboração e visualização de dados, construção de uma plataforma de treinamento imersiva, tomada de decisão baseada em dados e inspeções seguras. A respeito desse último ponto, Ukaegbu et al. (2021) destacam as aplicações sustentadas pela robótica e drones nos processos de inspeção, segurança e monitoramento.

Em síntese, nota-se a presença de inúmeros artigos que realizam revisões da literatura que buscam identificar oportunidades de aplicação das tecnologias da I4.0 no setor de P&G, com a ressalva de que muitos casos ainda se encontram em uma fase conceitual e laboratorial. Em relação às motivações, parece existir um consenso de que os ganhos relacionados à redução de custos e eficiência produtiva se sobressaem aos demais, tendo em vista que um monitoramento preventivo de ativos permite que se evite interrupções inesperadas das atividades de produção. Além disso, diante de um cenário arriscado que envolve os estágios de exploração, a aquisição e interpretação de dados por tecnologias de IoT, *big data*, *machine learning* e inteligência artificial contribuem com a construção de modelos sísmicos que podem levar à tomada de decisão mais assertiva. No campo da segurança das informações, aspectos relacionados à cibersegurança são destacados, tendo em vista que o setor se coloca em uma posição sensível diante de movimentos extremistas vinculados à transição energética. Por fim, outro aspecto crítico do setor é a segurança dos trabalhadores que atuam em ambientes com alto índice de periculosidade, que podem ser frequentemente monitorados a fim de evitar riscos e garantir o bem-estar de cada funcionário.

### 5.2.3 MODELOS E APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS NO SETOR DE P&G.

Enquanto a subseção anterior se concentrou nas contribuições teóricas que idealizam oportunidades tecnológicas no setor em termos transversais, essa seção busca expor modelos e casos empíricos a serem aplicados em recortes de processos específicos dentro do setor de P&G. Nessa linha, Nordal e El-Thalji (2021a) realizam um trabalho focado no sistema de compressão de hidrocarbonetos, o qual viabiliza a transferência entre diferentes localizações. A contribuição dos autores se estabelece diante de uma comparação entre os métodos tradicionais de manutenção com modelagens baseadas na aplicação dos conceitos de I4.0.

Em primeiro lugar, os autores identificam diferentes questões que precisam ser implementadas e adaptadas a fim de viabilizar essas transformações. Dentro de uma dimensão de aplicações tecnológicas, existe a necessidade de introduzir produtos que atuem de modo a expandir as coberturas perceptivas por meio de sensores inteligentes, capacidades computacionais para permitir o processamento

dos dados adquiridos e cognitivas a fim de gerar informações para a tomada de decisão. Na sequência, os autores destacam que as dimensões comunicativas nas esferas ativo-ativo, empresa-empresa e ativo-empresa precisam ser estabelecidas.

Ainda no mesmo processo, Nordal e El-Thalji (2021b) constroem um modelo de simulação baseado em diferentes métodos, que permite estimar os benefícios de sobrevivência destes ativos de compressão baseados em manutenções inteligentes. Sendo assim, os resultados apontam para a habilidade de realizar diferentes tipos de manutenção, como preventiva, corretiva, preditiva e oportunística. Por fim, os autores também contribuem para estabelecer um modelo de aplicação da manutenção preventiva, que se beneficia do emprego de tecnologias associadas à I4.0. Nessa linha, o processo acaba seguindo um fluxo que se inicia na identificação dos limites do sistema, determinação dos componentes críticos e modos de falha, dos sintomas de falha, dos sensores e cobertura, das técnicas de detecção, diagnóstico e prognóstico (Nordal e El-Thalji, 2021c).

Um outro processo avaliado na literatura é proposto por Barateiro et al. (2020) diante da premissa de que a falta de informação a respeito dos processos e produtos pode levar a pausas inesperadas na produção, incertezas, incompatibilidade com níveis de pureza estabelecidos por regulações e locomoções desnecessárias. Com isso, os autores analisaram os métodos tradicionais dos sistemas de medição de hidrocarbonetos líquidos e gasosos e propõem mudanças para uma nova arquitetura baseada nos conceitos de I4.0. Desta forma, eles destacam a construção de uma modelagem baseada em conceitos colaborativos e adição de servidores de metrologia que impactam a validação de dados, gerenciamento de ativos em tempo real, calibração automática, introdução de dispositivos móveis, entre outros. Por fim, conclui-se que apesar das soluções tecnológicas estarem disponíveis e proporcionarem ganhos expressivos, a indústria apresenta uma escassez de profissionais qualificados que precisam ser introduzidos ao universo da análise de dados.

Rane e Narvel (2019) destacam a aplicação das tecnologias relacionadas à IoT e *blockchain* dentro das bombas utilizadas para movimentar o petróleo dentro dos gasodutos. Os autores destacam que durante o período de 2017 houve 295 pedidos de assistência técnica para 437 bombas instaladas, o que reforça a necessidade de estabelecer um processo de gerenciamento e manutenção automática, capturando dados em tempo real e permitindo a tomada de decisão imediata a fim de viabilizar a

continuidade da operação. Os autores antecipam que os benefícios associados à utilização destas tecnologias poderiam estar vinculados a uma redução de 15% de problemas nos ativos, um aumento do tempo de vida desses equipamentos em 10%, um aumento do retorno em 20% e uma melhoria na agilidade e tomada de ações preventivas.

As tecnologias que envolvem o ambiente de *blockchain* também são avaliadas dentro dos processos de negociação entre empresas do setor com proprietários de terra. Mehta et al. (2021) partem da premissa de que essas negociações encontram dificuldades nas etapas de estabelecer um valor que ambas as partes concordem sobre os bônus iniciais (vinculado ao processo de ter acesso à terra) e o pagamento de *royalties* (atrelado à quantidade de hidrocarbonetos extraídos). Dessa forma, os autores consideram a ideia de introduzir contratos inteligentes, baseados na tecnologia de *blockchain*, que é estabelecido diante de três seções críticas: os dados dos proprietários da terra, os dados das empresas de P&G e uma corrente que armazena as transações executadas. Sendo assim, seria estabelecido um acordo automático entre as demandas e ofertas dos autores envolvidos, o que aceleraria o processo de negociação.

No âmbito dos estudos de caso, Alexandrova e Prudsky (2019) estabelecem um modelo de transformação digital para o setor na Rússia, partindo de seis blocos: definição de prioridades, indicadores de meta, direcionamento, avaliação dos efeitos possíveis, dos riscos possíveis e mecanismos de implementação. O modelo acabou sendo testado pela Lukoil, mediante a digitalização nas esferas de proteção ambiental e segurança no trabalho. Os resultados obtidos foram atrelados à redução de custos operacionais e consumo energético, com incremento na complexidade dos processos, o que intensificou a participação dos trabalhadores. Ainda a respeito da digitalização do setor russo, Razmanova e Andrukova (2020) destacam que ainda não é possível identificar uma maturidade das empresas em termos digitais, tendo em vista que esse processo para a economia doméstica ainda se encontra em estágios iniciais. Entretanto, Shigaev (2021) aponta para os esforços que empresas líderes estão realizando a fim de se vincular a parceiros estratégicos, enfatizando o papel que a Rosneft tem exercido em uma liderança de implementação de tecnologias digitais.

As tecnologias de realidade aumentada também são discutidas pela literatura, tendo em vista a contribuição direta com as etapas de manutenção de equipamentos e o próprio treinamento da mão de obra sem a necessidade de locomoção até o

ambiente físico onde o respectivo aparelho se encontra. Essas questões acabam sendo críticas para o setor, já que muitas vezes o treinamento necessário demandaria que novos funcionários fossem até as plataformas, que são, por sua vez, locais com altos índices de periculosidade. Bruno et al. (2019) destacam a utilização destas tecnologias para realizar manutenções e variações na configuração destes equipamentos, viabilizando novas janelas de oportunidade para inovações de produto e processo.

Dentro dos conceitos atrelados à I4.0, muito se fala a respeito de fábricas e indústrias inteligentes, quando são introduzidos diferentes ativos com capacidades analíticas e operacionais autônomas. Dessa forma, essas tecnologias também podem ser integradas ao setor de P&G diante da emergência do conceito de campos inteligentes, que já vem sendo realizado pela Shell (De Best e Van den Berg, 2012). A empresa tem introduzido dispositivos inteligentes desde o final do século passado, atuando diretamente no controle e monitoramento de poços diante de um ciclo de aquisição de dados, interpretação, avaliação de opções e a respectiva execução. O tamanho sucesso na utilização destes dispositivos acabou se consolidando como um princípio norteador da empresa.

Esse princípio de digitalização dos processos também é absorvido pela empresa Equinor (2017), quando houve uma proposta de criação de um centro de excelência digital com sete programas específicos até 2020. A empresa buscou estabelecer um centro que iria apoiar projetos e iniciativas dentro da companhia em áreas como segurança digital, digitalização de processos, análise de subsuperfície, entrega de poços vinculados à próxima geração tecnológica, campos do futuro, operações intensivas em dados e *insights* comerciais. Tais projetos estariam vinculados às oportunidades identificadas pela empresa nas áreas de digitalização, análise avançada de dados e robótica.

Conclui-se que a literatura atrelada às tecnologias reforça a ideia de que muitas das discussões permanecem ainda no campo das ideias, embora focando em estágios específicos durante a cadeia de produção, com um número ainda limitado de eventos práticos a fim de captar os reais benefícios vinculados à introdução das tecnologias emergentes nas dinâmicas operacionais do setor. Contudo, nota-se que as contribuições exaltam como o maior volume de dados disponíveis contribuem com a diminuição de riscos associados a interrupções inesperadas das operações decorrente de falhas dos ativos. Além disso, as modelagens destacam aplicações que

não se limitam a divisões específicas do setor, mas que contribuem com melhorias nos mais variados processos, desde negociações até logística. Por fim, destaca-se que essas inovações introduzidas no setor precisam estar sustentadas por uma infraestrutura digital confiável, pois uma falha inesperada pode causar riscos para as operações e funcionários (Rydzak et al. 2006). No capítulo 7, p. 123, dois estudos de caso vinculados à Petrobras são apresentados, reforçando não somente os benefícios associados ao emprego destas tecnologias, mas toda a complexidade tecnológica que envolve as atividades de produção de P&G.

### 5.3 OPORTUNIDADES DE DESENVOLVIMENTO NACIONAL VINCULADO À DIGITALIZAÇÃO DA PETROBRAS

Esta última seção pretende destacar como a digitalização de processos vinculados à Petrobras pode desencadear inúmeras oportunidades de desenvolvimento adicionais a montante e jusante na cadeia de produção. Partindo de uma posição chave no processo de independência e desenvolvimento socioeconômico do país, a firma de P&G busca se manter competitiva, a fim de contribuir com a manutenção das ações estratégicas que são tomadas pela empresa e pelo governo. Em primeiro lugar, é introduzido o ambiente atual do setor de P&G no Brasil, e na sequência são destacados os aspectos históricos que envolvem a importância da Petrobras, seguindo-se o planejamento estratégico de digitalização corrente e o enfoque dado ao projeto de Gerenciamento Digital Integrado de Campos (GeDIg).

#### 5.3.1 PETROBRAS COMO INSTRUMENTO DA SOBERANIA NACIONAL E INDEPENDÊNCIA ESTRANGEIRA.

A história da emergência da Petrobras é marcada por um período de desconfiança na atuação de empresas estrangeiras, tendo um primeiro passo instituído pela fundação do Conselho Nacional do Petróleo (CNP) em 1938 (Surrey,

1987). Na sequência, a Lei nº 2.004<sup>17</sup> de 1953 estabeleceu um monopólio para a União sobre as atividades de pesquisa, refino<sup>18</sup> e transporte de petróleo e outros hidrocarbonetos em território nacional. Adicionalmente, a mesma lei definia a forma de atuação do país nessa frente, estabelecendo o CNP como órgão orientador e fiscalizador e a Petróleo Brasileiro S.A. como executora, reconhecida por meio da abreviatura “Petrobras”. O então monopólio acaba sendo revogado pela Lei nº 9.478<sup>19</sup> de 1997, quando há o desejo de preservar o interesse nacional e promover a livre concorrência.

Surrey (1987) destaca que, por iniciativa do CNP, a empresa começou a atuar em um programa de perfuração instalado na Bahia durante a década de 40, o que acabou sendo a principal massa de produção nacional até meados da década de 80. Contudo, a demanda nacional constantemente excedia a capacidade de oferta da Petrobras, o que gerava a necessidade de importação de petróleo estrangeiro, mas com a manutenção da autossuficiência na atividade de refino. Assim, a firma se colocava com funções estratégicas para a governança do país, o que é destacado pelo autor diante da proximidade entre a presidência e o gerenciamento da estatal, sendo esta a responsável pela formulação e implementação de políticas para o setor no Brasil, além de reforçar a promoção das iniciativas de substituição importações e industrialização em diversos setores não limitados ao petroquímico (Surrey, 1987).

No que diz respeito à independência de tecnologia estrangeira, a empresa estabeleceu seu centro de pesquisa em 1963, denominado de Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES). Este centro acaba sendo crítico dentro da estratégia de desenvolvimento da companhia e até mesmo das pesquisas em nível nacional, tendo em vista as inúmeras parcerias estabelecidas com mais de 100 universidades nos dias atuais. Destaca-se que, entre os anos de 1998 e 2017, dos R\$12,9 bilhões investidos em P&D no país pelas empresas, a Petrobras foi responsável por R\$12 bilhões, tendo o CENPES como o seu principal ator (Riceto e Da Silva, 2021).

O início do século XXI marca o período de auge da companhia, quando ocorre a descoberta de reservas petrolíferas abaixo de uma profunda camada de sal, o que

---

<sup>17</sup> O acesso à Lei 2.004/53 pode ser feito por meio do endereço [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l2004.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l2004.htm). Acesso em maio de 2023.

<sup>18</sup> Destaca-se que o monopólio no refino ocorre tanto para produção nacional quanto estrangeira.

<sup>19</sup> O acesso à Lei 9.478/97 pode ser feito por meio do endereço [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9478.htm#art83](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9478.htm#art83). Acesso em maio de 2023.

popularmente se configurou como sendo a descoberta do “pré-sal” na costa brasileira em 2007. Essa descoberta não somente revolucionou a indústria de P&G global, mas serviu como um importante instrumento de desenvolvimento nacional, tendo em vista o reforço sobre a aplicação da Política de Conteúdo Local (PCL) e outras orientações promovidas por meio do Marco Regulatório do Pré-sal, instituído pela Lei nº 12.351 de 2010.

Riceto e Da Silva (2021) destacam alguns pontos relevantes desse marco regulatório: repartição dos lucros entre a empresa operadora e a União; Petrobras como única operadora dos consórcios; criação do Fundo Social do Pré-sal (FSPS), que destina uma parte para o financiamento de projetos e programas de combate à pobreza e desenvolvimento socioeconômico (Riceto e Da Silva, 2021, p. 3). A criticidade da companhia para o país também é apontada por Mortari et al. (2021), quando os autores destacam, por meio de uma análise da matriz de insumo produto do setor, a ligação com 67 outros setores, reforçando o papel de demanda intermediária do setor de refino dentro da economia brasileira e a capacidade de gerar transbordamentos por meio de transformações na cadeia de oferta e demanda.

Ainda no que diz respeito à PCL, destaca-se os esforços da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) em incentivar o investimento das empresas em atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I). Desta forma, a Resolução nº 918 de 2023<sup>20</sup> regulamenta o cumprimento da obrigação de investimentos em PD&I com a finalidade de fortalecer o desenvolvimento científico e tecnológico do setor, da indústria nacional, a busca de soluções tecnológicas e a ampliação do conteúdo local de bens e serviços, o que reforça o papel atuante do Estado em fomentar a transformação econômica e industrial anteriormente mencionada e, além disso, destaca o papel central da Petrobras em desenvolver a estrutura de fornecimento e pesquisa nacional.

Entretanto, Riceto e Da Silva (2021) trazem a crise administrativa que atingiu a companhia a partir de 2014, levando a prejuízos financeiros e deterioração do reconhecimento da companhia como importante ator dentro do planejamento estratégico nacional de desenvolvimento socioeconômico. Dessa maneira, a

---

<sup>20</sup> O acesso à resolução pode ser feita por meio do endereço <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-918-2023-regulamenta-o-cumprimento-da-obrigacao-de-investimentos-decorrente-da-clausula-de-pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao-dos-contratos-para-exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas-natural?origin=instituicao>. Acesso em Setembro de 2023.

conjuntura atual é a de estabelecer um plano que venha a recuperar esse papel econômico e social por meio dos mecanismos que marcaram a sua respectiva história de colaboração interempresarial, coordenadora de projetos de desenvolvimento e guardiã da soberania nacional sobre a frente de recursos energéticos.

### 5.3.2 CONFIGURAÇÃO ATUAL DO SETOR DE P&G NO BRASIL.

Conforme evidenciado anteriormente, o advento da Lei nº 9.478 de 1997<sup>21</sup>, popularmente conhecida como Lei do Petróleo, marcou o fim do monopólio da Petrobras na exploração, produção e refino do petróleo, abrindo o mercado brasileiro para empresas estrangeiras com a finalidade de aumentar a competitividade interna e, além disso, alavancar a quantidade de *royalties* que pudessem ser pagos à União. Além disso, a ANP acaba sendo responsabilizada pelo acompanhamento e regulamentação do setor, definindo importantes diretrizes que contribuem para a construção do sistema produtivo e científico.

Nesta linha, a ANP tem divulgado anualmente um relatório de exploração que introduz dados importantes acerca da configuração atual do setor, principalmente no que tange aos blocos sob contrato e seus respectivos operadores (ANP, 2023). A respeito destes, o relatório destaca que em 2023 houve 251 blocos ativos, subdivididos entre 13 sob o regime de partilha de produção e 238 sob concessão. Enquanto os primeiros estão relacionados àqueles blocos estratégicos (ligados ao pré-sal ou não), aos quais é dada à Petrobras a preferência de atuar como operadora, os contratos de concessão acabam sendo aqueles nos quais a empresa concessionária tem a propriedade de todo o óleo e gás que venha ser descoberto e produzido na área concedida.<sup>22</sup>

Na sequência, o relatório destaca a ligeira predominância de contratos *onshore* (151) em relação aos marítimos (100), embora a área total seja equivalente. No que tange às principais bacias, a de Santos (29), Campos (18) e Barreirinhas (11) são as principais no ambiente marítimo, enquanto Potiguar (47), Recôncavo (29) e

---

<sup>21</sup> A lei do petróleo pode ser acessada em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9478.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9478.htm). Acesso em dezembro de 2024.

<sup>22</sup> A diferença entre os contratos estabelecidos podem ser acessados em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/entenda-as-rodadas/os-regimes-de-concessao-e-de-partilha>. Acesso em dezembro de 2024.

Parnaíba (18) são as principais bacias *onshore*. A distribuição dos blocos em aspectos geográficos é exposta na FIGURA 4.

FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS BLOCOS SOB CONTRATO AO FINAL DE 2023.



FONTE: ANP (2023).

Dentro dos blocos marítimos, que acabam sendo invariavelmente aqueles mais arriscados e que demandam a configuração de consórcios entre grandes empresas do setor, a disposição entre as quatro principais empresas detentoras dos contratos de concessão e partilha em estágio de exploração é exposta na TABELA 1.

TABELA 1 - PRINCIPAIS EMPRESAS DETENTORAS DE CONTRATOS DE CONCESSÃO E PARTILHA EM ESTÁGIO DE EXPLORAÇÃO EM 2023.

Empresa	Concessão	Partilha
Petrobras	28	8
Shell Brasil	22	2
ExxonMobil Brasil	13	1
BP Energy	1	2

FONTE: ANP (2023)

Elaborado pelo autor.

Contudo, além do que é exposto na tabela acima, nota-se que existe um total de 17 operadores distintos de diferentes nacionalidades, como Brasil, Estados Unidos, Reino Unido, França, Malásia, Espanha, Noruega, China e Austrália. No que tange à configuração dos blocos terrestres, a principal empresa operadora é a norte-americana Petro-Victory, com 34 contratos estabelecidos. As empresas brasileiras Eneva, Imetame, Origem e 3R Areia Branca finalizam as cinco principais.<sup>23</sup>

No que se refere aos blocos atualmente em estágio de produção, a TABELA 2 identifica as quatro principais produtoras em território nacional. Ao todo, existem 76 contratos marítimos com início desde 1976 a 2022 e 227 contratos de produção terrestre em atividade. Além das empresas de produção marítima evidenciadas na TABELA 2, destaca-se a presença de gigantes do setor, como Shell (3), Equinor (2) e TotalEnergies (1). Em termos de regionalidade, os estados do Rio de Janeiro (48), Espírito Santos (13) e São Paulo (7) são os principais em produção *offshore*, enquanto Bahia (83), Rio Grande do Norte (72) e Espírito Santo (26) são os principais em produção terrestre.

<sup>23</sup> Destaca-se que, embora a Petro-Victory seja detentora de um maior número de contratos, a empresa Eneva possui a maior extensão territorial contratada.

TABELA 2 – QUANTIDADES DE CONTRATOS DE PRODUÇÃO MARÍTIMA E TERRESTRE ATIVOS EM DEZEMBRO DE 2024.

Marítimo		Terrestre	
Empresa	Contratos	Empresa	Contratos
Petrobras	39	Potiguar E&P	29
Trident Energy	10	Petrobras	23
BW Energy	4	3R Potiguar	19
3R Petroleum	3	3R Bahia	14

FONTE: ANP (2024)

Elaborado pelo autor.

Em síntese, o ambiente atual do setor de P&G brasileiro demonstra uma alta penetração de empresas estrangeiras sobre a ótica de detenção de contratos de exploração marítima, tendo em vista que existe uma discrepância de concessões vigentes de exploração e produção. Esse movimento acaba sendo observado como uma oportunidade de introdução de conhecimento estrangeiro no sistema nacional de inovação, tendo em vista que, na medida em que há a movimentação dos estágios de exploração para produção, as receitas advindas precisam ser investidas em PD&I no país segundo regulamentação da ANP. Sendo assim, as tendências observadas no setor se alinham com os desafios prospectados para 2025 sob a ótica de priorização no desenvolvimento de tecnologias digitais, principalmente para aquelas que apoiam a otimização de custos e transição energética. Nessa linha, a Petrobras possui um papel fundamental de fomentar parcerias colaborativas e de se situar estrategicamente frente à competição internacional.

### 5.3.3 I4.0 APLICADA À PETROBRAS: PLANO ESTRATÉGICO DE DIGITALIZAÇÃO.

As discussões promovidas até aqui estabelecem um panorama de atuação para a Petrobras marcado pela volatilidade no preço do barril de petróleo, demandando disciplina de capital, incertezas geopolíticas, pressão crescente pela transição energética, centralidade dada ao consumidor e desconfiança acerca do histórico papel de promoção do desenvolvimento socioeconômico no país. A fim de superar esses desafios, há o reconhecimento de que as estratégias de digitalização e

fomento da I4.0 podem promover ações que contribuem com a adaptação e competitividade da empresa em níveis globais, somado ao incentivo de ações complementares em território nacional que auxiliam na difusão desses padrões sobre toda a cadeia de fornecimento da empresa.

Diante desse cenário, a firma apresenta o Plano Estratégico Petrobras para o período de 2025 a 2029, com investimentos totais de US\$111 bilhões (Petrobras, 2024c). Dentro dos investimentos totais, a companhia destina cerca de US\$46 bilhões para projetos do pré-sal, destacando como as pesquisas divulgadas em meados de 2007 foram um divisor de águas para a empresa. Além disso, o plano estratégico reassume a ambição da Petrobras em manter a relevância atual no fornecimento de energia e no desenvolvimento econômico do Brasil.

Compatibilizando o planejamento estratégico com as pressões do setor, a empresa destaca o comprometimento de investir cerca de US\$16 bilhões em transição energética, englobando projetos de baixo carbono, descarbonização das operações e projetos de PD&I, o que representa 15% da despesa com capital total do quinquênio (Petrobras, 2024c). Ao destacar as estratégias específicas para inovações tecnológicas, a empresa menciona seus esforços para implementar uma infraestrutura de classe mundial no Brasil no início dos anos 2000, sua capacidade de estabelecer relacionamentos estratégicos na segunda década deste século e o foco na geração de valor para o negócio a partir de 2020 (Petrobras, 2024a). Todas essas conquistas são justificadas a partir dos esforços da empresa em investir mais de US\$15 bilhões em PD&I nos últimos 25 anos, resultando em mais de 1.300 patentes depositadas e investimentos próximos a R\$2 bilhões em parcerias por meio da iniciativa conexões para inovação. Visando dar continuidade ao protagonismo assumido, o planejamento para o quinquênio é de investir no mínimo US\$4,2 bilhões, aumentando a participação de descarbonização e novas energias para 30% até 2029 (Petrobras, 2024a).

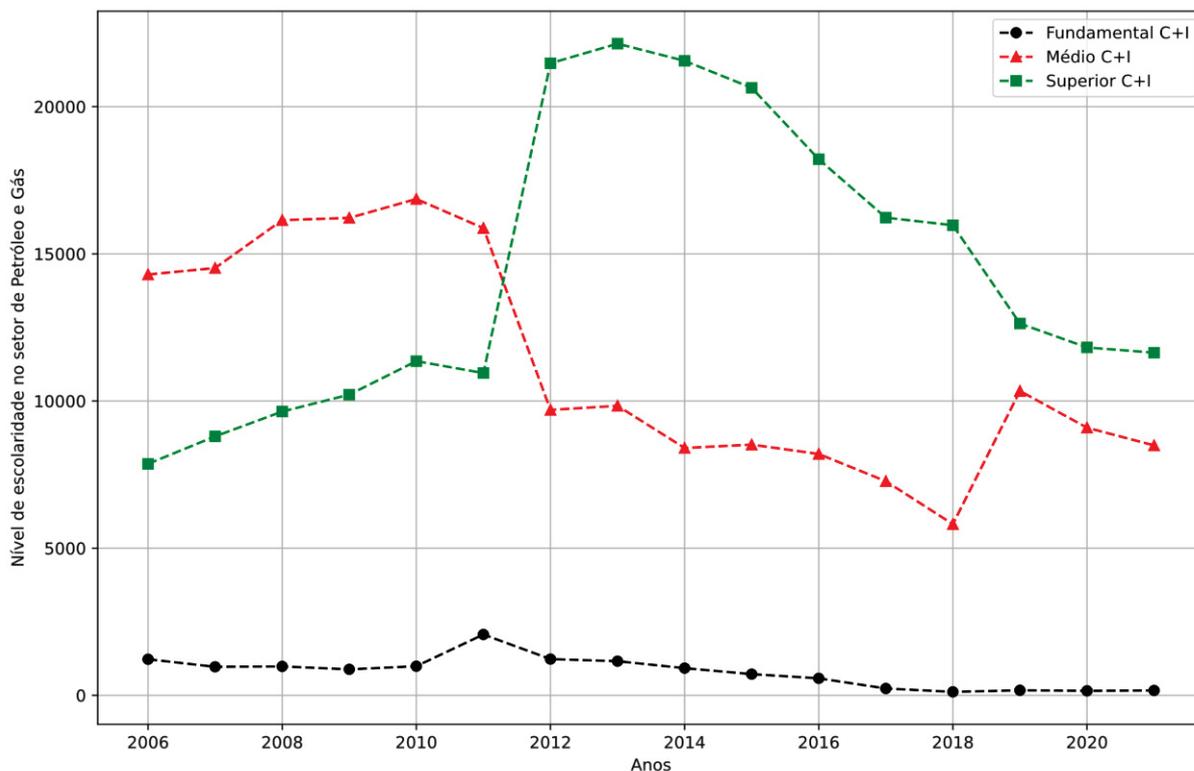
O compromisso assumido durante esse período é fruto de uma tendência da empresa em se digitalizar e em se tornar referência científica no setor. Com efeito, houve um crescimento da projeção de investimento frente ao planejamento estratégico lançado para o período de 2024 a 2028 estimado em US\$3,6 bilhões. Contudo, no planejamento passado a empresa destacou o corpo profissional e infraestrutura científica disponível, tendo um quadro total de 948 pesquisadores, sendo de aproximadamente 29% doutores e 40% mestres, e um número acima de 230 parcerias estabelecidas e 9.000 pesquisadores engajados (Petrobras, 2023b).

O tema das tecnologias digitais foi priorizado no planejamento estratégico elaborado para o quinquênio de 2023 a 2027 (Petrobras, 2023a). Para tanto, a empresa destaca aportes de US\$2,1 bilhões em apoio à transformação digital e inovação. Dessa forma, são enumerados cinco resultados esperados:

1. Capacidade de computação equivalente a mais de 550 mil laptops de última geração.
2. 80% dos processos digitalizados até 2027.
3. Mais de 1.200 times ágeis em 2027.
4. Mais de 1.200 patentes ativas em 2025.
5. Mais de 25 mil empregados capacitados e requalificados em tecnologias digitais até 2027.

Em relação à capacitação e requalificação dos profissionais, os GRÁFICOS 8 e 9 apresentam o quadro atual de desenvolvimento da mão de obra no setor, sendo eles classificados a níveis de escolaridade de ensino fundamental completo e incompleto (aqui também considerados analfabetos), médio completo e incompleto, superior completo e incompleto, mestrado e doutorado.

GRÁFICO 8 – NÍVEL DE ESCOLARIDADE NO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NO BRASIL ENTRE 2006 E 2021.

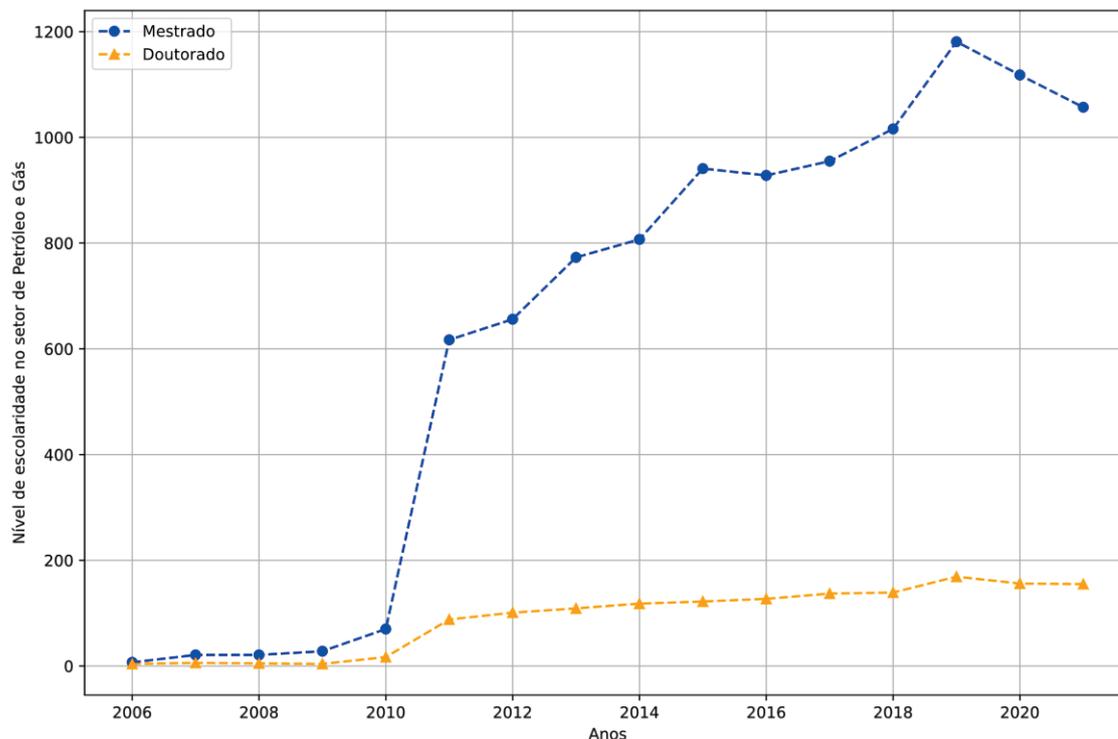


FONTE: RAIS (2023)

Elaborado pelo autor.

No que diz respeito aos níveis de escolaridade até o ensino superior, nota-se que a partir de 2011 há uma superação de funcionários com engajamento mínimo em níveis de terceiro grau. O período acabou sendo condizente com todo o planejamento estratégico da companhia, marcado pelo início das operações vinculadas à descoberta do pré-sal, quando os investimentos foram expandidos e o nível de complexidade das operações aumentaram. Na sequência, é apresentada a evolução dos níveis de escolaridade que se iniciam nos programas de pós-graduação.

GRÁFICO 9 – NÍVEL DE ESCOLARIDADE NO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS A PARTIR DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO ENTRE 2006 E 2021.



FONTE: RAIS (2023)

Elaborado pelo autor.

Observa-se que a evolução enunciada no GRÁFICO 8 é acompanhada pelo nível de profissionais com ingresso em programas de mestrado. Diante de um contraste concomitante entre ambos os gráficos, torna-se possível presumir que o decaimento do nível de profissionais com ensino superior pode estar condicionado à demanda por funcionários que tenham qualquer engajamento em programas de pós-graduação. Esse movimento acaba estabelecendo um quadro promissor para o planejamento estratégico da companhia em fomentar a difusão de conhecimentos digitais entre os funcionários. Alinhado a isso, destaca-se a própria ênfase dada pela empresa no quadro técnico dos funcionários, conforme exposto pelo planejamento para o quinquênio de 2024 a 2028 (Petrobras, 2023b).

Buscando atingir os resultados esperados, a companhia tem elencado inúmeras iniciativas digitais para os mais distintos segmentos de operação em planejamentos passados. Para o segmento de exploração e produção, busca-se fomentar a conectividade *offshore* com uma malha óptica, tecnologia móvel 5G e

satélites de alta capacidade, computação quântica para processamento sísmico e estudos de reservatórios, além de ciência de dados para fortalecer a cibersegurança. No estágio da comercialização e logística, busca-se expandir a conectividade 5G e promover a automatização de processos. Na fase do refino, a empresa propõe dispositivos para mobilidade, manutenção e inspeção de aparelhos, o que se alinha com os trabalhos e modelos apresentados neste capítulo, que parecem contribuir em maior grau com as discussões do setor. No segmento de gás e energia, destaca-se a otimização e digitalização da cadeia de processamento de gás, permitindo o acesso a novos modelos de negócio. Por fim, inúmeras iniciativas transversais também são elencadas, como plataformas em nuvem para acelerar a transformação digital, gêmeos digitais com o uso de IA, principalmente com foco preditivo em eficiência de produção, emissões e redução de risco exploratório (Petrobras, 2023a).

Para atingir tais desafios propostos para a companhia, torna-se necessário o apoio de um sistema de inovação capaz de endereçar as questões e promover iniciativas colaborativas. Sendo assim, a Petrobras e o CENPES se apoiam em inúmeros participantes desse sistema, que soma mais de 100 universidades, sendo a UFRJ um dos colaboradores principais, e parcerias estratégicas com empresas fornecedoras e complementares, como a Baker Hughes, que possui um centro de pesquisa instalado dentro do parque tecnológico da UFRJ. Dessa forma, a Petrobras se sustenta em um ecossistema de inovação aberto, mantendo um leve grau de centralização, com a finalidade de estabelecer direcionamentos, definição de governança e consolidar uma plataforma de inovação (Silveira et al., 2020).

#### 5.3.4 INICIATIVA DE DIGITALIZAÇÃO DE CAMPOS PELA PETROBRAS: GERENCIAMENTO DIGITAL INTEGRADO DE CAMPOS.

Apesar da digitalização ser um elemento chave nos planos estratégicos recentes da empresa, em seu passado é possível identificar iniciativas que foram ao encontro das estratégias definidas para o futuro. Ao antecipar oportunidades nos campos de P&G, a firma criou um programa corporativo dedicado ao estudo, desenvolvimento e implementação de processos de gerenciamento digital integrado de campos de petróleo (GeDIg) entre as etapas de exploração e produção (Moisés et al., 2008).

Foi definido como objetivo da estratégia a avaliação dos benefícios associados à implementação digital em campos de petróleo, combinando cenários de produção com níveis de inteligência entre os ativos, o que acaba se compatibilizando com os conceitos mencionados de campos inteligentes, também implementados pela Shell. Dentro dessa iniciativa, buscou estabelecer um monitoramento e controle em tempo real dos campos, uma otimização de custos e da produção, um aumento da recuperação dos reservatórios e um aprimoramento do treinamento dos funcionários. Por fim, a grande diversidade de poços nacionais *offshore* e *onshore* contribuíram com os resultados alcançados.

Pessoas, processos e tecnologia são os três pilares da iniciativa, tendo em vista a inter-relação entre cada elemento dentro de uma cadeia de tomada de decisão acerca de eventos na produção. Ou seja, as pessoas representam todos os funcionários envolvidos na etapa de análise, interpretação e tomada de decisão a respeito de informações extraídas dos processos. Elas configuram as etapas produtivas inerentes ao setor de P&G, seja na exploração ou produção. Por fim, as tecnologias representam todos os artefatos tecnológicos que estão sendo utilizados dentro de cada processo, como dispositivos, banco de dados, capacidade computacional, entre outros.

Dentro de uma dinâmica ideal de funcionamento, os funcionários estariam em constante contato com informações advindas dos campos, permitindo a tomada de decisão em um cenário colaborativo. Entretanto, Moisés et al. (2008) destacam que a Petrobras enfrentou algumas dificuldades no projeto piloto devido à não utilização das melhores práticas definidas para o projeto, o que é devido, em grande parte, aos poderes de governança e à divergência nos objetivos entre os gerenciadores dos ativos. Além disso, os funcionários que lidavam com mais de um campo ficavam confusos diante de diferentes fluxos de produção.

Assim, conclui-se que a iniciativa piloto da Petrobras teve sucesso no sentido de identificar questões que precisam ser superadas para que se viabilize a construção de uma rede colaborativa voltada ao gerenciamento de ativos da empresa. Torna-se necessária a difusão do conhecimento a respeito das formas operacionais atuais e de como isso deve ficar mediante a adoção do projeto. É preciso também estabelecer os objetivos de forma clara, a fim de evitar qualquer desalinhamento entre o pessoal envolvido. Finalmente, as novas tecnologias precisam ser implementadas em processos que estejam adaptados para recebê-las, ou assume-se o risco de aplicar

soluções tecnológicas em processos incompatíveis, gerando ineficiências e custos desnecessários.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.

Este capítulo buscou responder às questões relacionadas à motivação de implementar processos digitais no setor, às contribuições das tecnologias de I4.0 ao setor de P&G e ao papel da Petrobras como protagonista de uma política para fomentar a adoção e desenvolvimento destas tecnologias. Conforme destacado na primeira seção, o contexto atual projeta desafios futuros às empresas no que diz respeito à disciplina no aporte de capital, tendo em vista que cenários macroeconômicos instáveis e questões geopolíticas podem trazer flutuações no preço do barril de petróleo. Adicionalmente, é dada ênfase à conexão com a cadeia de valor até o usuário, demandando soluções tecnológicas a fim de fortalecer este relacionamento. Desse modo, a digitalização acaba sendo incentivada a fim de viabilizar iniciativas de redução de custos, incrementos operacionais, gerenciamento de ativos, melhoria na segurança do trabalho, entre outros aspectos.

Durante a segunda seção, muitas das oportunidades e aplicações tecnológicas foram destacadas, parecendo se concentrar em operações na cadeia de *upstream*, vinculada às atividades de exploração, desenvolvimento e produção, sobretudo no gerenciamento de manutenções preventivas dos ativos, buscando evitar qualquer tipo de interrupção da produção. Mas outras oportunidades e aplicações tecnológicas são identificadas nas mais diversas etapas da cadeia de produção. Por fim, são apresentadas algumas modelagens voltadas ao estabelecimento de arquiteturas para a digitalização de processos e outros estudos de caso que demonstram a possibilidade de se instalar campos inteligentes que facilitam o processo de tomada de decisão, tornando-o mais ágil e assertivo. Destaca-se que essas tecnologias enaltecem a complexidade e a intensidade de conhecimento inerente ao setor de P&G, distanciando-se da interpretação limitada que caracteriza as atividades deste segmento como intensivas em recursos naturais e escala. Ao contrário, todos os riscos associados às operações enaltecem a necessidade de se desenvolver soluções tecnológicas complexas que lidem com fluxos de informações crescentes e dinâmicos

Na sequência, o capítulo se concentra nos aspectos relacionados à Petrobras e ao contexto do setor de P&G no Brasil, destacando a predominância desta empresa em projetos de exploração e produção em áreas marítimas. Além disso, nota-se uma configuração em que diferentes multinacionais tiveram acesso às concessões de campos de P&G e fortalecem as respectivas posições em contratos de exploração. A consequência deste movimento é uma expectativa de que a presença de companhias estrangeiras na carteira de produção nacional aumente e, por isso, se eleve a participação destas empresas em projetos de PD&I encomendados pela ANP. O resultado esperado é o de um aumento na imigração de conhecimentos para o país, criando uma janela de oportunidade na qual a Petrobras pode se posicionar estrategicamente na oferta de soluções tecnológicas vinculadas ao tema de I4.0 para o mercado internacional.

Além destes desafios, que se apresentam para todas as empresas atuantes no setor, a Petrobras passa por um período em que se torna necessário um processo voltado à retomada da confiança social. Para isso, o planejamento estratégico vinculado às iniciativas de digitalização podem estabelecer um “pontapé inicial” para o estabelecimento de transformações que possam afetar os mais diferentes setores da economia brasileira por meio de um efeito de transbordamento. Por fim, destaca-se que todo esse planejamento para a firma acaba sendo apoiado por um sistema de inovação que conta com o apoio do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da companhia, com participação ativa de inúmeras universidades e empresas parceiras.

Em síntese, a I4.0 se introduz ao setor de P&G com a capacidade de fomentar um período de transformação digital direcionado ao combate de desafios que vêm se estabelecendo nos últimos anos. Com relação à economia e indústria brasileira, especificamente, a implementação destes conceitos por parte da Petrobras gera uma pressão para que fornecedores a montante e jusante adaptem seus processos internos para se compatibilizarem com as estruturas inteligentes estabelecidas e demandadas pela firma. Sendo assim, a Petrobras se coloca em uma posição estratégica no sentido de fomentar a difusão do conceito de I4.0, seja pela adoção ou produção destas tecnologias.

## 6 PETROBRAS: PILAR DA PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO NACIONAL NA ERA DA I4.0.

O objetivo deste capítulo é reforçar a argumentação a respeito da atuação da Petrobras no país, indo além da produção e refino, destacando como a empresa tem atuado como uma locomotiva do processo de PD&I, vinculando diferentes atores nacionais, impulsionando o sistema de inovação e contribuindo com o desenvolvimento de novas soluções viabilizadas pelas tecnologias pertencentes à matriz tecnológica do tema de I4.0. Desta forma, duas perguntas centrais norteiam as discussões propostas no decorrer do capítulo: Qual é o papel da empresa dentro do processo de invenções nacionais? Como a empresa tem tratado a emergência de novas soluções tecnológicas na era da I4.0? Além disso, dois casos de sucesso são apresentados a fim de reforçar a ideia de coordenação e intensidade tecnológica presente no setor.

A justificativa deste capítulo se relaciona diretamente com a hipótese de pesquisa da tese, já que busca identificar como a empresa tem se relacionado com o processo de pesquisa, invenção, inovação e promoção das novas tecnologias no país. Desta forma, entende-se que a empresa possui um papel central em expandir a oferta de soluções tecnológicas, na mesma medida em que incentiva a inserção de diferentes atores nacionais que possam contribuir de forma complementar e, em paralelo, desenvolver a infraestrutura interna de PD&I por meio de efeitos de transbordamento resultantes de cada iniciativa.

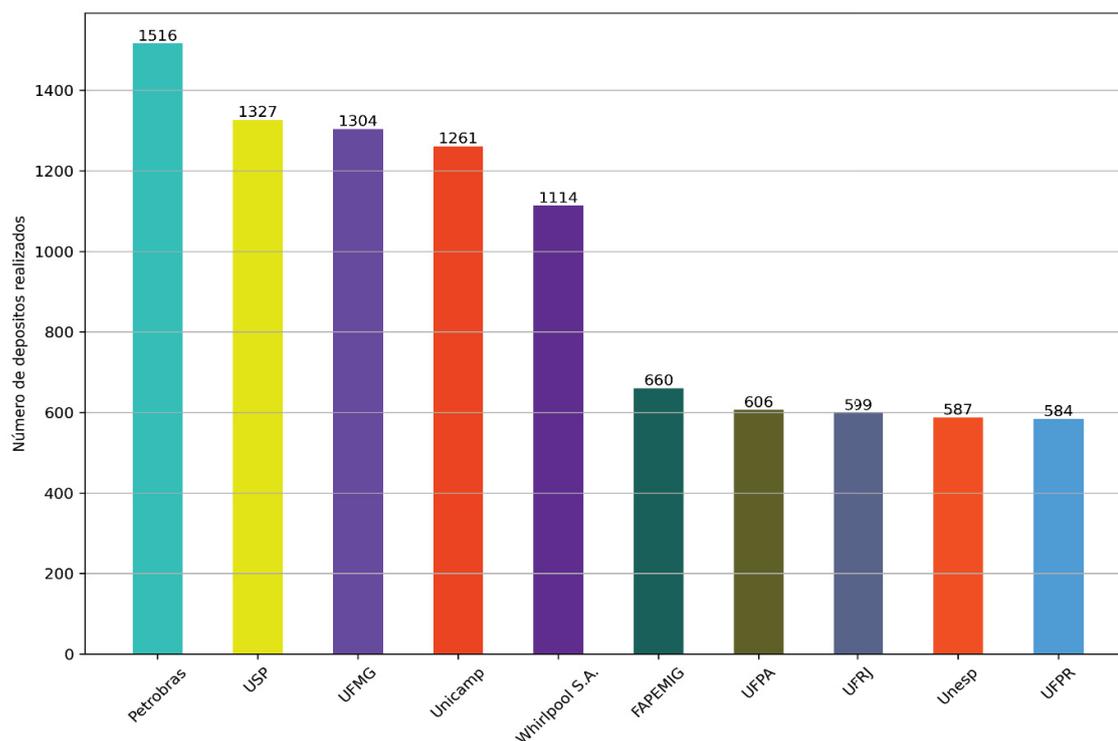
Sendo assim, este capítulo é dividido em três seções. Na primeira, é apresentado o envolvimento da empresa com o processo de depósito de patentes perante dados extraídos do INPI, buscando identificar as diferentes redes colaborativas estabelecidas. Na sequência, dados da ANP apoiam a identificação do envolvimento da Petrobras com projetos de PD&I vinculados às tecnologias emergentes do conceito de I4.0, também identificando as diferentes redes de relacionamento construídas pela empresa. Por fim, buscando destacar os resultados desse ambiente, são apresentados dois estudos de caso que reforçam a existência de intensidade tecnológica no setor e a capacidade da Petrobras em estabelecer estruturas colaborativas com atores do ambiente produtivo e científico.

## 6.1 PROTAGONISMO DA PETROBRAS FRENTE AO DEPÓSITO DE PATENTES EM AMBIENTE NACIONAL.

Nesta seção, pretende-se identificar as funções da Petrobras no processo de depósito de patentes em território nacional, não limitado aos processos de autoria individual, mas principalmente naqueles em que a empresa se estabeleceu em processo colaborativo com outras empresas, universidades e institutos de pesquisa. Sendo assim, justifica-se essa abordagem diante do desejo de identificar na firma um papel crítico na construção de relações simbióticas com os mais diversos atores de um sistema nacional de inovação. Nessa linha, dados extraídos do INPI foram cruciais para identificar a relevância da empresa no ambiente nacional, as coautorias e os principais núcleos de relacionamento.

Tendo em vista a justificativa da seção, o objetivo do GRÁFICO 10 é o de demonstrar como a Petrobras se sobressai no ambiente inventivo nacional frente aos demais atores da infraestrutura científica do país, tendo em vista que expõe o número de depósito de patentes associados ao CNPJ básico de cada instituição desde o ano 2000.

GRÁFICO 10 - NÚMERO DE DEPÓSITOS DE PATENTES REALIZADOS PELOS 10 MAIORES DEPOSITANTES ENTRE 2000 E 2023.



FONTE: INPI (2024).

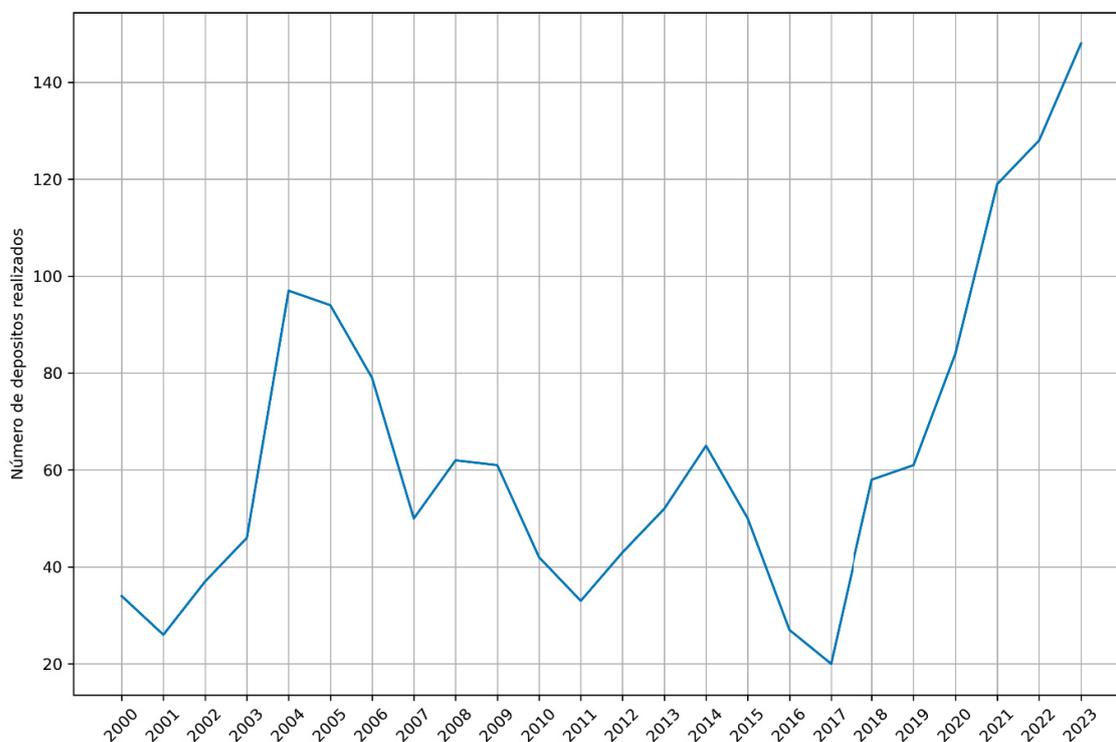
Elaborado pelo autor.

Destaca-se que a configuração dos 10 maiores depositantes é definida por sete universidades federais, duas empresas e uma fundação de amparo à pesquisa. Dessa forma, enfatiza-se a importância da Petrobras na perspectiva de fomentar a capacidade de inovação do país desde o início do século. Isso se soma à destacada função social da empresa, intrinsecamente ligada à sua origem de gerar independência no mercado global de P&G. Mas sob uma ótica de autonomia no processo de inovação e manutenção da competitividade do país, em um mercado altamente demandante por inovações tecnológicas, a Petrobras enfrenta desafios atuais de otimização da produção e transição energética.

Soma-se ao protagonismo o planejamento da empresa em se manter como uma referência no processo de inovação, conforme evidenciado em recentes planos estratégicos apresentados pela empresa (PETROBRAS, 2023a, 2023b, 2024a). Esse comprometimento não está sendo gerado a partir de uma mudança de postura frente às pressões competitivas por soluções tecnológicas, mas é fruto de uma institucionalização crescente da PD&I dentro dos processos internos, enaltecida

diante das conquistas alcançadas durante as descobertas do pré-sal e enfatizadas pelo GRÁFICO 11, onde se evidencia a tendência crescente de depósitos de patentes.

GRÁFICO 11 – QUANTIDADE TOTAL DE PATENTES DEPOSITADAS PELA PETROBRAS ENTRE 2000 E 2023.



FONTE: INPI (2024).

Elaborado pelo autor.

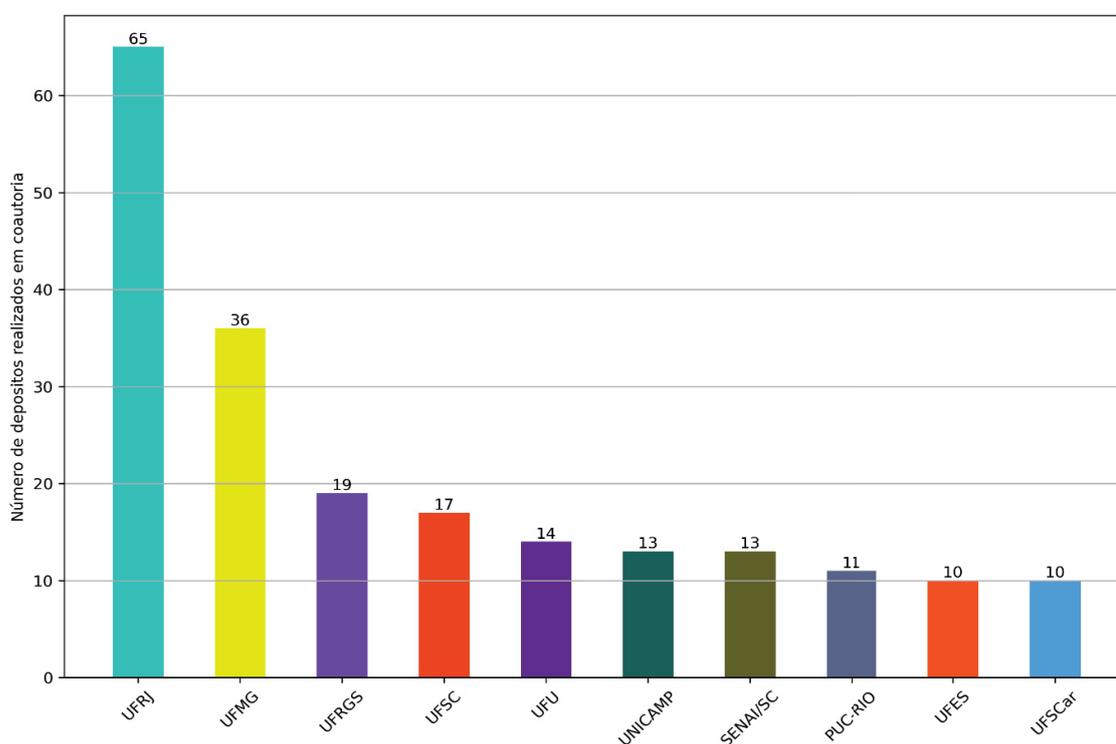
O desempenho da Petrobras expõe uma taxa de crescimento anual composta no número de depósitos de 6.6%, ressaltando o comprometimento da empresa com o processo de PD&I. Destaca-se que, apesar da crise da Covid-19 no início do ano de 2020, com a queda acentuada no preço do barril do petróleo, a empresa tem demonstrado crescimento constante no número de depósitos desde 2017, o que se compatibiliza com o mencionado papel de se posicionar como uma camada de sustentação para o enfrentamento das crises globais que podem afetar as mais diferentes dimensões da economia brasileira.

Diante disso, a Petrobras também se posiciona como articuladora de um sistema de inovação, tendo em vista que dentro dos depósitos de patentes existem aqueles realizados em coautoria com as mais diversas empresas, universidades e institutos de pesquisa, conforme evidenciado pela FIGURA 5.



Dentro de um total de 1.516 depósitos realizados, 370 pedidos foram realizados em coautoria, subdivididos em 339 pedidos com apenas um coautor, 26 com dois coautores e cinco pedidos com três coautores. Em geral, destaca-se que aproximadamente um em cada quatro processos são realizados com a colaboração de outros agentes, ressaltando que, entre os dados, foram subtraídos pedidos de coautoria com pessoas físicas. Além disso, os dados demonstram que a Petrobras se relacionou com um total de 90 atores distintos no ambiente nacional, pertencentes a diferentes setores científicos e industriais, enaltecendo a pluralidade e a capacidade de promover transbordamentos transversais dentro desse ambiente. O GRÁFICO 12 apresenta os principais parceiros da empresa nesse processo.

GRÁFICO 12 - OS 10 PRINCIPAIS PARCEIROS NOS DEPÓSITOS DE PATENTES DE COAUTORIA COM A PETROBRAS.



Fonte: INPI (2024).

Elaborado pelo autor.

Entre os principais coautores, ressalta-se a importância destinada às universidades, principalmente aquelas com proximidade geográfica à matriz da empresa petrolífera, como a UFRJ e a PUC-Rio. Contudo, as relações acabam não se limitando às universidades, mas se somam aos Serviços Nacionais de Aprendizado Industrial (SENAI), que chegam a 27 patentes quando consideradas as sedes de diferentes regiões. No que diz respeito às empresas, embora nenhuma se posicione entre os 10 principais colaboradores, a Albrecht Equipamentos Industriais (4), a empresa de automóveis FIAT (4) e a petrolífera norueguesa Equinor (3) também apresentam depósitos conjuntos. A evidência destes relacionamentos é enfatizada a partir de um “efeito Petrobras” no que tange à rede de fornecedores, estimulando a colaboração com universidades e centros de pesquisa (Fioravante e Aguirre, 2013)

Em síntese, os dados sobre o depósito de patentes indicam que a Petrobras desempenha um papel significativo no ambiente científico nacional, tanto pelo volume de patentes depositadas quanto pela constância dessa atividade, independentemente do ciclo econômico. Além disso, observa-se sua interação com diferentes agentes do setor e o potencial de gerar efeitos de transbordamento para a economia. Em seguida, analisam-se os dados que relacionam essa atuação às tecnologias emergentes no contexto da I4.0.

## 6.2 PROTAGONISMO CIENTÍFICO TRANSFERIDO PARA A ERA DAS TECNOLOGIAS DE I4.0.

Esta seção se debruça no papel exercido pela Petrobras nas atividades inventivas no país, buscando identificar como essa responsabilidade tem sido transferida para a era das tecnologias de I4.0. Considera-se que, a partir da capacidade de conexões evidenciadas anteriormente, a firma se posiciona estrategicamente em um cenário onde a política industrial pode gerar transbordamentos para os mais diferentes setores nacionais, não apenas por meio das pesquisas iniciadas, mas também pelos desdobramentos de cada desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas ao ambiente industrial.

Todos os dados expostos e descritos no decorrer desta seção se apoiam em uma política fundamental para o fomento das atividades de PD&I no país, tendo em vista que, por meio da Lei nº 9.478/1997, foi atribuída à ANP a responsabilidade de

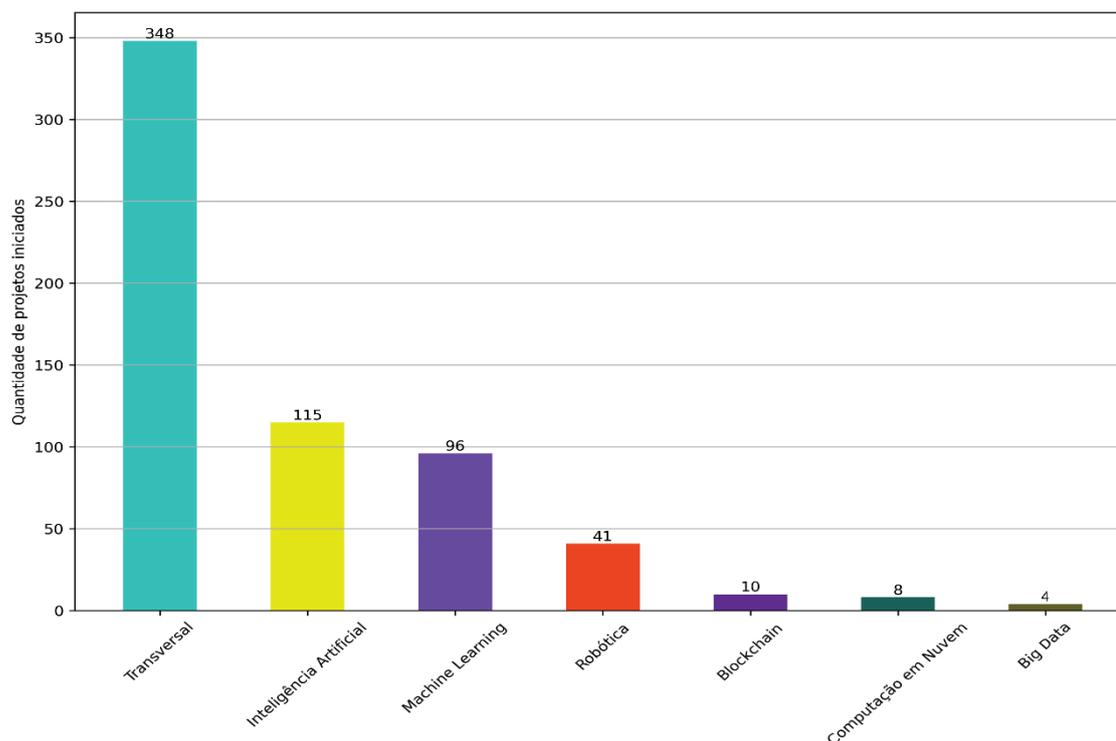
estimular a pesquisa e adoção de novas tecnologias para o setor. Para tanto, os contratos de concessão acabam estabelecendo um requerimento, sustentado pela resolução ANP nº 918 de março de 2023, no qual as empresas que tiverem receitas nos campos devem investir entre 0,5% a 1% desse resultado em projetos de pesquisa e inovação, com o risco de sofrer sanções e perder a licença para operar no mercado brasileiro. Sendo assim, as empresas acabam buscando projetos e parceiros para executar esses requerimentos, o que acaba contribuindo com o desenvolvimento das universidades, instituições e centros de pesquisas nacionais.

Tamanha é a importância dessa resolução que foram identificados 4.230 projetos iniciados desde 2016, com um total de aproximadamente R\$ 29,5 bilhões investidos até julho de 2024. Além disso, empresas de diferentes nacionalidades se tornam responsáveis pelo andamento de cada pesquisa, permitindo a introdução de conhecimentos estrangeiros, a importação de *expertise* e a construção de redes colaborativas internacionais. Ao todo, foram identificadas 20 diferentes empresas, com a participação de gigantes do setor, como a chinesa CNOOC, a norueguesa Equinor, a americana ExxonMobil, a francesa TotalEnergies e a catarense QatarEnergy.

#### 6.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PROJETOS VINCULADOS À TEMÁTICA DE I4.0.

Dentro dos mais de quatro mil projetos, conforme evidenciado no capítulo metodológico, uma revisão dos títulos e objetivos permitiram a identificação de 622 iniciativas que pudessem estar associadas ao ambiente de I4.0, o que equivale a 14,7% do total observado e 11,3% do total investido. No que diz respeito à qualificação dos projetos associados à I4.0, existe um predomínio de iniciativas de pesquisa aplicada (343), desenvolvimento experimental (119) e protótipos e pilotos (87). Quando a análise se volta aos pormenores das naturezas tecnológicas, o GRÁFICO 13 apresenta a distribuição entre as principais tecnologias.

GRÁFICO 13 – QUANTIDADE DE PROJETOS INICIADOS PARA CADA UMA DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS INTEGRANTES DO AMBIENTE DE I4.0.



FONTE: ANP (2024).

Elaborado pelo autor.

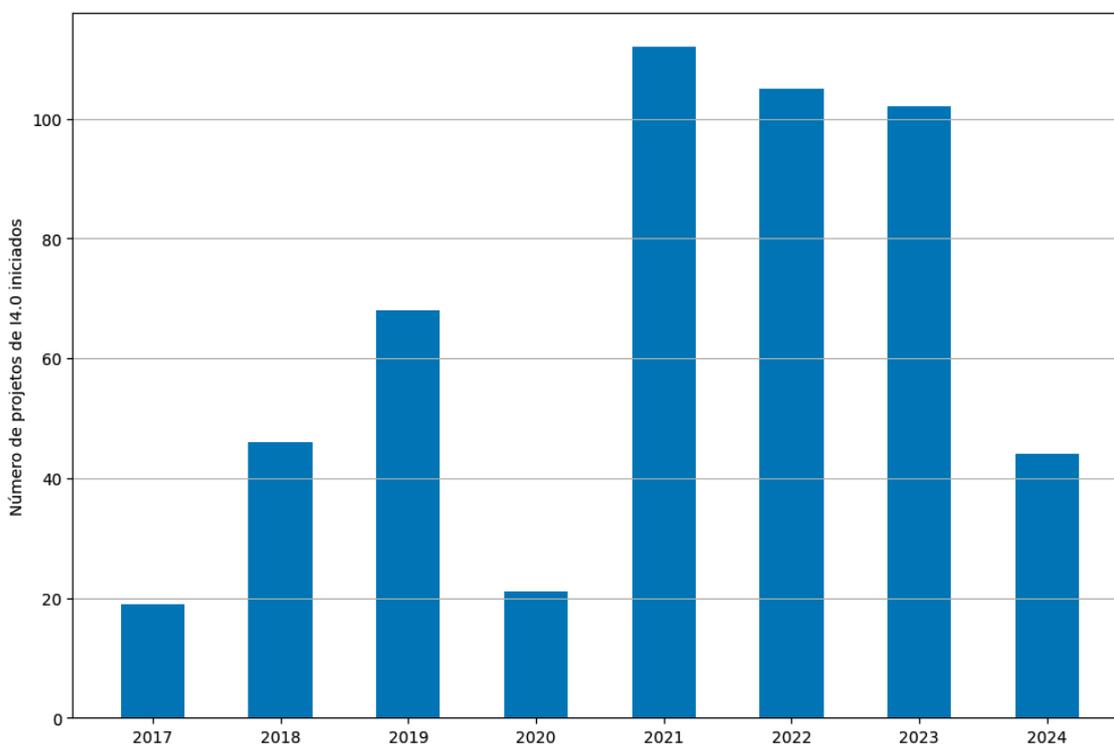
O grupo de tecnologias transversais representa uma grande diversidade de projetos que não puderam ser associados a uma tecnologia específica, muitas vezes tirando proveito de diferentes elementos conjuntos, como gêmeos digitais, robótica, desenvolvimento de *softwares*, entre outros. Em relação às tecnologias específicas, existe uma quantidade expressiva de projetos associados à introdução de IA e *machine learning*. Embora sejam conceitos semelhantes, a diferenciação ocorre na medida em que a IA é utilizada na execução das tarefas em si enquanto o *machine learning* se refere às análises de dados e apoio ao processo de tomada de decisão, o que se torna indispensável nas etapas de exploração por meio das análises de dados geológicos e sísmicos, além do processo de manutenção de equipamentos.

Outro pilar é sustentado a partir do emprego de robôs no ambiente de produção das empresas petrolíferas, tendo em vista os benefícios associados à manutenção preventiva, verificação de integridade de equipamentos, intervenção em poços, entre outros. Além disso, destaca-se que, apesar de representar pouco mais de 6% dos projetos, o valor investido nessa tecnologia é de 16,6%, o que se

compatibiliza com a necessidade de equipamentos e insumos necessários para o desenvolvimento de cada protótipo. No âmbito do *blockchain*, as principais funcionalidades partem da gestão, comercialização, pagamentos digitais e controle de estoque. Para a computação em nuvem, o armazenamento e processamento de dados apoiam novamente o processo de tomada de decisão por meio de soluções computacionais. Por fim, a tecnologia de *big data* é utilizada como um instrumento indispensável para apoiar análises complexas, análises de padrões e correlações com eventos identificados dentro da produção.

Dentro de todas essas iniciativas, destaca-se o papel da Petrobras em ser a responsável por pouco mais de 80% dos projetos, apresentando, além disso, crescimento acentuado durante nos últimos anos em comparação ao período pré-Covid-19, conforme evidenciado pelo GRÁFICO 14.

GRÁFICO 14 – QUANTIDADE DE PROJETOS DE I4.0 INICIADOS PELA PETROBRAS DURANTE O PERÍODO DE 2017 E JUNHO DE 2024.



FONTE: ANP (2024).

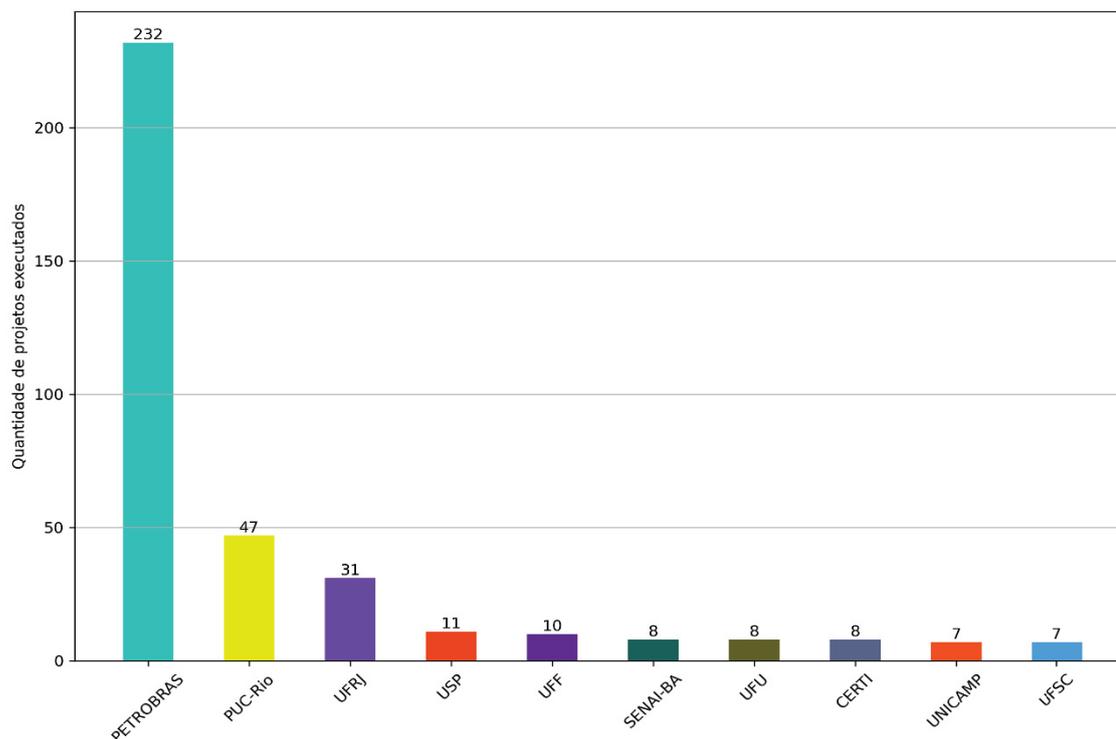
Elaborado pelo autor.

Resguardado o período de 2020, quando a empresa teve uma queda acentuada de receita devido à crise da Covid-19, a Petrobras demonstra um foco notável em projetos de digitalização que se compatibilizam com o planejamento estratégico recente da companhia. Além disso, esse movimento de aumento no número de projetos é acompanhado pela necessidade de estabelecer parcerias com diferentes atores do sistema nacional de inovação, o que acaba sendo evidenciado na subseção seguinte.

#### 6.2.2 PARCERIAS ESTRATÉGICAS DESENVOLVIDAS PARA AS PESQUISAS DE I4.0.

Da mesma forma como foi evidenciado na seção relacionada aos depósitos de patente, os dados extraídos da ANP viabilizaram a identificação de diferentes redes estabelecidas para o desenvolvimento de cada uma das tecnologias identificadas anteriormente. Para isso, foi realizado o cruzamento entre os projetos de responsabilidade da Petrobras com diferentes atores executores, sendo os principais identificados pelo GRÁFICO 15.

GRÁFICO 15 – QUANTIDADE DE PROJETOS DE I4.0 EXECUTADOS SOBRE A RESPONSABILIDADE DA PETROBRAS.



FONTE: ANP (2024).

Elaborado pelo autor.

Destaca-se que a maioria dos projetos acabam sendo executados pela própria empresa, compatível com o mesmo resultado alcançado dentro dos dados referente aos depósitos de patentes e destacado por Bazzo e Porto (2013) quando os autores realizaram a mesma análise para período recente. Entretanto, nota-se que alguns dos principais relacionamentos no âmbito de depósitos de patentes são carregados para a esfera de tecnologias de I4.0, como no caso da UFRJ, PUC-Rio, UFSC, SENAI e Unicamp. Nessa linha, destaca-se o papel das universidades e instituições públicas no sistema nacional de inovação, centralizados diante de um protagonismo da Petrobras, que é capaz de gerar transbordamentos para a economia e o ambiente inovativo do país. Na sequência, a TABELA 3 realiza a exposição dos principais executores para cada divisão tecnológica.

TABELA 3 - PRINCIPAIS EXECUTORES PARA CADA PROJETO DE RESPONSABILIDADE DA PETROBRAS.

Tecnologias	Executores
Transversal	Petrobras (132); PUC-Rio (24); UFRJ (17); CERTI (8); UFU (8)
Inteligência artificial	Petrobras (40); PUC-Rio (14); UFRJ (8); UFF (3); UFMG (2)
Machine Learning	Petrobras (39); PUC-Rio (6); UFRJ (5); LRrace (3); UFSC (3)
Robótica	Petrobras (13); SENAI-SC (4); SENAI-BA (4); Instor (2); USP (2)
Blockchain	Petrobras (5); PUC-Rio (2); GoLedger (2); DR Wars (1)
Computação em Nuvem	Petrobras (3); Unicamp (1); UFF (1); IPE (1); SELLETIVA (1)
Big Data	UFRN (1); UFRJ (1); Morningstar (1); PUC-Rio (1)

FONTE: ANP (2024).

Elaborado pelo autor.

Tendo em vista a distribuição dos executores, observa-se que a PUC-Rio tem contribuído nas mais diversas frentes tecnológicas, acompanhada pela UFRJ, o que ressalta os fatores de proximidade dessas instituições com a matriz da companhia. Nos âmbitos de institutos e centros de pesquisa, os Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras (CERTI) se colocam como um dos principais parceiros científicos da companhia sob uma ótica transversal. Além disso, apoiando o desenvolvimento de protótipos e avanços na área da robótica, as diferentes filiais do SENAI se inserem novamente como um parceiro estratégico para a companhia. Por fim, os relacionamentos com empresas são evidenciados por meio dos vínculos instituídos com GoLedger, Morningstar e LTrace.

Em síntese, nota-se a capacidade da Petrobras em novamente estabelecer relacionamentos com os mais diferentes atores do sistema nacional de inovação, contribuindo com transbordamentos no ambiente das universidades, institutos, centros de pesquisa e empresas pertencentes ao setor. Além de gerar soluções tecnológicas que venham a contribuir com a competitividade da empresa frente um mercado com pressões por eficiências produtivas, esses enraizamentos estabelecidos contribuem com a oportunidade de avançar os estudos e aplicações que vêm sendo desenvolvidos em cada um desses ambientes. Nesta linha, a seção seguinte se apoia na exposição de casos de sucesso que foram alcançados por meio desses projetos iniciados pela Petrobras.

### 6.3 APLICAÇÃO DE SOLUÇÕES DE I4.0 NO AMBIENTE DE PETRÓLEO E GÁS

Nesta seção são apresentados dois casos de sucesso de implementação de soluções tecnológicas, viabilizados pelos avanços nas tecnologias de I4.0, que ressaltam não somente os benefícios atrelados à utilização, mas a incidência de intensidade tecnológica no setor e a capacidade da Petrobras em se relacionar com diferentes atores. Nessa linha, o primeiro produto apresentado é o premiado Robô Annelida e, na sequência, o também premiado projeto Libra 4.0.

### 6.3.1 ROBÔ ANNELIDA: INSPIRAÇÕES DA NATUREZA FOMENTADA PELA COLABORAÇÃO ATIVA.

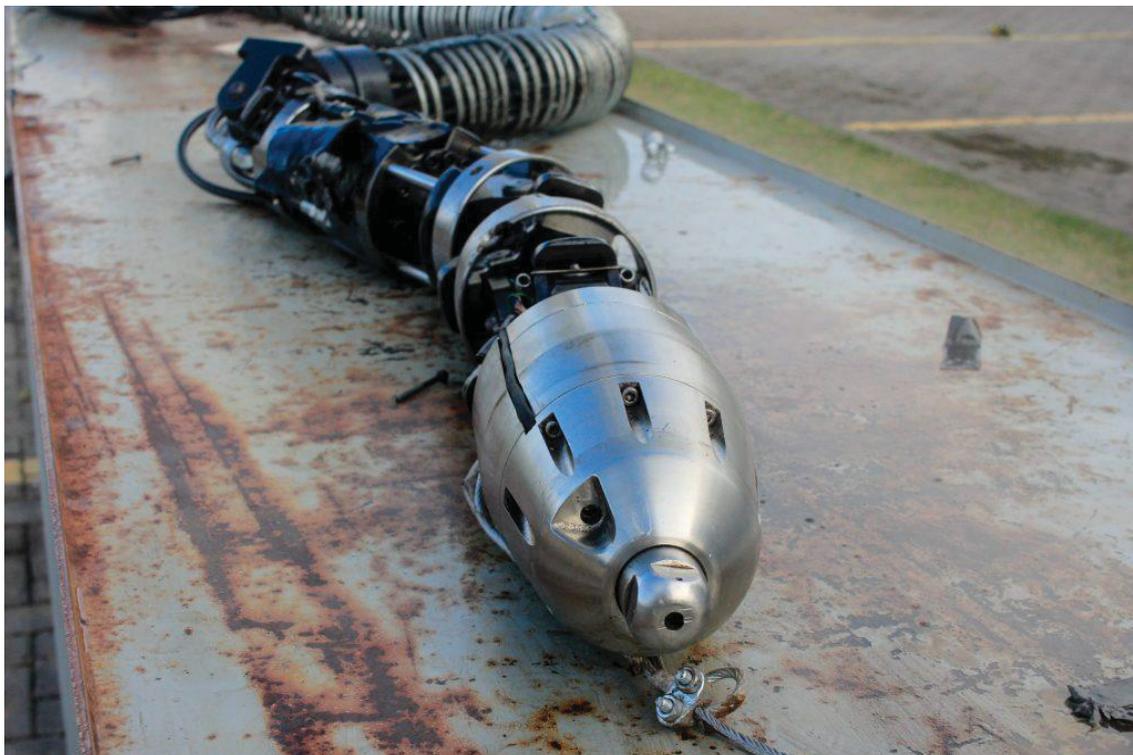
O primeiro projeto apresentado faz uso de inspirações da natureza com a aplicação da robótica a fim de enfrentar um desafio no setor de P&G frente à obstrução de dutos flexíveis em águas profundas que, dependendo das proporções, podem tornar o poço inoperante por período indeterminado. Vencedor do prêmio ANP de Inovação Tecnológica 2020, o robô se destaca no combate direto aos prejuízos associados à ruptura operacional e danos financeiros na casa de centenas de milhões (FIESC, 2022; Petrobras, 2024b; SENAI, 2024).

Diante das primeiras conquistas alcançadas pelo desenvolvimento do robô, a Petrobras se torna a empresa responsável pelo projeto nº 22027-7, iniciado em junho de 2021 e com prazo de 36 meses, com o objetivo de desenvolver ferramentas adicionais e realização de testes em campo. Para isso, a firma de exploração de P&G desembolsou aproximadamente R\$ 48 milhões e contou com a cooperação de diferentes organizações, como a empresa Upsensor, os centros do SENAI de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, com os institutos de inovação em sistemas embarcados, manufatura e polímeros, além de apoio da USP e UFRGS, contando com o suporte dos laboratórios de mecatrônica, controle e elétrica. Além destes, diretamente vinculados ao projeto encomendado pela ANP, nota-se a participação de membros do Centro de Pesquisa, Inovação e Difusão em Ciências Matemáticas Aplicadas à Indústria, do Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da USP e um integrante da UFSCar.

As aspirações da natureza decorrem do entendimento de que movimentos peristálticos, executado pelas minhocas, foram considerados os mais apropriados para a aplicação no projeto, tendo em vista a característica dos dutos, que seriam

objeto de intervenção. Sendo assim, o grupo de pesquisa criou o robô Annelida em homenagem aos anelídeos, representado pela FIGURA 6 (Petrobras, 2024b).

FIGURA 6 - ROBÔ ANNELIDA UTILIZADO PARA A DESOBSTRUÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS EM ÁGUAS PROFUNDAS.



Fonte: SENAI (2024).

A operacionalização do robô é feita a partir de uma sala de controle da plataforma, onde um técnico opera remotamente e de forma semiautônoma no interior do duto, deslocando-o até a obstrução. Diante dela, é realizada uma reação química por meio de um sistema de geração de nitrogênio que viabiliza a remoção de qualquer material que obstrui a passagem de óleo. Além disso, o robô também é utilizado para o processo de limpeza dos dutos e inspeções, todos esses procedimentos podendo ser realizados em linhas de até três quilômetros de profundidade e 15 quilômetros de comprimento (Petrobras, 2024b). Destaca-se que o resultado assumido por meio do desenvolvimento deste robô é de uma economia potencial de bilhões de reais na substituição de dutos danificados e nos lucros cessantes que decorrem da operação (SENAI, 2024).

O projeto do robô Annelida expõe de forma clara os benefícios associados ao emprego destas tecnologias no ambiente de produção da petrolífera. Em novembro de 2023, o projeto nº 23460-9 teve início com participação da USP e apoiado pelo Instituto de Física de São Carlos, com o objetivo de adequar o laboratório de robótica da instituição e facilitar novos desenvolvimentos que possam ser empregados nas instalações *onshore* e *offshore* da Petrobras, o que ressalta o comprometimento da firma com desenvolvimentos futuros no ambiente da robótica.

Esse caso de sucesso demonstra como a Petrobras é capaz de liderar projetos inovadores para o setor, principalmente no âmbito de exploração em águas ultra profundas, por meio da construção de redes colaborativas que atingem diferentes esferas de um sistema de inovação, seja com empresas privadas, com centros de pesquisa e com universidades federais. Por meio da colaboração e maximização de competências específicas, viabiliza-se a entrega de soluções caseiras de alta intensidade tecnológica que se tornam referência para o mercado internacional.

#### 6.3.2 LIBRA 4.0: DESENVOLVIMENTO DE GÊMEOS DIGITAIS POR MEIO DA COLABORAÇÃO INTERNACIONAL.

O segundo estudo de caso de destaque foi o vencedor na categoria Projetos e Pesquisas do Energy Awards 2024, vinculado ao projeto nº 23472-4 e fruto de um investimento superior a R\$ 52 milhões, com data de início em fevereiro de 2023 e prazo estabelecido de 36 meses. Diferentemente do anterior, quando a Petrobras demonstrou a habilidade de estabelecer conexões com diferentes instituições nacionais, neste caso a colaboração foi realizada com diferentes empresas internacionais do setor por meio de um consórcio estabelecido com a TotalEnergies, Shell, CNODC e CNOOC. Além destas, a execução do projeto esteve vinculada à empresa americana Halliburton.

O projeto intitulado Libra 4.0 tem como objetivo o desenvolvimento de uma representação digital do campo de Nero na bacia de Santos, terceiro maior campo de óleo e gás no Brasil, indo desde aspectos relacionados aos reservatórios de hidrocarbonetos até a infraestrutura *topside*, o que viabiliza a otimização e monitoramento da produção, também pelo emprego de inteligência artificial. Desta forma, são destacados três principais benefícios associados ao emprego do gêmeo

digital: acesso à informação, testes de hipótese e sistema de *feedback* (Libra [...], 2024).

Relativamente ao acesso à informação, a representação digital permite que os engenheiros possam acessar dados em tempo real, visualizando componentes que podem ser úteis dentro do processo de gerenciamento da produção. A visualização do gêmeo digital como uma maquete da operação habilita os empregados a testarem hipóteses que podem aumentar a eficiência da plataforma. Por fim, existe um sistema de retroalimentação onde o emprego de inteligência artificial dentro desse ambiente configura um sistema cíclico de melhoramento contínuo. Uma representação de um gêmeo digital é realizada por meio da FIGURA 7.

FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DA TECNOLOGIA DE GÊMEO DIGITAL PARA UMA PLATAFORMA DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS.



FONTE: Petrobras (2024).

O desenvolvimento, implementação e benefícios associados aos gêmeos digitais exaltam o nível de intensidade tecnológica inerente ao ambiente de produção de P&G, o que sustenta a necessidade de que sejam estabelecidas redes

colaborativas entre grandes empresas do setor, não somente para diluir os custos e riscos vinculados ao projeto, mas também para tirar proveito das competências adquiridas por cada uma. Ambos os elementos se tornaram as principais motivações para a construção da solução Libra 4.0, tendo em vista que a rede foi configurada por empresas de diferentes nacionalidades e com notório sucesso nas respectivas histórias de desenvolvimento e competição no setor (Libra [...], 2024).

Tal como se concluiu com respeito ao apoio da Petrobras às tecnologias de robótica, neste caso é destacada a habilidade da empresa em estabelecer relações com seus principais concorrentes em âmbito internacional a fim de tirar proveito de competências específicas e expandir a oferta de soluções tecnológicas desenvolvidas em território nacional. Ressaltando a existência de projetos de alta intensidade tecnológica e de conhecimento, a empresa se apoia em soluções digitais para problemas inerentes ao ambiente de produção que expandem o próprio horizonte de invenções possíveis.

#### 6.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.

No decorrer deste capítulo alguns questionamentos foram respondidos com o objetivo de expor o papel crítico assumido pela Petrobras dentro do sistema de inovação brasileiro. Ultrapassando as funções relacionadas à atividade fim da companhia, ou seja, de atuar no mercado de P&G, o caráter social indissociável da empresa desde sua origem é observado a partir do protagonismo assumido durante as atividades de PD&I iniciadas em território nacional. Sendo assim, o capítulo buscou identificar a atuação da Petrobras dentro das atividades de patenteamento de invenções, o comportamento da companhia diante das novas tecnologias que emergem com o conceito de I4.0, e expôs dois casos que ilustram as observações alcançadas.

Com relação à atuação da Petrobras nas atividades de depósitos de patentes, os dados adquiridos junto ao INPI demonstram que, além de assumir a vanguarda da produção de invenções nacionais, a empresa se habilita a estabelecer relacionamentos com os mais diferentes atores de um sistema nacional de inovação. Não sendo limitado às conexões com universidades, são identificadas redes estabelecidas com centros e institutos de pesquisa, laboratórios e empresas privadas,

sejam elas nacionais ou internacionais. Sendo assim, assume-se que a Petrobras possui um papel indispensável para o sistema nacional de inovação a partir da motivação por buscas de soluções tecnológicas e, paralelo a isso, a habilidade de estabelecer relações com uma grande variedade de atores pertencentes a esse sistema.

Na sequência, o protagonismo identificado dentro do cenário de patentes é transferido para a dimensão de tecnologias associadas ao conceito de I4.0. A partir dos diferentes projetos incentivados por meio da obrigatoriedade de investimento de 1% da receita bruta em projetos de PD&I, nota-se o predomínio de iniciativas de responsabilidade da Petrobras. Dentro destes, foram identificados diferentes núcleos associados às tecnologias de I4.0 que passam pelo desenvolvimento de inteligência artificial, *machine learning*, robótica, entre outros temas transversais. Nesta linha, e se compatibilizando com os métodos estabelecidos nos dados de depósitos de patentes, foram apresentadas as diferentes redes de relacionamentos estabelecidas pela empresa com diferentes atores do sistema nacional, que variam entre universidades, laboratórios, empresas nacionais e estrangeiras. Além de novamente reforçar o papel assumido no estímulo às relações cooperativas, os diferentes projetos destacam a incidência de alta intensidade tecnológica e conhecimento nas atividades de PD&I para o setor de P&G, o que contribui com a sustentabilidade do país em um mercado competitivo e com a capacidade de ofertar soluções tecnológicas com alto valor agregado para o setor.

Por fim, buscando elucidar os resultados alcançados, dois projetos são apresentados em maior detalhe, enaltecendo a capacidade da Petrobras de atuar como a locomotiva do processo inovativo no país. Primeiramente, o robô Annelida se destaca a partir de um projeto de robótica que buscou inspirações na natureza e se apoiou em um ecossistema colaborativo majoritariamente nacional. Diante de parcerias estabelecidas com o SENAI, UFRGS e USP, foi desenvolvido um robô premiado que atua diretamente no processo de desobstrução, limpeza e manutenção de ativos da plataforma, gerando bilhões de reais em economia frente a pausas não programadas e otimização da produção. Além disso, é destacado o comprometimento da empresa em atuar investindo na infraestrutura de pesquisa no país, a fim de fomentar projetos futuros dentro da área da robótica.

No segundo caso de sucesso, o também premiado projeto Libra 4.0 enaltece o emprego de gêmeos digitais e inteligência artificial nos campos de exploração, a fim

de aumentar a eficiência operacional, reduzir os custos de produção e manutenção, e aumentar a rentabilidade do campo. Para isso, a Petrobras foi responsável por um projeto realizado em parceria com outras grandes empresas internacionais no setor, o que demonstra a capacidade da firma em articular redes colaborativas e tirar proveito de competências distintas a fim de desenvolver as pesquisas nacionais.

Em síntese, os resultados alcançados no decorrer do capítulo são indispensáveis para a hipótese de pesquisa desta tese, tendo em vista que se apoiam diretamente na habilidade da Petrobras em atuar como articuladora em um sistema nacional de inovação. A habilidade de estabelecer parcerias nos projetos inventivos e a visão estratégica de fomentar pesquisas associadas às tecnologias emergentes demonstram o comprometimento da companhia para o aumento da autonomia e desenvolvimento da capacidade competitiva nacional frente aos projetos de alta intensidade tecnológica.

## 7 CONCLUSÃO

No decorrer desta tese, foram apresentados elementos que, por meio da evolução de tecnologias integrantes da matriz de informação e comunicação, revitalizam o tema da política industrial. Desta forma, o conceito de I4.0 surge a partir da institucionalização da atuação governamental, com o intento de tirar proveito dessas tecnologias emergentes e com objetivos que se flexibilizam diante do estágio de desenvolvimento dos países implementadores. Diante desse panorama, estabelece-se um objetivo central de avaliar o estágio de maturidade do sistema de inovação digital do setor de petróleo e gás nacional, a fim de sustentar uma política de fomento à produção tecnológica frente aos conceitos de I4.0. Nesse sentido, a hipótese de pesquisa é estabelecida diante da tentativa de identificar na Petrobras a capacidade de atuar como locomotiva para a construção de um ambiente de oferta de soluções tecnológicas para o setor brasileiro e internacional.

A fim de responder ao objetivo geral e à hipótese estabelecida, a construção da tese proporcionou uma evolução conceitual que parte da fundamentação teórica de atuação governamental e se direciona à atuação da Petrobras no setor. Sendo assim, o objetivo específico do capítulo vinculado à temática de política industrial é alcançado mediante a conclusão de que cabe ao Estado a responsabilidade de atuar diretamente no fomento à transformação econômica e produtiva, utilizando-se da instrumentalização de políticas industriais a fim de impelir a atuação diferentes atores dentro de um sistema de produção e inovação. Nesta linha, a temática de sistemas de inovação recebe notoriedade, na medida em que estabelece um ambiente colaborativo onde agentes, sejam mercantis ou não, atuam em direção a um objetivo em comum. Além disso, a revisão sistemática identificou diferentes abordagens sobre política industrial e I4.0. No entanto, observou-se a ausência de estudos que busquem apoiar essas ferramentas políticas em setores com vantagens comparativas para os países, lacuna que esta tese pretende preencher.

Na sequência, é estabelecido o objetivo específico de expor o quadro tecnológico responsável por renovar o interesse público em políticas industriais. Aqui, é demonstrado como o setor de tecnologias da informação e comunicação estabelece uma fronteira tecnológica que tem sido preenchida por novidades na área de aquisição, processamento e comunicação de dados, resultando em um ambiente inteligente, denominado como I4.0. Além disso, observa-se como o tema surge a partir

de uma política industrial alemã, buscando revitalizar o ambiente produtivo, o que se justifica a partir de ameaças na competição internacional. Por fim, uma breve descrição das principais soluções tecnológicas é apresentada, destacando o nível de complexidade e os principais benefícios que podem ser alcançados.

Dando início à exposição de análises descritivas de dados, o objetivo de realizar um mapeamento das condições de oferta de produção e inovação para diferentes países é alcançado mediante a identificação de uma tendência global de desindustrialização, que tem sido diretamente enfrentada por meio destas políticas de I4.0. Sendo assim, é evidenciada a maleabilidade do conceito diante da elaboração e implementação de políticas por países que se encontram em diferentes estágios de desenvolvimento, mas apoiando-se em vantagens comparativas para tirar o máximo de proveito das iniciativas. No caso específico brasileiro, essa ideia é reforçada diante da identificação de baixos esforços inovativos, o que reforça a justificativa de estabelecer uma política apoiada por um setor com notório reconhecimento internacional frente aos níveis de produtividade e inovação alcançados.

Fortalecendo a conexão entre o setor de P&G com a temática de I4.0, o quinto capítulo apresenta a conjuntura atual do setor, os benefícios presumidos e alcançados a partir da introdução dessas tecnologias e destaca a importância da Petrobras em dirigir políticas para o setor, tendo em vista a capacidade de gerar efeitos de transbordamento para as mais diversas dimensões da economia brasileira. Nesta linha, os objetivos são abordados com a identificação de desafios estabelecidos, que impõem a necessidade de disciplina de capital às empresas do setor frente às incertezas macroeconômicas, geopolíticas e regulatórias. Além disso, as pressões relacionadas à transição energética e foco nos consumidores exaltam a necessidade de implementar tecnologias que possam otimizar a produção e facilitar a tomada de decisão. Desta forma, as tecnologias digitais são almejadas a partir da capacidade de atuar nos mais diferentes âmbitos do ciclo de produção, seja nos estágios de exploração, desenvolvimento, produção, logística ou refino. Em seguida, concentrando as análises ao setor brasileiro, destaca-se o papel estratégico da Petrobras, enraizado desde sua origem, sendo responsável pela independência produtiva e científica nacional em um setor estratégico. Assim, nota-se um protagonismo frente a uma conjuntura marcada pelo aumento da penetração de empresas estrangeiras, que estabelecem janelas de oportunidade frente à necessidade de investimentos em PD&I estimuladas pela atuação da ANP. Com isso,

os planejamentos estratégicos recentes da Petrobras, que destacam o papel assumido de liderar inúmeros projetos de PD&I, com foco estabelecido em tecnologias digitais, reforçam a ideia de que cabe à empresa o protagonismo de fomentar o ambiente inovativo do país.

Por fim, o sexto capítulo engloba os demais resultados alcançados e se centraliza na capacidade da Petrobras de atuar como locomotiva na oferta de soluções tecnológicas vinculadas à temática de I4.0. Para isso, discute-se como a empresa possui o protagonismo no âmbito científico a partir da liderança no número de depósito de patentes e, além disso, a capacidade de estabelecer relacionamentos com uma grande variedade de atores, que provêm de empresas, universidades, centros de pesquisa e laboratórios. O mesmo protagonismo e liderança é assumido frente aos projetos encomendados pela ANP, que destaca novamente a capacidade da empresa em desencadear relacionamentos com toda a infraestrutura científica do país em projetos de I4.0, com foco em tecnologias transversais, de inteligência artificial, *machine learning* e robótica. Por fim, destacando a intensidade tecnológica e de conhecimento no setor de P&G, são apresentados dois estudos de caso que evidenciam os resultados alcançados. O primeiro aborda as parcerias nacionais estabelecidas para o desenvolvimento do Robô Annelida, enquanto o segundo explora as colaborações internacionais no projeto Libra 4.0, ambos reforçando o protagonismo da Petrobras e sua capacidade de gerar efeitos de transbordamento.

Em síntese, a hipótese de pesquisa se verifica na medida em que se identifica na Petrobras a capacidade de atuar como locomotiva na oferta de soluções tecnológicas de alta complexidade para o setor de P&G brasileiro e internacional. Esse resultado é sustentado pela conjuntura do setor, que demanda essas inovações a fim de enfrentar os desafios observados, e também pela vantagem comparativa assumida pela empresa, principalmente no ambiente marítimo, onde estabelece uma infraestrutura científica e produtiva de ponta e, paralelo a isso, enaltece a sua capacidade de estabelecer conexões com os mais diversos atores do ambiente científico presente no país.

Diante das diversas políticas implementadas por países sob a ótica de I4.0, o Brasil se destaca pela oportunidade de promover esse conceito em um setor com reconhecimento internacional. Nesse contexto, a própria iniciativa da Nova Indústria Brasil já define missões estratégicas focadas na transformação digital da indústria e na transformação energética. Assim, a contribuição desta tese é apontar a Petrobras

como um agente central para impulsionar esses instrumentos e viabilizar a disseminação dos benefícios em toda a estrutura nacional. Com isso, os efeitos de transbordamento têm o potencial de impulsionar o desenvolvimento científico e industrial, favorecendo a aspiração de *catching-up* econômico e tecnológico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL-HAMID, A.-Q.; ALI, M. H.; OSMAN, L. H.; TSENG, M.-L. The drivers of industry 4.0 in a circular economy: The palm oil industry in Malaysia. **Journal of Cleaner Production**, v. 324, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85116552070&doi=10.1016%2fj.jclepro.2021.129216&partnerID=40&md5=e526386a238e0d7112e1923b76e578be>. Acesso em: 10/02/2025.
- ACCENTURE. **How aligning security and the business creates cyber resilience State of Cybersecurity Resilience 2021**. 2021.
- AGHION, P.; BOULANGER, J.; COHEN, E. **Rethinking industrial policy**. 2011.
- AIGINGER, K.; RODRIK, D. Rebirth of Industrial Policy and an Agenda for the Twenty-First Century. **Journal of Industry, Competition and Trade**, v. 20, n. 2, p. 189–207, 2020. Journal of Industry, Competition and Trade.
- ALEXANDROVA, T.; PRUDSKY, V. G. On the conceptual model of oil and gas business transformation in the transitional conditions to the Industry 4.0., 2019.
- AL-FUQAHA, A.; GUIZANI, M.; MOHAMMADI, M.; ALEDHARI, M.; AYYASH, M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- AL-SAQAF, W.; SEIDLER, N. Blockchain technology for social impact: opportunities and challenges ahead. **Journal of Cyber Policy**, v. 2, n. 3, p. 338–354, 2017. Informa UK Limited.
- ANDERSSON, J.; BERG, A.; HEDRICH, S.; et al. **Is apparel manufacturing coming home?** London, 2018.
- ANDREONI, A.; CHANG, H. J. Industrial policy and the future of manufacturing. **Economia e Politica Industriale**, v. 43, n. 4, p. 491–502, 2016. Springer International Publishing.
- ANP. **Relatório anual de exploração 2023**. 2023.
- ARBIX, G.; MIRANDA, Z.; TOLEDO, D.; ZANCUL, E. Made in China 2025 e Industrie 4.0: A difícil transição chinesa do catching up à economia puxada pela inovação. **Tempo Social**, v. 30, n. 3, p. 143–170, 2018.

- ASHEIM, B. T.; GERTLER, M. S. The Geography of Innovation: Regional Innovation Systems. In: R. R. Nelson; D. C. Mowery; J. Fagerberg (Orgs.); **The Oxford Handbook of Innovation**. p.291–317, 2006. Oxford University Press.
- ASHEIM, B. T.; SMITH, H. L.; OUGHTON, C. Regional Innovation Systems: Theory, empirics and policy. **Regional Studies**, v. 45, n. 7, p. 875–891, 2011.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- BAILIE, B.; CHINN, M. Effectively harnessing data to navigate the new normal: Overcoming the barriers of digital adoption. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. **Anais...** . v. 1, p.12–21, 2018. Offshore Technology Conference. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85050675793&doi=10.4043%2f28699-ms&partnerID=40&md5=49ba471777de2047d1eefb86482441e0>. Acesso em: 10/02/2025.
- BAKER, P. M. A.; GASPARD, H.; ZHU, J. A. Industry 4.0/Digitalization and networks of innovation in the North American regional context. **European Planning Studies**, v. 29, n. 9, p. 1708–1722, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111869270&doi=10.1080%2f09654313.2021.1963053&partnerID=40&md5=8b307e43af3204a27a7793b6ffa23be2>. Acesso em: 10/02/2025.
- BARATEIRO, C. E. R. B.; MAKAROVSKY, C.; RODRIGUES DE FARIAS FILHO, J. Fiscal liquid and gaseous hydrocarbons flow and volume measurement: Improved reliability and performance paradigms by harnessing for fourth industrial revolution. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 74, 2020. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85086890768&doi=10.1016%2fj.flowmeasinst.2020.101773&partnerID=40&md5=bc5173fe0e4ecb5b8509ca5acf111c05>. Acesso em: 10/02/2025.
- BARZOTTO, M.; CORRADINI, C.; FAI, F.; LABORY, S.; TOMLINSON, P. R. Smart specialisation, Industry 4.0 and lagging regions: some directions for policy. **Regional Studies, Regional Science**, v. 7, n. 1, p. 318–332, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089955824&doi=10.1080%2f21681376.2020.1803124&partnerID=40&md5=a5409c3cd74deaaa482802cacfbfeb75>. Acesso em: 10/02/2025.

- BAZZO, K. DE C.; PORTO, G. S. Redes de cooperação da Petrobras: um mapeamento a partir das patentes. In: L. M. Turchi; F. De Negri; J. A. De Negri (Orgs.); **Impactos tecnológicos das parcerias da Petrobras com Universidades, Centros de Pesquisa e Firms Brasileiras**. 1º ed, v. 1, 2013. Brasília: IPEA.
- DE BEST, L.; VAN DEN BERG, F. Smart Fields - Sustaining and Accelerating Benefits from Intelligent Fields. All Days. **Anais...**, 2012. SPE.
- BETTIOL, M.; CAPESTRO, M.; DI MARIA, E.; GANAU, R. Is this time different? How Industry 4.0 affects firms' labor productivity. **SMALL BUSINESS ECONOMICS**, 2023.
- BONVILLIAN, W. B. The new model innovation agencies: An overview. **Science and Public Policy**, v. 41, n. 4, p. 425–437, 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84905689139&doi=10.1093%2fscipol%2fsct059&partnerID=40&md5=2dcd339e5f22b825f00979bf1a589c1d>. Acesso em: 10/02/2025.
- BOROWICZ, A. Does the New Industrial Strategy for Europe Follow the Path of the Concept of Industry 4.0? **STUDIA EUROPEJSKIE-STUDIES IN EUROPEAN AFFAIRS**, v. 25, n. 1, p. 85–102, 2021.
- BRAÑA, F.-J. A fourth industrial revolution? Digital transformation, labor and work organization: a view from Spain. **Journal of Industrial and Business Economics**, v. 46, n. 3, p. 415–430, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85068008482&doi=10.1007%2fs40812-019-00122-0&partnerID=40&md5=4bdab5892a1c2b29200dd1e9d8561a53>. Acesso em: 10/02/2025.
- BRESSER-PEREIRA, L. C.; ARBACHE, J.; PAULA, L. F. DE; MARCONI, N. A reconstrução da indústria brasileira: a conexão entre o regime macroeconômico. **Revista de Economia Política**, v. 36, n. 3, p. 493–513, 2016.
- BRIXNER, C.; ISAAK, P.; MOCHI, S.; et al. Back to the future. Is industry 4.0 a new tecno-organizational paradigm? Implications for Latin American countries. **Economics of Innovation and New Technology**, v. 29, n. 7, p. 705–719, 2020. Routledge.

- BRODNY, J.; TUTAK, M. Assessing the level of digital maturity in the Three Seas Initiative countries. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 190, 2023.
- BROWNLOW, G.; BUDD, L. Place-based industrial strategies in the context of the Northern Ireland Protocol. **REGIONAL STUDIES**, 2023.
- BRUNO, F.; BARBIERI, L.; MARINO, E.; et al. An augmented reality tool to detect and annotate design variations in an Industry 4.0 approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 1–4, p. 875–887, 2019. Springer London. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85071095088&doi=10.1007%2fs00170-019-04254-4&partnerID=40&md5=f823c34ccef0a3674625c78c84d12f3e>. Acesso em: 10/02/2025.
- BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. **The second machine age: work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies**. 1º ed. New York: W.W. Norton & Company, 2016.
- BUTOLLO, F. Digitalization and the geographies of production: Towards reshoring or global fragmentation? **Competition and Change**, v. 25, n. 2, p. 259–278, 2021. SAGE Publications Inc.
- CAREY, J.; MORDUE, G. Why Industry 4.0 is not enhancing national and regional resiliency in the global automotive industry. **International Journal of Automotive Technology and Management**, v. 22, n. 1, p. 52–81, 2022.
- CASALET, M.; STEZANO, F. The progress of digitalisation in Mexico: Effects on the institutional structure. **International Journal of Business Innovation and Research**, v. 24, n. 3, p. 339–363, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102423137&doi=10.1504%2fIJBIR.2021.113514&partnerID=40&md5=424da2d97a128015ed7e89228ef295e0>. Acesso em: 10/02/2025.
- CEZARINO, L. O.; LIBONI, L. B.; OLIVEIRA STEFANELLI, N.; OLIVEIRA, B. G.; STOCCO, L. C. Diving into emerging economies bottleneck: Industry 4.0 and implications for circular economy. **Management Decision**, v. 59, n. 8, p. 1841–1862, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85065534137&doi=10.1108%2fMD-10-2018->

[1084&partnerID=40&md5=bf9f3fa725ff220597834c341efd452a](https://doi.org/10.1084&partnerID=40&md5=bf9f3fa725ff220597834c341efd452a). Acesso em: 10/02/2025.

- CHANG, H. J. **The political economy of industrial policy**. 2º ed. Macmillan Press, 1996.
- CHANG, H. J. An institutionalist perspective on the role of the state: towards an institutionalist political economy. In: L. Burlamaqui; A. C. Castro; H. J. Chang (Orgs.); **Institutions and the role of the State**. p.3–26, 2000. Edward Elgar.
- CHANG, H. J. **Chutando a escada: a estratégia do desenvolvimento em perspectiva histórica**. 1º ed. São Paulo: UNESP, 2004.
- CHANG, H. J.; ANDREONI, A. Bringing Production Back into Development: An introduction. **European Journal of Development Research**, v. 33, n. 2, p. 165–178, 2021. Palgrave Macmillan UK. Disponível em: <<https://doi.org/10.1057/s41287-021-00359-3>>
- CHAO, B.; PARK, C.; STAGER, J. **The Cost of Connectivity 2020**. 2020.
- CHUNG, J.-E.; OH, S.-G.; MOON, H.-C. What drives SMEs to adopt smart technologies in Korea? Focusing on technological factors. **Technology in Society**, v. 71, 2022.
- CHUNG, S.; CHUNG, J. The Korean approach to Industry 4.0: the 4th Industrial Revolution from regional perspectives. **European Planning Studies**, v. 29, n. 9, p. 1690–1707, 2021. Routledge.
- CIMOLI, M.; DOSI, G.; NELSON, R. R.; STIGLITZ, J. Instituições e Políticas Moldando o Desenvolvimento Industrial., v. 6, n. 1, p. 55–85, 2007.
- CLEAVE, E.; ARKU, G.; CHATWIN, M. Cities' economic development efforts in a changing global economy: content analysis of economic development plans in Ontario, Canada. **Area**, v. 49, n. 3, p. 359–368, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85017440936&doi=10.1111%2farea.12335&partnerID=40&md5=21429baa11794902db3f2795022fb1c3>. Acesso em: 10/02/2025.
- CUGNO, M.; CASTAGNOLI, R.; BÜCHI, G. Openness to Industry 4.0 and performance: The impact of barriers and incentives. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 168, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102966105&doi=10.1016%2fj.techfore.2021.120756&partnerID=40&md5=7cad8e867aef3d5a101fd62e2aec268f>. Acesso em: 10/02/2025.

- CUNHA, E. P.; MENDES, G. P. A. State Capacities of the Political Management of Technological Innovation in the Context of Industry 4.0 in Brazil. **ADMINISTRACAO PUBLICA E GESTAO SOCIAL**, v. 14, n. 3, 2022.
- CUNHA, E. P.; MENDES, G. P. A.; FERREIRA, R. V. Interaction and Autonomy between State and Capital: An Analysis Based on the Members of the Brazilian Chamber of Industry 4.0. **ADMINISTRACAO PUBLICA E GESTAO SOCIAL**, v. 15, n. 3, 2023.
- DAUDT, G.; WILLCOX, L. D. Critical thoughts on advanced manufacturing: the experiences of Germany and USA. **Revista de Gestão**, v. 25, n. 2, p. 178–193, 2018.
- DAY, C. J.; MERKERT, R. Unlocking public procurement as a tool for place-based industrial strategy. **Regional Studies**, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85112740677&doi=10.1080%2f00343404.2021.1956682&partnerID=40&md5=800910aeedb15b9435d3436e8de5f074>. Acesso em: 10/02/2025.
- DEAN, M.; RAINNIE, A.; STANFORD, J.; NAHUM, D. Industrial policy-making after COVID-19: Manufacturing, innovation and sustainability. **Economic and Labour Relations Review**, v. 32, n. 2, p. 283–303, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106688022&doi=10.1177%2f10353046211014755&partnerID=40&md5=19979f20d3cba2ae3abd0fa92a3c5162>. Acesso em: 10/02/2025.
- DELOITTE. **2023 Oil and Gas Industry Outlook**. 2022.
- DELOITTE. **2025 Oil and Gas Industry Outlook**. 2024.
- DEVOLD, H.; MOEN, T.-E. Digitalization's role in shaping the new energy landscape. Society of Petroleum Engineers - SPE Offshore Europe Conference and Exhibition 2019, OE 2019. **Anais...**, 2019. Society of Petroleum Engineers. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084013851&doi=10.2118%2f195764-MS&partnerID=40&md5=18752555ca09ad86158755055be976b7>. Acesso em: 10/02/2025.
- DEZHINA, I.; PONOMAREV, A.; FROLOV, A. Advanced manufacturing technologies in russia: Outlines of a new policy. **Foresight Russia**, v. 9, n. 1, p. 20–31, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946160122&doi=10.17323%2f1995->

[459X.2015.1.20.31&partnerID=40&md5=2dd425bd1c19263b2d88b5248ea4788](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-459X.2015.1.20.31&partnerID=40&md5=2dd425bd1c19263b2d88b5248ea4788)

8. Acesso em: 10/02/2025.

- DHAMIJA, P. South Africa in the era of Industry 4.0: An Insightful Investigation. **Scientometrics**, v. 127, n. 9, p. 5083–5110, 2022. Akademiai Kiado ZRt. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85136172518&doi=10.1007%2fs11192-022-04461-z&partnerID=40&md5=644eddb02aa926cab82c8c4215a215d0>. Acesso em: 10/02/2025.
- DIEGUES, A. C.; ROSELINO, J. E. **Indústria 4.0 e as redes globais de produção e inovação em serviços intensivos em tecnologia: uma tipologia e apontamentos de política industrial e tecnológica**. Campinas, 2019.
- DIEGUES, A. C.; ROSELINO, J. E. Industrial policy, techno-nationalism and Industry 4.0: China-USA technology war | Política industrial, tecnonacionalismo e Indústria 4.0: a guerra tecnológica entre China e EUA. **Brazilian Journal of Political Economy**, v. 43, n. 1, p. 5–25, 2023.
- DIEGUES, A. C.; ROSELINO, J. E.; FERREIRA, M. J. B.; GARCIA, R. C. THE RENEWAL OF THE DEBATE ON INDUSTRIAL POLICY: LIMITATIONS AND SUGGESTION FOR A NORMATIVE TYPOLOGY BASED ON THE DIALOGUE BETWEEN NEO-SCHUMPETERIANS AND DEVELOPMENTALISTS | A RETOMADA DO DEBATE SOBRE POLÍTICA INDUSTRIAL: LIMITAÇÕES E UMA SUGESTÃO DE TIPOL. **Revista de Economia Contemporanea**, v. 27, 2023.
- VON DIETRICH, P.; GARCIA, M. H. New challenges for women workers in Brazil facing the wave of Industry 4.0 technologies. **Gender and Development**, v. 30, n. 3, p. 459–476, 2022.
- DOSI, G. Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation. **Journal of Economic Literature**, v. 26, n. 3, p. 1120–1171, 1988. American Economic Association. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2726526>>
- DURAZZI, N. Engineering the expansion of higher education: High skills, advanced manufacturing, and the knowledge economy. **Regulation and Governance**, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85115726270&doi=10.1111%2frego.12439&partnerID=40&md5=8371ee43e45537c089749ad64ba5e9e8>. Acesso em: 10/02/2025.

- DYBA, W.; DI MARIA, E.; CHIARVESIO, M. Actions fostering the adoption of Industry 4.0 technologies in manufacturing companies in European regions | Acciones de fomento de la adopción de tecnologías Industria 4.0 en empresas manufactureras de regiones europeas. **Investigaciones Regionales**, v. 2022, n. 53, p. 27–46, 2022.
- ELIJAH, O.; LING, P. A.; RAHIM, S. K. A.; et al. A Survey on Industry 4.0 for the Oil and Gas Industry: Upstream Sector. **IEEE Access**, 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85118259665&doi=10.1109%2fACCESS.2021.3121302&partnerID=40&md5=bdd3f59aaefd7856e30e9cbe3ec82a92>. Acesso em: 10/02/2025.
- EQUINOR. Digitalisation driving value creation. Disponível em: <https://www.equinor.com/news/archive/digitalisation-driving-value-creation>. Acesso em: 8/5/2023.
- ETZKOWITZ, H. **The Triple Helix: University-industry-government innovation in action**. New York: Taylor & Francis e-Library, 2008.
- EUROPEAN COMMISSION. **Germany: Industrie 4.0**. 2017.
- EVANS, P. **Embedded autonomy: states and industrial transformation**. 1º ed. New Jersey: Princeton University Press, 1995.
- FIESC. Robô Annelida imita movimento das minhocas para a limpeza de dutos do pré-sal. Disponível em: <https://fiesc.com.br/pt-br/imprensa/robo-annelida-imita-movimento-das-minhocas-para-limpeza-de-dutos-do-pre-sal>. Acesso em 10/02/2025.
- DE FIGUEIREDO, A. R.; GRAGLIA, M. A. V. INDUSTRY 4.0 IN BRAZIL AND THE CHALLENGES OF THE PRODUCTIVITY OF THE ECONOMY. **RISUS-JOURNAL ON INNOVATION AND SUSTAINABILITY**, v. 12, n. 4, p. 13–28, 2021.
- FIORAVANTE, D. G.; AGUIRRE, L. A cooperação entre universidades e empresas e os fornecedores da Petrobras. In: L. M. Turchi; F. De Negri; J. A. De Negri (Orgs.); **Impactos tecnológicos das parcerias da Petrobras com Universidades, Centros de Pesquisa e Firms Brasileiras**. v. 1, 2013. Brasília: IPEA.
- FRANSMAN, M. **The New ICT Ecosystem: Implications for Policy and Regulation**. 1º ed. New York: Cambridge University Press, 2010.

- FREEMAN, C. Japan: a new national system of innovation? In: G. Dosi; C. Freeman; R. R. Nelson; G. Silverberg; L. Soete (Orgs.); **Technical Change and Economic Theory**, 1988. Pisa: LEM Book Series.
- FROLOV, V. G.; KAMINCHENKO, D. I.; KOVYLKIN, D. Y.; POPOVA, J. A.; PAVLOVA, A. A. The main economic factors of sustainable manufacturing within the industrial policy concept of industry 4.0. **Academy of Strategic Management Journal**, v. 16, n. Special issue 2, 2017a. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85040636216&partnerID=40&md5=549ecb554ec78107285d1bd6c0be52e3>. Acesso em: 10/02/2025.
- FROLOV, V. G.; KAMINCHENKO, D. I.; KOVYLKIN, D. Y.; POPOVA, J. A.; PAVLOVA, A. A. The main economic factors of sustainable manufacturing within the industrial policy concept of industry 4.0. **Academy of Strategic Management Journal**, v. 16, n. Special is, 2017b.
- GANDOMI, A.; HAIDER, M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. **International Journal of Information Management**, v. 35, n. 2, p. 137–144, 2015. Elsevier Ltd.
- GEORGIU, K.; MITTAS, N.; MAMALIKIDIS, I.; MITROPOULOS, A.; ANGELIS, L. Analyzing the Roles and Competence Demand for Digitalization in the Oil and Gas 4.0 Era. **IEEE Access**, v. 9, p. 151306–151326, 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85118653477&doi=10.1109%2fACCESS.2021.3124909&partnerID=40&md5=c124bb780b0a5e3a477c279d3d1e1966>. Acesso em: 10/02/2025.
- GHADIMI, P.; DONNELLY, O.; SAR, K.; WANG, C.; AZADNIA, A. H. The successful implementation of industry 4.0 in manufacturing: An analysis and prioritization of risks in Irish industry. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 175, 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85120357421&doi=10.1016%2fj.techfore.2021.121394&partnerID=40&md5=d8b3ae6c225b55ff92b4cbdb9f2fdf3c>. Acesso em: 10/02/2025.
- GHOBAKHLOO, M. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 29, n. 6, p. 910–936, 2018. Emerald Group Holdings Ltd.

- GOONERATNE, C. P.; MAGANA-MORA, A.; CONTRERAS OTALVORA, W.; et al. Drilling in the Fourth Industrial Revolution-Vision and Challenges. **IEEE Engineering Management Review**, v. 48, n. 4, p. 144–159, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85087075187&doi=10.1109%2fEMR.2020.2999420&partnerID=40&md5=1c6955596036971f9187c06e2884edda>. Acesso em: 10/02/2025.
- GORECKY, D.; SCHMITT, M.; LOSKYLL, M.; ZUHLKE, D. **Human-Machine Interaction in the Industry 4.0 Era**. Kaiserslautern, 2014.
- GOVERNO FEDERAL. Plano de Ação para a Neointustrialização 2024-2026., 2024. Disponível em: [https://agencia.petrobras.com.br/documents/d/agencia/evento\\_coletiva\\_final\\_ajuste\\_1](https://agencia.petrobras.com.br/documents/d/agencia/evento_coletiva_final_ajuste_1). Acesso em: 29/12/2024.
- GRODACH, C.; GIBSON, C. Advancing Manufacturing?: Blinkered Visions in U.S. and Australian Urban Policy. **Urban Policy and Research**, v. 37, n. 3, p. 279–293, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85059075150&doi=10.1080%2f08111146.2018.1556633&partnerID=40&md5=94cb6d8fbfedf1c1d6e70ae0de2b79cd>. Acesso em: 10/02/2025.
- GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.
- GURIANOV, A.; KATASHOV, A.; OVCHINNIKOV, K.; et al. Big data in field development projects. Society of Petroleum Engineers - SPE Russian Petroleum Technology Conference 2019, RPTC 2019. **Anais...**, 2020. Society of Petroleum Engineers. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084165717&partnerID=40&md5=ed9e63a37e1143ef8e64817ff49c712e>. Acesso em: 10/02/2025.
- HAUSMANN, R.; HWANG, J.; RODRIK, D. **What you export matters**. Cambridge, 2005.
- HEMPHILL, T. A. Policy debate: The US advanced manufacturing initiative: Will it be implemented as an innovation - or industrial - policy? **Innovation: Management, Policy and Practice**, v. 16, n. 1, p. 67–70, 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[84899879098&doi=10.5172%2fimpp.2014.16.1.67&partnerID=40&md5=4f7b1ec4884f8a9bcb63af1dd06c11be](https://doi.org/10.5172%2fimpp.2014.16.1.67&partnerID=40&md5=4f7b1ec4884f8a9bcb63af1dd06c11be). Acesso em: 10/02/2025.

HERVÁS-OLIVER, J.-L. Industry 4.0 in industrial districts: regional innovation policy for the Toy Valley district in Spain. **Regional Studies**, v. 55, n. 10–11, p. 1775–1786, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[85111651581&doi=10.1080%2f00343404.2021.1939861&partnerID=40&md5=222fbb9b911738707973f06bdc6ebd8d](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111651581&doi=10.1080%2f00343404.2021.1939861&partnerID=40&md5=222fbb9b911738707973f06bdc6ebd8d). Acesso em: 10/02/2025.

HERVAS-OLIVER, J.-L.; ESTELLES-MIGUEL, S.; MALLOL-GASCH, G.; BOIX-PALOMERO, J. A place-based policy for promoting Industry 4.0: the case of the Castellon ceramic tile district. **European Planning Studies**, v. 27, n. 9, p. 1838–1856, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[85069906284&doi=10.1080%2f09654313.2019.1642855&partnerID=40&md5=566b3a7e55ddefc453ef73adbe3700fa](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85069906284&doi=10.1080%2f09654313.2019.1642855&partnerID=40&md5=566b3a7e55ddefc453ef73adbe3700fa). Acesso em: 10/02/2025.

HERVAS-OLIVER, J.-L.; GONZALEZ-ALCAIDE, G.; ROJAS-ALVARADO, R.; MONTO-MOMPO, S. Emerging regional innovation policies for industry 4.0: analyzing the digital innovation hub program in European regions. **Competitiveness Review**, v. 31, n. 1, p. 106–129, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[85086576915&doi=10.1108%2fCR-12-2019-0159&partnerID=40&md5=7c1a9c0b301adc975b9637d6a0eb848c](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85086576915&doi=10.1108%2fCR-12-2019-0159&partnerID=40&md5=7c1a9c0b301adc975b9637d6a0eb848c). Acesso em: 10/02/2025.

HIRSCH-KREINSEN, H. “Industry 4.0” as Promising Technology: Emergence, Semantics and Ambivalent Character. Soziologisches Arbeitspapier. **Anais...**, 2016.

JANKOWSKA, B.; MIŃSKA-STRUZIK, E.; BARTOSIK-PURGAT, M.; GÖTZ, M.; OLEJNIK, I. Industry 4.0 technologies adoption: barriers and their impact on Polish companies’ innovation performance. **European Planning Studies**, v. 31, n. 5, p. 1029–1049, 2023.

JAZDI, N. **Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0**. 2014.

JESSOP, B. **The state: past, present, future**. 1º ed. Cambridge: Polity Press, 2016.

- KAGERMANN, H. Change through digitalization - value creation in the age of industry 4.0. In: H. Albach; H. Meffert; A. Pinkwart; R. Reichwald (Orgs.); **Management of Permanent Change**. 1º ed, p.23–45, 2015. New York: Springer Gabler.
- KANG, H. S.; LEE, J. Y.; CHOI, S.; et al. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, v. 3, n. 1, p. 111–128, 2016. Korean Society for Precision Engineering.
- KAPLAN, A.; HAENLEIN, M. Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. **Business Horizons**, 1. jan. 2019. Elsevier Ltd.
- KIM, L. **Da imitação à inovação**. 1º ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2005.
- KIM, S. S.; CHOI, Y. S. The Innovative Platform Programme in South Korea: Economic Policies in Innovation-Driven Growth. **FORESIGHT AND STI GOVERNANCE**, v. 13, n. 3, p. 13–22, 2019. Disponível em: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. Acesso em: 10/02/2025.
- KLOC, A. E. **Oportunidades tecnológicas a partir da indústria 4.0: um estudo sobre as potencialidades e capacidades no sistema setorial de inovação em celulose e papel**, 2022. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- KOLIAS, C.; KAMBOURAKIS, G.; STAVROU, A.; VOAS, J. **DDoS in the IoT: Mirai and Other Botnets**. 2017.
- KUO, C. C.; SHYU, J. Z.; DING, K. Industrial revitalization via industry 4.0 – A comparative policy analysis among China, Germany and the USA. **Global Transitions**, v. 1, p. 3–14, 2019. KeAi Communications Co.
- KUO, C.-C.; SHYU, J. Z.; DING, K. Industrial revitalization via industry 4.0 – A comparative policy analysis among China, Germany and the USA. **Global Transitions**, v. 1, p. 3–14, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079770388&doi=10.1016%2fj.glt.2018.12.001&partnerID=40&md5=44fb0c462226358e8b2f15269ff01fec>. Acesso em: 10/02/2025.
- LABORY, S.; BIANCHI, P. Regional industrial policy in times of big disruption: building dynamic capabilities in regions. **Regional Studies**, v. 55, n. 10–11, p. 1829–1838, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[85110019680&doi=10.1080%2f00343404.2021.1928043&partnerID=40&md5=6c6ef265dbe365edbf5f5cbef71ee89a](https://doi.org/10.1080%2f00343404.2021.1928043&partnerID=40&md5=6c6ef265dbe365edbf5f5cbef71ee89a). Acesso em: 10/02/2025.

- LANEY, D. **3D Data Management: Controlling Data Volume, Velocity, and Variety**. 2001.
- LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H. G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. **Business and Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014. Gabler Verlag.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18–23, 2015. Elsevier Ltd.
- LI, C.; QIU, Z.; FU, T. The role of policy perceptions and entrepreneurs' preferences in firms' response to industry 4.0: The case of Chinese firms. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 20, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85117281787&doi=10.3390%2fsu132011352&partnerID=40&md5=0f843875e053e20f0c56ffff4bbba725>. Acesso em: 10/02/2025.
- LI, J. Analyzing “Made in China 2025” Under the Background of “Industry 4.0”. **Proceedings of the 23rd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2016**. p.169–171, 2017. Atlantis Press.
- LI, J.; POGODIN, S. “Made in China 2025”: China experience in Industry 4.0. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais....** v. 497, 2019. Institute of Physics Publishing.
- LIBRA 4.0: inovação e sustentabilidade na transformação do setor de Óleo e Gás. [Locução de]: Hudson Mendonça. [Participação de]: Alexandre Emerick, Leonardo Tedeschi, Sergio Sousa. [S. l.]: MIT Technology Review Brasil, 4 set. 2024. Podcast. Disponível em: <https://open.spotify.com/episode/6skytXJE2CzY3lwzII0jVk?si=9feef34e466543fc>. Acesso em 20 dez. 2024.
- LIM, C.; LEE, J. H.; SONTNIKORN, P.; VONGBUYONG, S. Frugal innovation and leapfrogging innovation approach to the industry 4.0 challenge for a developing country. **Asian Journal of Technology Innovation**, p. 1–22, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85087644387&doi=10.1080%2f19761597.2020.1786707&partnerID=40&md5=c36769dd1447326aae69bd22eee0cb16>. Acesso em: 10/02/2025.

- LIN, K. C.; SHYU, J. Z.; DING, K. A cross-strait comparison of innovation policy under industry 4.0 and sustainability development transition. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 5, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019124287&doi=10.3390%2fsu9050786&partnerID=40&md5=c1f1eeabb91fd8552711e7b66718277>. Acesso em: 10/02/2025.
- LOPES, M. C. **POLÍTICA INDUSTRIAL E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO: UMA ANÁLISE DO SISTEMA SETORIAL DE INOVAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO**, 2019. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- LU, C.; CHANG, F.; RONG, K.; SHI, Y.; YU, X. Deprecated in policy, abundant in market? The frugal innovation of Chinese low-speed EV industry. **International Journal of Production Economics**, v. 225, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076827081&doi=10.1016%2fj.ijpe.2019.107583&partnerID=40&md5=99869ff2941c5402d907d84044fd377>. Acesso em: 10/02/2025.
- LU, H.; GUO, L.; AZIMI, M.; HUANG, K. Oil and Gas 4.0 era: A systematic review and outlook. **Computers in Industry**, v. 111, p. 68–90, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361519302064>. Acesso em: 10/02/2025.
- LUND, H. B.; VILDÅSEN, S. S. The influence of Industry 4.0 narratives on regional path development. **Regional Studies, Regional Science**, v. 9, n. 1, p. 82–92, 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124307140&doi=10.1080%2f21681376.2022.2029552&partnerID=40&md5=6c27181df07d5271b4e25768d9bcc506>. Acesso em: 10/02/2025.
- MAROUFKHANI, P.; DESOUZA, K. C.; PERRONS, R. K.; IRANMANESH, M. Digital transformation in the resource and energy sectors: A systematic review. **Resources Policy**, v. 76, 2022. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85125541477&doi=10.1016%2fj.resourpol.2022.102622&partnerID=40&md5=4524b96899830700c73685f38184041b>. Acesso em: 10/02/2025.
- MATKOVSKAYA, Y. S.; VECHKINZOVA, E.; PETRENKO, Y.; STEBLYAKOVA, L. Problems of innovative development of oil companies: Actual state, forecast and directions for overcoming the prolonged innovation pause. **Energies**, v. 14, n. 4,

2021. MDPI AG. Disponível em:  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106266931&doi=10.3390%2fen14040837&partnerID=40&md5=4794f9983733b742c98e462a20df1f1a>. Acesso em: 10/02/2025.

MAZZUCATO, M. Mission-oriented innovation policies: Challenges and opportunities. **Industrial and Corporate Change**, v. 27, n. 5, p. 803–815, 2018.

MCTIC. **Plano de CT&I para Manufatura Avançada no Brasil**. 2017.

MEHTA, D.; TANWAR, S.; BODKHE, U.; SHUKLA, A.; KUMAR, N. Blockchain-based royalty contract transactions scheme for Industry 4.0 supply-chain management. **Information Processing and Management**, v. 58, n. 4, 2021. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85104943671&doi=10.1016%2fj.ipm.2021.102586&partnerID=40&md5=787528d87822d7af6d60e6fa127da435>. Acesso em: 10/02/2025.

MELL, P. M.; GRANCE, T. **The NIST definition of cloud computing**. Gaithersburg, MD, 2011.

MOHIUDDIN, M.; REZA, M. N. H.; JAYASHREE, S.; AL-AZAD, MD. S.; ED-DAFALI, S. The Role of Governments in Driving Industry 4.0 Adoption in Emerging Countries: Mediating Effect of Organizational Structure. **Journal of Global Information Management**, v. 31, n. 1, 2023.

MOISÉS, G. V.; ROLIM, T. A.; FORMIGLI, J. M. GeDIg: Petrobras Corporate Program for Digital Integrated Field Management. All Days. **Anais...**, 2008. SPE.

MORTARI, V. S.; RIBEIRO, C. G.; LOURAL, M.; OLIVEIRA, A. A Petrobras como agente do desenvolvimento produtivo no Brasil: importância e esvaziamento. **Revista da Sociedade Brasileira de Economia Política**, v. 61, p. 143–176, 2021.

MOSCONI, F.; D'INGIULLO, D. Institutional quality and innovation: evidence from Emilia-Romagna. **ECONOMICS OF INNOVATION AND NEW TECHNOLOGY**, v. 32, n. 2, p. 165–197, 2023.

NARAYANA, M. R. Telecommunications services and economic growth: Evidence from India. **Telecommunications Policy**, v. 35, n. 2, p. 115–127, 2011. Elsevier.

NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL. **National network for manufacturing innovation: a preliminary design**. 2013.

NELSON, R. R. **As fontes do crescimento econômico**. Campinas: Editora da Unicamp, 2006.

- NEMEC, D.; MACHOVA, Z.; KOTLAN, I.; KOTLANOVA EVA AND KLIKOVA, C. Corruption in Public Administration as a Brake on Transition to Industry 4.0. **SAGE OPEN**, v. 12, n. 1, 2022.
- NEUGEBAUER, R.; HIPPMANN, S.; LEIS, M.; LANDHERR, M. Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research. *Procedia CIRP. Anais....* v. 57, p.2–7, 2016. Elsevier B.V.
- NGOC, T. T. B.; BINH, D. T. Vietnam's electronics industry: The rise and problems of further development. **Humanities and Social Sciences Reviews**, v. 7, n. 4, p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85070952352&doi=10.18510%2fhssr.2019.741&partnerID=40&md5=311f31049dc8d63624cc615e06b88d12>. Acesso em: 10/02/2025.
- NIEBEL, T. ICT and economic growth – Comparing developing, emerging and developed countries. **World Development**, v. 104, p. 197–211, 2018. Elsevier Ltd.
- NONAKA, I.; TEECE, D. J. Introduction. In: I. Nonaka; D. J. Teece (Orgs.); **Managing industrial knowledge: creation, transfer and utilization**. 1º ed, p.1–12, 2001. London: SAGE.
- NORDAL, H.; EL-THALJI, I. Modeling a predictive maintenance management architecture to meet industry 4.0 requirements: A case study. **Systems Engineering**, v. 24, n. 1, p. 34–50, 2021a. John Wiley and Sons Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098928459&doi=10.1002%2fsys.21565&partnerID=40&md5=6c255d79df6da7f3e16e79a2c2a52d20>. Acesso em: 10/02/2025.
- NORDAL, H.; EL-THALJI, I. Lifetime benefit analysis of intelligent maintenance: simulation modeling approach and industrial case study. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 8, 2021b. MDPI AG. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85104103775&doi=10.3390%2fapp11083487&partnerID=40&md5=8cea6c06330168fe92bfdcc44d3ba068>. Acesso em: 10/02/2025.
- NORDAL, H.; EL-THALJI, I. Assessing the technical specifications of predictive maintenance: A case study of centrifugal compressor. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 4, p. 1–17, 2021c. MDPI AG. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[85100867336&doi=10.3390%2fapp11041527&partnerID=40&md5=3796a390a03c8baea907df60dbb7e651](https://doi.org/10.3390/fapp11041527&partnerID=40&md5=3796a390a03c8baea907df60dbb7e651). Acesso em: 10/02/2025.

NORTH, D. C. **Institutions, institutional change and economic performance**. 1<sup>o</sup> ed. New York: Cambridge University Press, 1990.

ÖZDEMİR, V.; HEKİM, N. Birth of Industry 5.0: Making Sense of Big Data with Artificial Intelligence, “the Internet of Things” and Next-Generation Technology Policy. **OMICS A Journal of Integrative Biology**, v. 22, n. 1, p. 65–76, 2018. Mary Ann Liebert Inc.

PESSALI, H. F. **Nanoelementos da mesoeconomia: uma economia que não está nos manuais**. Curitiba: Editora UFPR, 2015.

PETROBRAS. **Plano Estratégico 2023-2027**. 2023a.

PETROBRAS. **Plano Estratégico 2024-2028+**. 2023b.

PETROBRAS. **Plano Estratégico 2050 e Plano de Negócios Petrobras 2025-2029**. 2024a.

PETROBRAS. Natureza como Inspiração. Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/inovacao/natureza-como-inspiracao>. Acesso em 10/02/2025.

PETROBRAS. Petrobras lança Plano de Negócios 2025-2029 com investimentos de US\$111 bilhões. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-lanca-plano-de-negocios-2025-2029-com-investimentos-de-us-111-bilhoes>. Acesso em: 25/12/2024c.

PINI, M. Family management and Industry 4.0: Different effects in different geographical areas? An analysis of the less developed regions in Italy. **Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation**, v. 15, n. 3, p. 73–102, 2019.

POPKOVA, E. G.; SERGI, B. S.; REZAEI, M.; FERRARIS, A. Digitalisation in transport and logistics: A roadmap for entrepreneurship in Russia. **International Journal of Technology Management**, v. 87, n. 1, p. 7–28, 2021.

PRESIDENTIAL COMMITTEE ON THE FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION. **Plan for the Fourth Industrial Revolution to Promote Innovative Growth**. 2017.

PRESIDENT’S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY. **Report to the president on ensuring american leadership in advanced manufacturing**. 2011.

PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY.

**Report to the president on capturing domestic competitive advantage in advanced manufacturing.** 2012.

PRODI, E.; TASSINARI, M.; FERRANNINI, A.; RUBINI, L. Industry 4.0 policy from a sociotechnical perspective: The case of German competence centres.

**Technological Forecasting and Social Change**, v. 175, 2022. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85120383573&doi=10.1016%2fj.techfore.2021.121341&partnerID=40&md5=074c67b0980a2095b4f54bc65ac58d0b>. Acesso em: 10/02/2025.

PROGOULAKIS, I.; NIKITAKOS, N.; ROHMEYER, P.; et al. Perspectives on cyber security for offshore oil and gas assets. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 2, p. 1–27, 2021. MDPI AG. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85099968481&doi=10.3390%2fjmse9020112&partnerID=40&md5=e8e34826c278729bfe6b995d9ffb9699>. Acesso em: 10/02/2025.

QUEIROZ, MACIEL M.; PEREIRA, S. C. F.; TELLES, R.; MACHADO, M. C. Industry 4.0 and digital supply chain capabilities: A framework for understanding digitalisation challenges and opportunities. **Benchmarking**, v. 28, n. 5, p. 1761–1782, 2019. Emerald Group Holdings Ltd.

QUEIROZ, MACIEL M.; PEREIRA, S. C. F.; TELLES, R.; MACHADO, M. C. Industry 4.0 and digital supply chain capabilities. **Benchmarking: An International Journal**, v. ahead-of-p, n. ahead-of-print, 2019. Emerald Publishing Limited. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2018-0435>.

RANE, S. B.; NARVEL, Y. A. M. Re-designing the business organization using disruptive innovations based on blockchain-IoT integrated architecture for improving agility in future Industry 4.0. **Benchmarking**, v. 28, n. 5, p. 1883–1908, 2019. Emerald Group Holdings Ltd. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85073997152&doi=10.1108%2fBIJ-12-2018-0445&partnerID=40&md5=1d54602f576c937939bdfa42e9fb32b6>. Acesso em: 10/02/2025.

RAZMANOVA, S. V.; ANDRUKHOVA, O. V. Oilfield service companies as part of economy digitalization: Assessment of the prospects for innovative development. **Journal of Mining Institute**, v. 244, n. 4, p. 482–492, 2020. Saint-Petersburg

Mining University. Disponível em:  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85095589357&doi=10.31897%2fPMI.2020.4.11&partnerID=40&md5=72bfa2db9c43b161ebb418670905ff98>. Acesso em: 10/02/2025.

REISCHAUER, G. Industry 4.0 as policy-driven discourse to institutionalize innovation systems in manufacturing. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, p. 26–33, 2018. Disponível em:  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85042649229&doi=10.1016%2fj.techfore.2018.02.012&partnerID=40&md5=c91039c68a656d13832b447ab7eecaec>. Acesso em: 10/02/2025.

RICETO, Á.; DA SILVA, R. O PAPEL DA PETROBRAS NA ECONOMIA BRASILEIRA (2003/2018): ASCENSÃO E QUEDA. **GEOgraphia**, v. 23, n. 50, 2021.

ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A Complex View of Industry 4.0. **SAGE Open**, v. 6, n. 2, 2016. SAGE Publications Inc.

RODRIGUES, T. V.; FILHO, V. H. DOS S.; PONTES, J.; RESENDE, L. M. M.; YOSHINO, R. T. Government initiatives 4.0: a comparison between industrial innovation policies for industry 4.0. **Gestão e Desenvolvimento**, v. 18, n. 1, p. 120–147, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.25112/rgd.v18i1.2411>.

RODRIK, D. **Industrial policy for the twenty-first century**. 2004.

RODRIK, D. Industrial policy: don't ask why, ask how. **Middle East Development Journal**, p. 1–29, 2008.

ROJAS-BERRIO, S.; RINCON-NOVOA, J.; SÁNCHEZ-MONRROY, M.; ASCÚA, R.; MONTOYA-RESTREPO, L. A. Factors Influencing 4.0 Technology Adoption in Manufacturing SMEs in an Emerging Country. **Journal of Small Business Strategy**, v. 32, n. 3, p. 67–83, 2022.

ROJKO, A. Industry 4.0 concept: Background and overview. **International Journal of Interactive Mobile Technologies**, v. 11, n. 5, p. 77–90, 2017. International Association of Online Engineering.

ROLLER, L.-H.; WAVERMAN, L. Telecommunications Infrastructure and Economic Development: A Simultaneous Approach. **The American Economic Review**, v. 91, n. 4, p. 909–923, 2001.

ROMANONA, O. A.; KUZMIN, E. A. Industrial policy strategy: A case of changing national priorities in Russia. **WSEAS Transactions on Business and Economics**, v. 17, p. 879–888, 2020. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091231821&doi=10.37394%2f23207.2020.17.86&partnerID=40&md5=fe3cfe b11cabacba99b26507833a7756>. Acesso em: 10/02/2025.

ROSELINO, J. E.; DIEGUES, A. C. **Limites do arcabouço tradicional de política industrial para o Brasil: elementos para uma abordagem alternativa em um mundo de estruturas fluídas**. 2020.

RYDZAK, F.; BREISTRAND, L. S.; SVEEN, F. O.; QIAN, Y.; GONZALEZ, J. J. Exploring Resilience Towards Risks in eOperations in the Oil and Gas Industry. In: J. Górski (Org.); Computer Safety, Reliability, and Security. **Anais...** . p.57–70, 2006. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

SANDULLI, F. D.; GIMENEZ-FERNANDEZ, E. M.; RODRIGUEZ FERRADAS, M. I. The transition of regional innovation systems to Industry 4.0: the case of Basque Country and Catalonia. **European Planning Studies**, v. 29, n. 9, p. 1622–1636, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85112581894&doi=10.1080%2f09654313.2021.1963049&partnerID=40&md5=ef288a214192e0cb4eb3a21058dd8f9c>. Acesso em: 10/02/2025.

SAROHA, A. K.; PAL, A. B. Industry 4.0: Applications in Oil and Gas Industry. In: C. M. Hussain; P. Di Sia (Orgs.); **Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices: Applications of Industry 4.0**. p.1–27, 2020. Cham: Springer International Publishing. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58675-1\\_144-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58675-1_144-1).

SCHREMPF, B.; KAPLAN, D.; SCHROEDER, D. National , Regional , and Sectoral Systems of Innovation – An overview. , 2013.

SENAI. Robô Annelida. Disponível em: <https://institutos.sc.senai.br/cases/annelida/>. Acesso em 10/02/2025.

SENNA, P. P.; ROCA, J. B.; BARROS, A. C. Overcoming barriers to manufacturing digitalization: Policies across EU countries. **TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE**, v. 196, 2023.

SHIGAEV, A. Scenario Forecasts of Ecosystem Development in the Oil and Gas Industry in the Context of Digitalization. In: D. B. Solovev (Org.); IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...** . v. 666, 2021. IOP Publishing Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102742567&doi=10.1088%2f1755->

[1315%2f666%2f6%2f062069&partnerID=40&md5=91d1a37696ca4e20403fe667bcde34dc](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-1315%2f666%2f6%2f062069&partnerID=40&md5=91d1a37696ca4e20403fe667bcde34dc). Acesso em: 10/02/2025.

- SHIMA, W. T. Economia de Redes e Inovação. **Economia da inovação tecnológica**. p.333–362, 2005. São Paulo: Editora Hucitec.
- SILTORI, P. F. S.; ANHOLON, R.; RAMPASSO, I. S.; et al. Industry 4.0 and corporate sustainability: An exploratory analysis of possible impacts in the Brazilian context. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 167, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102563564&doi=10.1016%2fj.techfore.2021.120741&partnerID=40&md5=79c7bd0256139980288a28fb0b2ad930>. Acesso em: 10/02/2025.
- SILVEIRA, J. D. C. DE A.; SOUZA, M. C. M. DE; OLIVEIRA, M. A. OS PRINCIPAIS ATORES DO ECOSSISTEMA DE INOVAÇÃO DA PETROBRAS. **Revista Economia & Gestão**, v. 20, n. 55, p. 120–135, 2020.
- SIMACHEV, Y.; FEDYUNINA, A.; YUREVICH, M.; KUZYK, M.; GORODNY, N. New strategic approaches to gaining from emerging advanced manufacturing markets. **Foresight and STI Governance**, v. 15, n. 3, p. 6–21, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85116331089&doi=10.17323%2f2500-2597.2021.3.6.21&partnerID=40&md5=2ab0512b3a9449a0b729cddc2accf5e1>. Acesso em: 10/02/2025.
- VAN SONG, N.; HANH, P. T. M.; CUC, M. T.; TIEP, N. C. Factors affecting human resources development of SMEs: Evidence from the fourth Industrial revolution in Vietnam. **Management Science Letters**, v. 10, n. 12, p. 2705–2714, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85085118359&doi=10.5267%2fj.msl.2020.4.040&partnerID=40&md5=7ebde20fdacc01c22bc603ea22785ab7>. Acesso em: 10/02/2025.
- STEIN, G. D. Q.; JÚNIOR, R. H. Política industrial no Brasil: uma análise das estratégias propostas na experiência recente (2003-2014). **Planejamento e políticas públicas**, v. 47, p. 251–287, 2016.
- STEINMUELLER, W. E. ICTs and the possibilities for leapfrogging by developing countries. **International Labour Review**, v. 140, n. 2, p. 193–210, 2001.
- STIGLITZ, J. E. Markets, market failures, and development. **The American Economic Review**, v. 79, n. 2, p. 197–203, 1989.

- STIGLITZ, J. E. Some lessons from the East Asian miracle. **World Bank Research Observer**, v. 11, n. 2, p. 151–177, 1996.
- STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP. Anais...* . v. 40, p.536–541, 2016. Elsevier B.V.
- SUNG, T. K. Industry 4.0: A Korea perspective. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, p. 40–45, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85034585501&doi=10.1016%2fj.techfore.2017.11.005&partnerID=40&md5=87d66fd7451ff838a44be015a6b04580d2>. Acesso em: 10/02/2025.
- SUNLEY, P.; EVENHUIS, E.; HARRIS, J.; et al. Renewing industrial regions? Advanced manufacturing and industrial policy in Britain. **Regional Studies**, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85118228154&doi=10.1080%2f00343404.2021.1983163&partnerID=40&md5=c66fd7451ff838a44be015a6b04580d2>. Acesso em: 10/02/2025.
- SURREY, J. Petroleum development in Brazil. **Energy Policy**, v. 15, n. 1, p. 7–21, 1987.
- SUZIGAN, W.; GARCIA, R.; ASSIS FEITOSA, P. H. Institutions and industrial policy in Brazil after two decades: have we built the needed institutions? **Economics of Innovation and New Technology**, v. 29, n. 7, p. 799–813, 2020. Taylor & Francis.
- TAY, S. I.; ALIPAL, J.; LEE, T. C. Industry 4.0: Current practice and challenges in Malaysian manufacturing firms. **Technology in Society**, v. 67, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85114831980&doi=10.1016%2fj.techsoc.2021.101749&partnerID=40&md5=88a0e5922e842287eeabe9fc8b13ba35>. Acesso em: 10/02/2025.
- TEIXEIRA, J. E.; TAVARES-LEHMANN, A. T. C. P. Industry 4.0 in the European union: Policies and national strategies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 180, 2022.
- UKAEGBU, U.; TARTIBU, L.; OKWU, M. Unmanned Aerial Vehicles for the Future: Classification, Challenges, and Opportunities. In: S. Pudaruth; U. Singh (Orgs.); *icABCD 2021 - 4th International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems, Proceedings. Anais...* , 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[85115400258&doi=10.1109%2fABC51485.2021.9519367&partnerID=40&md5=3891cf5fc9e1c163f279028f8c165df2](https://doi.org/10.1109%2fABC51485.2021.9519367&partnerID=40&md5=3891cf5fc9e1c163f279028f8c165df2). Acesso em: 10/02/2025.

- VASSILIADIS, M.; HILPERT, Y. M. Labor-based Innovation: The Advantage of Skills and Education. **UCJC BUSINESS AND SOCIETY REVIEW**, , n. 65, p. 66–83, 2020.
- VDI. **Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0)**. 2015.
- WADE, R. **Governing the market: economic theory and the role of government in East Asian industrialization**. Princeton University Press, 1990.
- WAN, J.; KELIANG, Z.; CAI, H. Industrie 4.0: Enabling Technologies. 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things (ICIT). **Anais...** . p.135–140, 2015. Harbin.
- WANASINGHE, T. R.; GOSINE, R. G.; JAMES, L. A.; et al. The Internet of Things in the Oil and Gas Industry: A Systematic Review. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 9, p. 8654–8673, 2020.
- WANASINGHE, T. R.; TRINH, T.; NGUYEN, T.; et al. Human centric digital transformation and operator 4.0 for the oil and gas industry. **IEEE Access**, v. 9, p. 113270–113291, 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85113198974&doi=10.1109%2fACCESS.2021.3103680&partnerID=40&md5=b36f5d437e8d6290aca631f01844aca7>. Acesso em: 10/02/2025.
- WANG, C.; QIAO, C.; AHMED, R. I.; KIRIKKALELI, D. Institutional Quality, Bank Finance and Technological Innovation: A way forward for Fourth Industrial Revolution in BRICS Economies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 163, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85094865139&doi=10.1016%2fj.techfore.2020.120427&partnerID=40&md5=0f501d89c732e3be362f692130255c95>. Acesso em: 10/02/2025.
- WANG, E. H. H. ICT and economic development in Taiwan: Analysis of the evidence. **Telecommunications Policy**, v. 23, n. 3, p. 235–243, 1999.
- WEISS, L. Re-emergence of Great Power Conflict and US Economic Statecraft. **World Trade Review**, v. 20, n. 2, p. 152–168, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098933012&doi=10.1017%2fS1474745620000567&partnerID=40&md5=20475deeb25536d8d761b628f5007ec5>. Acesso em: 10/02/2025.

- WIGGER, A. The New EU Industrial Policy and Deepening Structural Asymmetries: Smart Specialisation Not So Smart. **Journal of Common Market Studies**, v. 61, n. 1, p. 20–37, 2023.
- WORLD ECONOMIC FORUM. **Digital Transformation Initiative: Oil and Gas Industry**. 2017.
- XU, L. DA; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: State of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, 2018. Taylor and Francis Ltd.
- ZHANG, Z.; LI, X.; XIONG, J.; et al. A global race to dominate the internet of things: how China caught up. **Journal of Business Strategy**, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106205912&doi=10.1108%2fJBS-11-2020-0269&partnerID=40&md5=55e929acf2a2f543de2b5d6b8437773b>. Acesso em: 10/02/2025.
- ZHOU, K.; LIU, T.; ZHOU, L. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). **Anais...** . p.2147–2152, 2016.
- ZHOU, X.; SONG, M.; CUI, L. Driving force for China's economic development under Industry 4.0 and circular economy: Technological innovation or structural change? **Journal of Cleaner Production**, v. 271, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85088144591&doi=10.1016%2fj.jclepro.2020.122680&partnerID=40&md5=db4159116e245b42cd7dea068e7da31c>. Acesso em: 10/02/2025.
- ZONNENSHAIN, A.; FORTUNA, G.; ADRES, E.; KENETT, R. S. Regional development in the era of industry 4.0. **Dynamic Relationships Management Journal**, v. 9, n. 2, p. 19–36, 2020.
- 国务院. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知.