

ISSN 1414-9230

60

BNDES Setorial

Vol. 31 | setembro de 2025

Edição especial Indústria

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL

Presidente

Aloizio Mercadante Oliva

Diretores

Alexandre Correa Abreu

Helena Tenório Veiga de Almeida

José Luis Pinho Leite Gordon

Luciana Aparecida da Costa

Luiz Augusto Fraga Navarro de Britto Filho

Maria Fernanda Ramos Coelho

Nelson Henrique Barbosa Filho

Tereza Helena Gabrielli Barreto Campello

Walter Baère de Araújo Filho

60

BNDES Setorial

ISSN 1414-9230

60

BNDES Setorial

Vol. 31 | setembro de 2025

Edição especial Indústria



BNDES Setorial

Publicação semestral editada em março e setembro

Editores

Antônio Marcos Hoelz Ambrozio

Gabriel Ferraz Aidar

Thiago de Holanda Lima Miguez

Edição

Gerência de Editoração e Memória

Coordenação editorial

Shirlene Linny da Silva

Gerência de Editoração e Memória

Luisa de Carvalho e Silva

Copidesque e revisão

Tikinet

Diagramação e capa

Refinaria Design

Impressão

Leograf

Comissão editorial

Felipe Borim Villen

João Paulo Pieroni

Lívia dos Reis Cavalcante José Rocha

Luciene Ferreira Monteiro Machado

Conselho editorial convidado desta edição

Diogo Oliveira Santos

Marília Bassetti Marcato

Marcelo Resende Tonon

Gabriel Martins da Silva Porto

Mateus Labrunie (Universidade de Cambridge)

José Ricardo Santana (UFS)

BNDES Setorial, n. 1, jul. 1995 -

Rio de Janeiro, Banco Nacional de Desenvolvimento

Económico e Social, 1995 - n.

Semestral. ISSN 1414-9230

Periodicidade anterior: quadrimestral até o n. 3.

1. Economia - Brasil - Periódicos. 2. Desenvolvimento econômico - Brasil - Periódicos. I. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

CDD 330.05

Ficha catalográfica elaborada por: Juceli Vasconcelos – CRB/7-4725

© 2025

Esta publicação está disponível
em formato digital em
www.bnDES.gov.br/bibliotecadigital

Distribuição gratuita

É permitida a reprodução parcial ou total
dos artigos desta publicação, desde
que citada a fonte.

Os artigos assinados são de exclusiva
responsabilidade dos autores, não
refletindo, necessariamente,
a opinião do BNDES.

Av. República do Chile, 100
Rio de Janeiro - RJ - CEP 20031-917
<http://www.bnDES.gov.br>

Para assinar esta publicação, envie e-mail
para: gedit@bnDES.gov.br

Nesta edição, a revista *BNDES Setorial* completa trinta anos de existência como um marco fundamental para o pensamento sobre desenvolvimento econômico no Brasil.

Ao longo de sua existência, ela tem exercido o importante papel de instrumento de síntese e disseminação da expertise que o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) acumula sobre a estrutura produtiva do país, por meio de décadas de financiamento e acompanhamento de projetos em diversos segmentos da economia brasileira. Esse conhecimento é gerado por profissionais do corpo técnico do Banco altamente qualificados e especializados em análises setoriais, que se dedicam a produzir estudos de excelência que exploram as potencialidades e desafios do desenvolvimento dos principais segmentos da economia brasileira.

A revista *BNDES Setorial* funciona como uma ponte entre o conhecimento acadêmico e a prática do desenvolvimento econômico brasileiro. Assim, ela tem cumprido papel estratégico como fonte de informação de alta qualidade, que tanto orienta o aprimoramento dos programas de apoio do Banco como permite a formulação mais adequada de políticas públicas e decisões de investimento. Esse conhecimento setorial foi essencial em vários momentos para o surgimento e a estruturação de diversos setores nos quais o BNDES teve papel preponderante, como bens de capital, automotivo, papel e celulose, químico, aviação, telecomunicações e energia elétrica.

A celebração dos trinta anos da revista *BNDES Setorial* coincide com um momento de resgate da importância da indústria brasileira. A Nova Indústria Brasil (NIB), política industrial lançada pelo Governo Federal em janeiro de 2024, tem o objetivo de impulsionar o desenvolvimento da indústria nacional, reconhecendo que o setor é estratégico para reduzir

desigualdades regionais, promover inovação tecnológica e fortalecer a competitividade do Brasil no cenário internacional.

A NIB estabelece uma estratégia abrangente que busca não apenas o crescimento da produção industrial, mas a transformação do parque industrial nacional para o atendimento de objetivos sociais, conectando-se com as demais políticas de desenvolvimento produtivo, como o Programa de Aceleração do Crescimento (Novo PAC) e o Plano de Transformação Ecológica. Ao investir em setores estratégicos, a NIB visa reduzir a dependência de produtos e tecnologias estrangeiras, fortalecendo a economia e a soberania nacional. O programa também promove desenvolvimento sustentável: com um foco em sustentabilidade e bioeconomia, alinhando o crescimento industrial com a preservação ambiental e garantindo um desenvolvimento responsável e de longo prazo. Essa visão integrada posiciona a indústria brasileira não apenas como motor de crescimento econômico, mas como vetor de transformação social e ambiental, capaz de gerar empregos de qualidade, promover inclusão social e contribuir para os objetivos globais de desenvolvimento sustentável.

A fim de alcançar esses objetivos, a NIB envolve um conjunto de seis missões. A Missão 1 – Cadeias agroindustriais sustentáveis e digitais visa transformar as cadeias agroindustriais em sistemas sustentáveis e digitais para garantir segurança alimentar, nutricional e energética. A Missão 2 – Complexo industrial da saúde abrange o complexo econômico e industrial da saúde (Ceis), com o objetivo de fortalecer a capacidade nacional de produção de medicamentos, equipamentos médicos e insu-
mos farmacêuticos, reduzindo a dependência externa em produtos de saúde estratégicos. A Missão 3 – Infraestrutura, saneamento, moradia e mobilidade sustentáveis foca moradia, saneamento e mobilidade urbana, modernizando a infraestrutura brasileira com o objetivo de melhorar a qualidade de vida da população e a competitividade econômica do país.

A Missão 4 – Transformação digital da indústria visa modernizar o parque industrial brasileiro, promovendo o desenvolvimento e a adoção de tecnologias da Indústria 4.0, com a capacitação da força de trabalho para aumentar a produtividade e competitividade da indústria nacional por meio da digitalização e automação dos processos produtivos. A Missão 5 – Bioeconomia, descarbonização e transição energética aborda a transição energética e o desenvolvimento da bioeconomia como pilares estratégicos para o futuro industrial do país, posicionando o Brasil como líder global na economia verde, em razão do desenvolvimento de energias renováveis, biocombustíveis, tecnologias limpas e aproveitamento sustentável da biodiversidade brasileira. Por fim, a Missão 6 – Tecnologias para soberania e defesa nacional objetiva desenvolver capacidades tecnológicas e industriais estratégicas para a defesa nacional, reduzindo a dependência externa em equipamentos e tecnologias críticas, englobando desde a indústria aeroespacial até sistemas de comunicação e cibersegurança, de modo a fortalecer a soberania tecnológica do país.

Esta edição comemorativa da revista *BNDES Setorial* é dedicada à análise da indústria, sendo estruturada em dois blocos. O primeiro bloco contempla dois artigos que olham para a indústria de uma forma transversal, debruçando-se sobre questões críticas para o desenvolvimento do setor, como a retomada global de políticas industriais e a importância do apoio à inovação. Já o segundo bloco compreende cinco artigos setoriais que irão examinar alguns segmentos relevantes presentes nas missões da NIB.

O primeiro artigo, “Retomada da política industrial brasileira”, escrito por Guilherme Maia, Gabriel Daudt e Luiz Daniel Willcox, analisa a retomada das políticas industriais no cenário global e sua relevância para o Brasil. Após décadas marcadas por intensas críticas, a defesa e a adoção aberta dessas políticas voltaram a ganhar força no período

recente, impulsionadas por três fatores centrais: a transformação digital da indústria, a urgência da transição energética diante da crise climática e a necessidade de maior autonomia nas cadeias de suprimento estratégicas. A análise mostra como países desenvolvidos têm adotado instrumentos robustos – subsídios, incentivos à inovação e políticas verdes – para revitalizar seus parques industriais. Nesse contexto, o texto apresenta a NIB como resposta nacional a esses desafios, estruturada em missões que visam promover a neoindustrialização, integrar tecnologias digitais e sustentáveis e reposicionar a indústria brasileira como vetor de desenvolvimento econômico e competitivo.

O segundo artigo, “Densidade tecnológica no contexto da nova política industrial”, escrito por Fabrício Brollo Dunham, Isabela Brod Lemos de Abreu, Maurício dos Santos Neves, João Paulo Pieroni e Marília Bassetti Marcato, discute como os instrumentos de crédito do BNDES, especialmente o Programa BNDES Mais Inovação, têm apoiado projetos alinhados às diretrizes da NIB e à estratégia de neoindustrialização. A partir da avaliação das operações financeiras para inovação do BNDES para 2023 e 2024, o estudo aponta que 88,3% dos recursos foram destinados a iniciativas de alta densidade tecnológica, considerando tanto a classificação por intensidade tecnológica da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) quanto a aderência a tecnologias habilitadoras definidas pelo Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia dos Estados Unidos (NSTC, na sigla em inglês). Esses resultados indicam uma convergência entre a política industrial e os esforços para aumentar a complexidade da matriz produtiva brasileira, reforçando a importância da inovação como eixo central para a competitividade e o desenvolvimento sustentável da indústria nacional.

O terceiro artigo, “A Missão Saúde da NIB e as políticas públicas de financiamento”, escrito por Adriana Inhudes, Larissa Barbosa, Diego Nyko, Vitor Paiva Pimentel e Hevellyn Camille da Silva, analisa a Missão 2 da NIB, dedicada ao fortalecimento do Ceis, destacando sua relevância para o desenvolvimento econômico e social do país. A pesquisa revisita a trajetória das indústrias farmacêutica e de dispositivos médicos no Brasil, discute os desafios impostos pela dinâmica global e pela busca de sustentabilidade do Sistema Único de Saúde (SUS), bem como examina o papel das políticas públicas de financiamento, com ênfase na atuação do BNDES e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). Além de atualizar o diagnóstico dos segmentos do Ceis, o estudo apresenta novos instrumentos de crédito e iniciativas voltadas à inovação, como os programas Mais Inovação e Fornecedores SUS, bem como estratégias para fomentar *startups* de base tecnológica, alinhando a política industrial às necessidades sanitárias e à ambição de inserção internacional.

O quarto artigo, “Descarbonização dos ônibus: oportunidades além dos veículos a bateria”, de autoria de Pedro Henrique de Moraes Marques, Filipe de Oliveira Souza, James Patrick Maher Junior e Luís Inácio Senos Dantas, examina as estratégias para reduzir emissões no transporte público urbano brasileiro, destacando a centralidade dos ônibus elétricos a bateria e comparando-os com outros meios alternativos, como hidrogênio, trólebus, híbridos e biocombustíveis. A discussão aborda desafios técnicos, financeiros e de infraestrutura, além de oportunidades para a indústria nacional, alinhando-se à Missão 5 da NIB, que promove bioeconomia, descarbonização, transição e segurança energética. O artigo enfatiza a necessidade de uma transição planejada, capaz de combinar metas ambientais e industriais, impulsionar a reindustrialização verde e fortalecer cadeias produtivas locais.

O quinto artigo, “Infraestrutura computacional para a era da IA: desafios, políticas e oportunidades em *data centers* no Brasil”, escrito por Marconi Viana e Otávio Scheidegger, analisa como a difusão da inteligência artificial, especialmente os modelos generativos, está redefinindo a demanda por infraestrutura digital e energética no país. A pesquisa destaca o papel estratégico dos *data centers* na transformação produtiva prevista pela Missão 4 da NIB, apontando vantagens como a matriz elétrica majoritariamente renovável e desafios como gargalos de conectividade, custos elevados e escassez de mão de obra especializada. Ao mapear o panorama atual e as tendências de expansão, o estudo discute medidas regulatórias, incentivos fiscais e metas de eficiência para consolidar o Brasil como *hub* regional de infraestrutura computacional sustentável e alinhado às metas globais de descarbonização.

O sexto artigo, “Descarbonização na indústria siderúrgica: oportunidade para agregar valor e aumentar a competitividade”, escrito por Patrícia Dias Fernandes, Adriano dos Reis Miranda Laureno Oliveira, Pedro Paulo Dias Mesquita, Rodrigo José Márcio Mendes, Amynthas Gallo e Bruno Hirth de Lira, traz a dinâmica do mercado brasileiro de aço e seu papel estratégico na transição para uma economia de baixo carbono. O texto discute a relevância da siderurgia, responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂, apontando as oportunidades para o Brasil se consolidar como plataforma competitiva de produção de ferro e aço “verdes”, aproveitando vantagens como matriz energética renovável, abundância de minério de ferro de alta qualidade e potencial para hidrogênio de baixo carbono. Além de examinar tendências globais, impactos regulatórios como o Mecanismo de Ajuste de Fronteira de Carbono da União Europeia (CBAM, na sigla em inglês) e desafios tecnológicos, o estudo aponta que a descarbonização é essencial para manter a competitividade internacional e alinhar a indústria nacional às metas do Acordo de Paris.

O sétimo artigo traz uma inovação do setor aeroespecial com o trabalho “O novo mercado de mobilidade aérea urbana: desenvolvimentos recentes e desafios para os eVTOLs e para o BNDES – Parte 1”, de autoria de Sérgio Bittencourt Varella Gomes, Renato Baran, Marcos Vital e Breno Cerqueira Araujo, que apresenta um panorama sobre a mobilidade aérea avançada (AAM) e sua vertente urbana (UAM), destacando as aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical (eVTOL) como protagonistas dessa transformação. A análise aborda aspectos técnicos, configurações, aplicações e desafios regulatórios, além de evidenciar o papel estratégico do BNDES no fomento à inovação, alinhado às missões da NIB voltadas à descarbonização, tecnologias críticas e soberania nacional. O artigo também compara eVTOLs com helicópteros, ressaltando ganhos ambientais e econômicos.

Assim, esta edição de celebração dos trinta anos da revista *BNDES Setorial* reforça seu papel como espaço qualificado para reflexão do desenvolvimento produtivo brasileiro. Os artigos desta edição não apenas aprofundam temas centrais para a NIB, como também ampliam o debate público ao oferecer diagnósticos, evidências e análises fundamentais para o aprimoramento das políticas industriais no país. Ao reunir conhecimento técnico, visão estratégica e diálogo com desafios contemporâneos, a revista reafirma sua relevância histórica e sua contribuição para orientar decisões e fortalecer a capacidade do Brasil de planejar e executar políticas públicas eficazes.

Boa leitura a todos!

José Luis Pinho Leite Gordon

Diretor de Desenvolvimento Produtivo, Inovação e Comércio Exterior do BNDES

Sumário

RETOMADA DA POLÍTICA INDUSTRIAL BRASILEIRA	13
<i>Guilherme Maia Gabriel Daudt Luiz Daniel Willcox</i>	
DENSIDADE TECNOLÓGICA NO CONTEXTO DA NOVA POLÍTICA INDUSTRIAL	49
<i>Fabrício Brollo Dunham Isabela Brod Lemos de Abreu Maurício dos Santos Neves João Paulo Pieroni Marília Bassetti Marcato</i>	
A MISSÃO SAÚDE DA NIB E AS POLÍTICAS PÚBLICAS DE FINANCIAMENTO	81
<i>Adriana Inhudes Larissa Barbosa Diego Nyko Vitor Paiva Pimentel Hevellyn Camille da Silva</i>	
DESCARBONIZAÇÃO DOS ÔNIBUS: OPORTUNIDADES ALÉM DOS VEÍCULOS A BATERIA	119
<i>Pedro Henrique de Moraes Marques Filipe de Oliveira Souza James Patrick Maher Junior Luís Inácio Senos Dantas</i>	

**INFRAESTRUTURA COMPUTACIONAL PARA
A ERA DA IA: DESAFIOS, POLÍTICAS E
OPORTUNIDADES EM DATA CENTERS
NO BRASIL 167**

*Marconi Edson Ferreira Viana
Otávio Frederico da Costa Roma Scheidegger*

**DESCARBONIZAÇÃO NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA:
OPORTUNIDADE PARA AGREGAR VALOR E
AUMENTAR A COMPETITIVIDADE 207**

*Patrícia Dias Fernandes
Pedro Paulo Dias Mesquita
Adriano dos Reis Miranda Laureno Oliveira
Rodrigo José Márcio Mendes
Amyntha Gallo
Bruno Hirth de Lira*

**NOVO MERCADO DE MOBILIDADE AÉREA
URBANA: DESENVOLVIMENTOS RECENTES
E DESAFIOS PARA OS EVTOLS E PARA O
BNDES – PARTE 1 255**

*Sérgio Bittencourt Varella Gomes
Renato Baran
Marcos Henrique Figueiredo Vital
Breno Cerqueira Araujo*

RETOMADA DA POLÍTICA INDUSTRIAL BRASILEIRA

Guilherme Maia

Gabriel Daudt

*Luiz Daniel Willcox**

Palavras-chave: política industrial; desenvolvimento; Nova Indústria Brasil (NIB).

* Respectivamente, economista, gerente e chefe do Departamento de Análise e Avaliação de Políticas Públicas da Área de Planejamento e Pesquisa Econômica do BNDES.

RESUMPTION OF BRAZILIAN INDUSTRIAL POLICY

Guilherme Maia

Gabriel Daudt

*Luiz Daniel Willcox**

Keywords: industrial policy; development; New Industry Brazil (NIB).

* Respectively, economist, manager and head of the Public Policy Analysis and Evaluation Department of the BNDES's Planning and Economic Research Division.

Resumo

As políticas industriais sempre estiveram presentes nas economias desenvolvidas. Ora de forma nítida, com o uso de subsídios e restrições diversas, ora de forma mais discreta, por meio do fomento à pesquisa e inovação e de compras governamentais. No período mais recente, a adoção de políticas industriais explícitas foi retomada para garantir a competitividade estratégica pelo apoio à Indústria 4.0 de base digital, pela adaptação à emergência climática ou ainda pela necessidade de maior resiliéncia nas cadeias de suprimento estratégicas. É nesse novo contexto mundial que se insere a Nova Indústria Brasil (NIB).

Abstract

Industrial policy has been a cornerstone of developed economies. On some occasions it has taken explicit forms—such as subsidies and regulatory constraints—while on others it has manifested more subtly, through the promotion of research and innovation or strategic public procurement. In recent years, there has been a renewed emphasis on explicit industrial policies designed to secure strategic competitiveness, driven by the advancement of digital-based Industry 4.0, the imperative to tackle the climate emergency, and the growing need to enhance the resilience of critical supply chains. Thus, New Industry Brazil (NIB) emerges within this evolving global context.

Introdução

Política industrial (PI) pode ser definida de forma abrangente como a utilização de políticas públicas que busquem a transformação da estrutura econômica para alcançar um determinado objetivo público. Dito de outra forma, refere-se à busca, por meio da intervenção do Estado, da transformação estrutural na economia, a fim de possibilitar que objetivos de interesse nacional sejam atingidos.¹

A partir dessa definição, entende-se que intervenções que objetivem fomentar o desenvolvimento de indústrias nacionais podem ser caracterizadas como constituintes de uma política industrial. Concretamente, nações que buscaram fomentar seu processo de industrialização utilizaram mecanismos distintos para incentivar suas indústrias. Assim, há um amplo rol de instrumentos, desde a clássica proteção tarifária, passando por diversos outros mecanismos mais ou menos explícitos, como cotas, subsídios creditícios, estímulos à exportação, isenções tributárias e compras governamentais.

No entanto, em determinados momentos, especialmente durante o auge do liberalismo no Ocidente, chegou a prevalecer certa interpretação ortodoxa de que a política industrial deveria ser abandonada ou, como colocado por Wade (2017), ela teria se tornado tóxica. Na conhecida formulação de Gary Becker, a melhor política industrial é não ter política industrial (Becker *apud* Medeiros, 2019).

1 Juhász, Lane e Rodrik (2023, p. 4) definem políticas industriais como: “aqueelas políticas governamentais que visam explicitamente a transformação da estrutura da atividade econômica para o atingimento de algum objetivo público”. Já Evenett et al. (2024, p. 6) consideram que: “política industrial é qualquer intervenção governamental que, especificamente, tenha a finalidade de apoiar ou desenvolver firmas, indústrias ou atividades econômicas domésticas, para alcançar objetivos nacionais sejajam econômicos ou não”.

Ao longo do tempo, diversos argumentos foram utilizados para justificar a utilização de políticas industriais. Do ponto de vista da teoria econômica convencional, é comum argumentar que a existência de fricções (como assimetrias de informação, falhas de coordenação e barreiras à entrada) caracteriza mercados imperfeitos e, portanto, alocações inefficientes, o que justificaria as políticas públicas.

Nesse sentido, de fato há uma ampla literatura que analisa o uso disseminado de políticas industriais, seja por parte dos países desenvolvidos, seja por parte dos países com industrialização recente, que foram bem-sucedidos em fomentar seus parques industriais e promover um *catch-up* tecnológico (Amsden, 2009; Chang, 2004; Lee, 2019; Mazzucato, 2013).

Vale mencionar que, recentemente, uma nova safra de trabalhos acadêmicos, utilizando técnicas recentes de avaliação, buscou analisar a eficácia das políticas industriais. Diversos desses trabalhos foram sistematizados por Juhász, Lane e Rodrik (2023) e, em sua maioria, demonstraram que os efeitos das políticas industriais sobre a estrutura econômica foram significativos e perenes, refutando afirmativas anteriores de que elas seriam inócuas ou contraproducentes.²

Para além de aspectos estritamente econômicos, adotando-se um ponto de vista mais amplo, entende-se que Estados nacionais competem no fortalecimento de suas estruturas industriais, pois estas representam autonomia e ganhos estratégicos na concorrência global. Portanto, atentar-se unicamente a questões econômicas seria ignorar o fato de que

2 Nas palavras dos autores: "We discuss the considerable literature that has developed in recent years providing rigorous evidence on how industrial policies work. This literature is a significant improvement over the earlier generation of empirical work, which was largely correlational and marred by interpretational problems. On the whole, the recent crop of papers offers a more positive take on industrial policy" (Juhász; Lane; Rodrik, 2023, p. 1).

decisões políticas definem os interesses nacionais e forjam as políticas públicas (Kapczynski; Michaels, 2024).³

Em linhas gerais, as políticas industriais a partir do pós-guerra foram caracterizadas por fases distintas. Em uma primeira fase, dos anos 1940 até meados dos anos 1970, aceitava-se amplamente que a industrialização era fundamental para o desenvolvimento e a intervenção do Estado, necessária para garantir a mudança estrutural (Andreoni, 2016; Warwick, 2013).

Porém, ao final dos anos 1970, concomitantemente com o crescimento do liberalismo econômico, difundiu-se um consenso sobre as dificuldades das intervenções do Estado, que poderiam ser capturadas por grupos de interesse mais influentes. A utilização de políticas industriais foi se tornando “envergonhada” e concentrando-se em políticas de apoio à inovação e ao desenvolvimento e difusão de tecnologia, as chamadas políticas horizontais. Vale ressaltar que esse movimento foi característico dos países industrializados ocidentais. Além disso, alguns países asiáticos continuaram utilizando políticas mais incisivas de forma a garantir a instalação de cadeias produtivas de bens estratégicos, obtendo ganhos de escala e escopo, o que acarretou uma concentração geográfica da produção de alguns bens estratégicos (Chu, 2016).

Nesse contexto, ao se debruçar sobre o caso emblemático estadunidense, Fred Block argumenta que os Estados Unidos da América (EUA) rejeitavam o uso de políticas industriais, ao mesmo tempo que reforçavam políticas sofisticadas e descentralizadas por meio do fortalecimento de diversas agências governamentais invisíveis ao público. Assim, tal rede

³ Tal característica foi particularmente relevante no caso japonês. A burocracia econômica japonesa, em especial o famoso Ministério do Comércio Internacional e Indústria (MITI, na sigla em inglês), foi um ator primordial na economia do Japão. De fato, as soluções para os problemas críticos do final do século XX – fornecimento de energia, proteção ambiental, inovação tecnológica e assim por diante – passaram pelo crivo da burocracia estatal. Ver a respeito em Johnson (1982).

de promoção industrial e inovativa ficou conhecida como um *hidden developmental state* (Block, 2008).

Somado a isso, com a difusão da globalização, buscou-se estimular uma maior especialização e inserção nas cadeias globais de valor. Nesse sentido, a globalização, em conjunto com o processo de financeirização, acabou por transferir muitas cadeias produtivas para a Ásia, implicando a redução das etapas de manufatura das indústrias em países ocidentais.

A partir da crise mundial de 2008, percebe-se um renovado interesse de diversos países, especialmente os mais avançados, pela revitalização da indústria (Daudt; Willcox, 2016). Com isso, começa a emergir uma nova percepção sobre a necessidade da política industrial, em grande parte oriunda da conscientização de que a indústria importa, o que possibilitou recuperar, então, a visão de que a indústria, dada a complexidade de seus processos produtivos, é fundamental para o desenvolvimento tecnológico.

Como afirmam Miguez *et al.* (2018), historicamente a industrialização constituiu o alicerce sobre o qual se moldou o processo de desenvolvimento, com aumento da produtividade e crescimento da renda *per capita*. De fato, a experiência histórica mostra que diversos países hoje desenvolvidos se valeram, e ainda se valem, do uso de políticas específicas para transformar sua estrutura produtiva. Labrunie, Penna e Kupfer (2020) analisam a consolidação da percepção de que os novos desafios tecnológicos – que permitem a elevação da produtividade, ampliam a competitividade e endereçam o equacionamento de questões socioambientais – não poderão ser enfrentados apenas pela ação dos mercados. Para tanto, torna-se necessária a interação de diversas instituições.

Como se sabe, o setor industrial é relevante para o crescimento da economia, da produtividade e do emprego,⁴ sendo a principal fonte de ganhos de produtividade da economia (Chang; Andreoni, 2016). O setor se configura como grande difusor de inovações tecnológicas – ou um *learning centre* das economias modernas, como na concepção de Rosenberg (1963). Ao requerer a interação entre máquinas e sistemas complexos, demanda competências especializadas e constante aprimoramento de processos, isto é, a indústria é grande demandante de serviços tecnológicos de alto valor agregado, fomentando inovações que permitam ganhos de produtividade e ampliação da competitividade.

O desenvolvimento de novas tecnologias digitais, conhecidas como a manufatura avançada ou Indústria 4.0, acirrou essa tendência, já que alterou estruturalmente a produção industrial, integrando processos físicos e sistemas digitais. Diversos avanços tecnológicos, tais como o uso de *big data*, internet das coisas (IoT), robotização nas cadeias de produção e, mais recentemente, a inteligência artificial (IA), aceleraram inovações e geraram novas oportunidades de adicionar valor. Tendo isso em vista, a crescente complexidade dessa “revolução tecnológica” demanda uma ampla articulação e coordenação entre os setores, e o Estado surge como um agente privilegiado para, por meio de políticas industriais, impulsionar o progresso técnico e garantir o desenvolvimento econômico, agindo, portanto, como um “inovador de primeira instância”, direcionando as inovações para objetivos sociais e estratégicos (Mazzucato, 2021; Medeiros, 2018).

Cabe ressaltar que essas mudanças significaram rupturas com os padrões anteriormente vigentes e implicaram crescentes necessidades de infraestrutura e capacitação, representando enormes desafios.

4 A respeito dessa relação, ver Thirlwall (1983).

A superação desses óbices consolidou a noção da necessidade de apoio do Estado.

Outro fator que reforça a importância da adoção de política industrial é a crescente consciência da emergência climática. Há algum tempo existe um consenso sobre a necessidade de adotar medidas que reduzam as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e permitam atingir a neutralidade de emissões no curto prazo.⁵

Em vista disso, a urgência do processo de descarbonização ficou evidente com a recente aceleração do aquecimento global. Entretanto, medidas paliativas, tais como a busca de maior eficiência energética, mostraram-se insuficientes para enfrentar o desafio, tornando-se essencial substituir a matriz energética fóssil. Fontes alternativas de energia, como eólica, solar, geotérmica, biocombustíveis e hidrogênio verde, passaram a ser o foco da mudança energética.

A energia fóssil ainda é relativamente abundante e as tecnologias limpas ainda apresentam custos mais elevados decorrentes da baixa escala de produção e da infraestrutura de distribuição deficiente. Porém, esses fatores somados às incertezas associadas à adoção de tecnologias não inteiramente maduras fazem com que o sistema de preços não ofereça incentivos à substituição da matriz atual, ampliando a dependência da energia fóssil.

Concretamente, isso aponta para uma mudança estrutural, com rápido aumento da produção dos “bens verdes” (painéis fotovoltaicos, aerogeradores, baterias elétricas, eletrolisadores e biodigestores de escala

⁵ O Acordo de Paris, assinado na 21^a Conferência das Partes (COP-21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, na sigla em inglês), definiu metas voluntárias de emissões, conhecidos como *intended nationally determined contributions (INDC)*. Na ocasião, o Brasil comprometeu-se a reduzi-las em 37% até 2025, elevando os esforços até atingir a meta de uma redução de 45% em 2030.

industrial etc.), o que, por sua vez, amplia a importância do acesso às matérias-primas necessárias à sua produção.

Destaca-se ainda que a alteração da matriz energética deve ser acompanhada por uma mudança na matriz de transportes. Isto é, automóveis, caminhões, trens, navios e aviões devem ser movidos a energia de fontes limpas, de modo a garantir um ciclo de vida carbono neutro. Certamente isso acarreta um esforço monumental na substituição ou adaptação dos veículos e da infraestrutura existentes, pois em realidade todo o sistema econômico (indústria manufatureira, construção civil, agricultura etc.) é afetado pela mudança na matriz energética.

Por esse motivo, essas profundas alterações não serão possíveis apenas por meio dos incentivos de mercado, tornando-se necessário o uso de diversos instrumentos de apoio para viabilizá-las. Nesse sentido, políticas industriais aparecem como instrumentos essenciais para a transição energética.

Por fim, mas não menos importante, o acirramento de diversas disputas de natureza geopolítica ampliou ainda mais a utilização das políticas industriais. Como anteriormente mencionado, a globalização deslocou diversas cadeias produtivas, e a desindustrialização de diversos países ocidentais levou a uma crescente dependência de diversos produtos estratégicos, como é o caso exemplar dos semicondutores. Tal sentimento foi intensificado durante a pandemia de Covid-19, bem como a partir da erupção da guerra na Ucrânia, tornando críticas as preocupações com segurança sanitária e instabilidades nas cadeias globais de suprimento.

Com isso, a perda de protagonismo e a crescente dependência das novas economias de base industrial, notadamente a chinesa, têm originado políticas que buscam trazer para o espaço geográfico nacional as cadeias

produtivas industriais (*reshoring*) ou, em alguns casos, estabelecer relações com fornecedores em países geograficamente próximos (*nearshoring*).

Em suma, pode-se afirmar que a transformação para a indústria de base digital, a emergência climática e a tensão geopolítica incentivaram a busca por maior autonomia nas cadeias de suprimentos, além de contribuírem decisivamente para a ampliação e difusão do uso de políticas industriais pelas principais economias industrializadas.

A revitalização da política industrial

Diversos trabalhos ressaltam a recente revitalização da política industrial e sua difusão pelo mundo. Isso já se fazia presente em um *working paper* publicado pelo Fundo Monetário Internacional (FMI), intitulado *The return of the policy that shall not be named: principles of industrial policy*. Essencialmente, o texto argumenta que, ao analisar as políticas industriais asiáticas, é possível aprender mais com os sucessos do que com os fracassos. Em específico, os autores sugerem três princípios fundamentais por trás do “milagre asiático”: (i) o apoio aos produtores domésticos em indústrias avançadas; (ii) a orientação para exportação; e (iii) o uso da concorrência como estímulo à eficiência produtiva (Cherif; Hasanov, 2019).

Juhász, Lane e Rodrik (2023) também analisaram como a nova política industrial está sendo moldada por uma nova governança, por um conjunto mais rico de instrumentos e pelos problemas associados à realidade da desindustrialização. Os autores constatam que, de fato, a política industrial ampliou-se, com as intervenções se expandindo a partir de 2010 e, especialmente, entre 2018 e 2021. Os países que mais

utilizaram PI foram justamente os de maior renda, sendo que, à medida que a renda *per capita* se eleva, cresce a utilização de PIs. Além disso, os autores ainda destacam que os instrumentos mais utilizados foram subsídios e medidas de promoção às exportações.

Em 2024, em outro *working paper* do FMI, *The return of industrial policy in data*, Evenett *et al.* (2024) buscaram organizar e classificar as políticas, concluindo que as economias avançadas foram as mais ativas em implementar PIs, e o fizeram principalmente por meio de subsídios domésticos ou de subsídios à exportação. Por sua vez, as economias em desenvolvimento usam com maior frequência restrições às importações e exportações.

Ao sistematizar os principais motivos alegados para o estabelecimento de PIs, o trabalho encontrou os seguintes motivos em ordem de importância: (i) o apoio a setores estratégicos para ampliar a competitividade; (ii) enfrentar as mudanças climáticas e ampliar a resiliência da cadeia de fornecimento; e (iii) motivos de segurança nacional e de natureza geopolítica (Evenett *et al.*, 2024).

Criscuolo *et al.* (2023), em um *policy paper* da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), buscaram quantificar as estratégias e ações de política industrial em alguns países membros da OCDE. Dada a amplitude de ações possíveis (incentivos de pesquisa e desenvolvimento – P&D, compras governamentais etc.), em uma primeira fase o estudo se concentrou nos gastos do setor público em apoio direto às empresas, para ampliar a competitividade. Os dados se referem ao período 2019-2021 e englobam países como Canadá, Dinamarca, França, Irlanda, Israel, Itália, Países Baixos, Suécia e Reino Unido, além de incluírem as despesas relevantes da política industrial da União Europeia para os países que dela participam.

Os principais resultados foram que os gastos fiscais em políticas industriais são significativos e, em média, representam 1,4% do produto interno bruto (PIB), embora sejam heterogêneos entre os países. Esses gastos diretos são complementados por subsídios financeiros, sendo as estratégias principais setoriais, notadamente em energia, transportes e indústria de transformação. As políticas industriais verdes são as que têm apresentado maior crescimento entre 2019 e 2021, com aumento médio de 0,24% a.a.

Esse “retorno” da política industrial nas principais economias ocidentais que vivenciaram o enxugamento de seus parques industriais com o processo de globalização se deu por meio de um amplo conjunto de medidas que foi crescendo gradativamente.

Inicialmente, observou-se o apoio à modernização e à digitalização da indústria com a estruturação de redes de conhecimento, unindo pesquisadores, empresas e o governo, com o objetivo de potencializar a difusão e adoção de tecnologia digital, isto é, o suporte a centros de pesquisa e inovação e incentivos à modernização dos parques industriais. Essas políticas deram ênfase ao desenvolvimento das chamadas tecnologias habilitadoras,⁶ aquelas que, por suas características mais genéricas, formam uma base de conhecimento ampla que pode ser difundida em conjuntos diversos de aplicações e se multiplicar em novas tecnologias secundárias (Daudt; Willcox, 2016). O Quadro 1 resume as iniciativas de algumas das principais economias industrializadas.

⁶ Uma descrição das tecnologias habilitadoras pode ser encontrada em NSTC (2022).

Quadro 1 | Iniciativas de apoio à digitalização na indústria (países selecionados)

Iniciativa/ano	Objetivo
Manufacturing USA EUA – 2014	Estrutura uma rede que atualmente conta com 16 institutos de pesquisa, oferecendo suporte à ampliação da competitividade industrial.
High Value Manufacturing Catapult Reino Unido – 2011	Auxilia empresas a adotar e desenvolver novas tecnologias, estruturar cadeias de fornecedores e obter escala de produção.
Plattform Industrie 4.0 Alemanha – 2013	Estrutura uma rede de suporte com vistas à digitalização das cadeias de produção industrial.
Alliance Industrie du Futur França – 2015	Coordena iniciativas para difusão e incorporação de tecnologia digital por meio da estruturação de uma rede de atores relevantes.
Industria 4.0 Itália – 2017	Busca apoiar a digitalização da indústria italiana, com foco na aquisição de ativos, formação de mão de obra e pesquisa e desenvolvimento.
Produktion 2030 Suécia – 2013	Suporte à inovação para a indústria manufatureira coordenado pela Vinnova (Agência Sueca de Inovação).
Smart Manufacturing Canadá – 2016	Programa governamental para auxiliar a adoção de tecnologias digitais na indústria.
Society 5.0 Japão – 2016	Iniciativa para integrar espaços físicos e digitais, incluindo o fortalecimento industrial por meio de robótica, IA e IoT.

Fonte: Elaboração própria com base em informações sobre as iniciativas disponíveis, respectivamente, em: (i) <https://www.manufacturingusa.com/studies/ensuring-industry40-accessible-manufacturers>; (ii) <https://hvm.catapult.org.uk/>; (iii) <https://www.plattform-i40.de/EN/Navigation/DE/Home/home.html>; (iv) <https://www.eitmanufacturing.eu/partner/alliance-industrie-du-futur/>; (v) https://www.mimit.gov.it/images/stories/documents/INDUSTRIA-40-NATIONAL%20PLAN_EN-def.pdf; (vi) <https://produktion2030.se/>; (vii) <https://nrc.canada.ca/en/research-development/research-collaboration/programs/advanced-manufacturing-program>; e (viii) https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5_0/index.html. Acesso em: 2 set. 2025.

Além das iniciativas listadas, diversas outras ações semelhantes se difundiram pelo mundo.⁷ Como mencionado anteriormente, a crescente difusão de políticas públicas de suporte à indústria de transformação decorreu da consciênciā da importância da indústria no desenvolvimento econômico e da necessidade de apoiá-la na transformação digital. A sucessão de eventos climáticos deu um novo senso de urgência à transformação da matriz energética e de transportes, deslançando as

⁷ Para uma sistematização de diversas iniciativas de apoio à Indústria 4.0, ver CNI (2023) e CEU-UIA (2025).

políticas industriais “verdes”. No entanto, foi a pandemia de Covid-19 e a evidência da fragilidade nas cadeias de suprimento globais que deu o toque derradeiro para a adoção de grandes blocos de políticas industriais (Mungioli; Daudt; Willcox, 2019). O Quadro 2 sistematiza essas ações para países selecionados.

Quadro 2 | Políticas industriais (países selecionados)

País	Política industrial
EUA	Bipartisan Infrastructure Law CHIPS and Science Act Inflation Reduction Act (IRA)
União Europeia	Green Deal Industrial Plan REPowerEU Net-Zero Industry Act Critical Raw Materials Act
Reino Unido	Industrial Decarbonization Strategy Net Zero Strategy UK Innovation Strategy
Coreia do Sul	Korean New Deal
Japão	Japan Green Growth Strategy Science, Technology and Innovation Basic Plan
China	Made in China 2025

Fonte: Elaboração própria.

Dada a importância e extensão dessas ações, porém, procurando nos manter no limitado espaço deste artigo, faremos uma exposição adicional e concisa de algumas iniciativas.

Estados Unidos da América

Nos últimos anos, os EUA aprovaram uma série de ações legislativas que buscavam ampliar as inovações e a competitividade da indústria local. São destaque o Bipartisan Infrastructure Law, o Creating Helpful

Incentives to Produce Semiconductors (CHIPS) and Science Act e o Inflation Reduction Act (IRA). Juntas, essas ações representam um montante de cerca de US\$ 2 trilhões de gastos nos próximos dez anos (The White House, 2023).

O Bipartisan Infrastructure Law, de 15 de novembro de 2021, previu US\$ 550 bilhões em novos investimentos, que se somarão aos US\$ 423 bilhões anteriormente previstos a fim de incrementar a infraestrutura existente ao longo de cinco anos. Os investimentos priorizam os transportes (rodovias, ferrovias, hidrovias, portos, aeroportos, sistemas e segurança de trânsito), e estão também previstas inversões em saneamento básico, segurança e acesso à banda larga de internet, rede elétrica, infraestrutura urbana, infraestrutura de carga de veículos elétricos, substituição de ônibus, balsas e *ferry-boats* movidos a energia fóssil, segurança hídrica do oeste do país e prevenção a eventos climáticos e desastres naturais (A Guidebook..., 2024).

O CHIPS and Science Act, de 9 de agosto de 2022, caracteriza outro marco na retomada da política industrial, com o objetivo declarado de elevar as inovações, a competitividade e a segurança nacional dos EUA. O país perdeu grande parte da produção de semicondutores e a dependência da cadeia de suprimentos do exterior mostrou-se temerária durante a pandemia, quando houve escassez de fornecimento e consequente paralisação de importantes cadeias de produção no país. Além dos investimentos na fabricação de semicondutores, a iniciativa busca elevar gastos em P&D e outras tecnologias avançadas, como computação quântica, IA, nanotecnologia e energia limpa. Há também incentivos à formação de força de trabalho especializada em ciência, tecnologia, engenharia e matemática. O CHIPS Act direciona US\$ 280 bilhões a essas ações nos próximos dez anos (Fact..., 2022).

O Inflation Reduction Act, de 16 de agosto de 2022, prevê aproximadamente US\$ 500 bilhões em gastos e incentivos fiscais destinados à energia limpa, redução de custos de saúde e aprimoramento do *compliance* de receitas fiscais. O objetivo principal é implementar ações que possam incrementar investimentos e P&D em tecnologias verdes, destinando US\$ 394 bilhões à energia renovável, com o propósito de reduzir as emissões de carbono. Esse montante será composto de incentivos fiscais, garantias e fundos não reembolsáveis e destina-se à infraestrutura de energia, à matriz de transporte – com destaque para os veículos elétricos (VE) – e à manufatura, agricultura, manutenção de recursos hídricos e preservação do meio ambiente (The White House, 2023).

Note-se que o IRA também destina incentivos aos consumidores. Um montante de US\$ 43 bilhões busca fomentar VEs, eletrodomésticos com maior eficiência energética, painéis solares, aquecimento geotérmico e baterias, tornando-os mais acessíveis. São elegíveis apenas veículos elétricos cuja montagem final seja realizada nos EUA. Há também outras exigências de conteúdo local.⁸

Vale ressaltar que a eleição de Donald Trump pelo partido Republicano ao final de 2024 gerou dúvidas sobre a manutenção de alguns dos instrumentos de política industrial aqui descritos. Embora ainda persista a narrativa de reindustrialização do país e reconstrução da competitividade internacional da indústria, o governo aparenta predileção por mecanismos distintos dos tradicionalmente utilizados. Em especial, a atual gestão vem sendo caracterizada pela adoção de imposições tarifárias unilaterais e ultimatos a empresas e países. A questão, entretanto, permanece em aberto e permeada de grande incerteza. Para uma discussão sobre esse ponto, ver Reynolds (2025) e Calidas e Li (2025).

⁸ Há outras iniciativas ativas como o já mencionado Manufacturing USA e o National Strategy for Advanced Manufacturing, lançada em outubro de 2022 com o objetivo de desenvolver a manufatura avançada.

União Europeia

A preocupação europeia em reconstruir uma indústria verde e mais independente das cadeias de suprimento globais se revelou inicialmente no Green Deal Industrial Plan, que busca atingir a neutralidade nas emissões de carbono, via transição energética (conforme o REPowerEU Plan),⁹ reduzindo os custos da energia renovável (Net-Zero..., 2023). Para possibilitar a transição tecnológica de base verde e digital, pretende-se simplificar o ambiente regulatório, aprimorar as tecnologias verdes, diversificar as cadeias de suprimentos e facilitar o financiamento de investimentos.¹⁰

Especificamente, o Green Deal Industrial Plan pretende acelerar a adoção de tecnologias limpas na indústria europeia, contribuindo para a descarbonização. A Comissão Europeia prevê que € 250 bilhões serão disponibilizados por meio do Recovery and Resilience Facility (RRF). O InvestEU Programme, um fundo europeu destinado a setores estratégicos, irá mobilizar outros € 372 bilhões para investimentos em energia renovável, ao passo que o Innovation Fund (Fundo Europeu para Inovações) financiará € 40 bilhões em projetos que auxiliem o atingimento da neutralidade de emissões.

O Net-Zero Industry Act, aprovado consensualmente pelo Parlamento Europeu em 29 de junho de 2024, objetiva ampliar a competitividade das indústrias europeias de bens “verdes”. São exemplos desses bens: painéis fotovoltaicos, bombas para energia geotérmica, aparelhos de eletrólise para células de combustível, geradores e torres eólicas (*onshore* e *offshore*), biodigestores para biogás e biometano, baterias e

9 REPowerEU é um plano da Comissão Europeia que busca minimizar a dependência de combustíveis fósseis oriundos da Rússia até 2030, como forma aumentar a resiliência a choques externos.

10 Nota-se que as políticas comuns da União Europeia não impedem que os países-membros, individualmente, estabeleçam políticas industriais, tais como aquelas do Quadro 1 que permanecem vigentes.

capacitores, *smart grids* (para monitoramento e gestão da energia) e aparelhos para captura e estocagem de carbono. O objetivo é estruturar ações para garantir que a indústria europeia possa suprir ao menos 40% das suas necessidades de bens voltados à descarbonização até 2030, reduzindo a dependência de importações. Possibilitar melhores condições para esses setores permitirá à União Europeia reduzir sua elevada dependência das importações desse tipo de bens (Her Majesty's Government, 2021a).

Já o Critical Raw Materials Act, aprovado em maio de 2024, busca diminuir os riscos de interrupção do fornecimento de minerais críticos. A lei prevê uma listagem com as matérias-primas consideradas essenciais para as tecnologias verdes, digitais e de defesa e estabelece metas de produção a serem alcançadas até 2030 (Critical..., 2023; [2024]).

Reino Unido

A Industrial Decarbonization Strategy, anunciada em 2021, pretende reduzir dois terços das emissões de carbono até 2050. Essa meta será ampliada para até 90% a partir de 2050. Estão previstos gastos públicos anuais de cerca de £ 670 milhões para suporte à competitividade, £ 1,32 bilhão para infraestrutura e £ 684 milhões para fundos de financiamento (Her Majesty's Government, 2021a).

Já a Net Zero Strategy, também de 2021, estabelece políticas de descarbonização para diversas áreas da economia britânica a fim de atingir a neutralidade de emissões em 2050. Além disso, define metas para os principais setores de energia, combustíveis e hidrogênio, indústria, aquecimento e edificações, transportes, recursos naturais, resíduos, gases fluorados e removedores de GEE. Os planos preveem estimular investimentos públicos e privados no montante de até £ 784 bilhões (Her Majesty's Government, 2021b).

Por fim, o UK Innovation Strategy busca tornar o Reino Unido um *hub* global de inovação, elevando o investimento público em P&D de tecnologias transformadoras, que poderá atingir £ 22,4 bilhões.

Mais recentemente, o governo britânico anunciou o UK's Modern Industrial Strategy 2025, estabelecendo trajetórias para fomentar o investimento em setores-chave para o incremento da produtividade do país. Setores estratégicos como energia limpa, alta tecnologia e defesa estão incluídos (UK Government, 2025).

Coreia do Sul

O Korean New Deal foi anunciado em 2020 objetivando estabelecer as diretrizes do desenvolvimento coreano pelos próximos cem anos e fundamenta-se em três pilares: (i) criação de empregos, com ênfase naqueles associados à transição para uma economia digital e sustentável; (ii) construção da infraestrutura necessária para acelerar a transformação digital e “verde”; e (iii) estabelecimento da liderança da Coreia do Sul para uma economia de baixo carbono e inclusiva.

O Korean New Deal inclui 28 projetos estratégicos, sendo seis do Digital New Deal; seis do Green New Deal; e oito relacionados ao Stronger Safety Net. Em 2021, por meio do Korean New Deal 2.0, o orçamento foi reforçado para garantir um investimento público no montante de ₩ 160 trilhões, equivalente a cerca de US\$ 120 bilhões (GRK, 2020).

Japão

A Japan Green Growth Strategy é uma política industrial que pretende garantir um novo ciclo de crescimento econômico sustentável, compatível com a neutralidade nas emissões de carbono até 2050. A estratégia propõe planos de ação para 14 setores.

Foram definidas políticas para indústrias de alto impacto na descarbonização: (i) energias renováveis eólicas *offshore* e produção de baterias solares; (ii) hidrogênio, incluindo infraestrutura e produção a custos reduzidos; (iii) energia térmica, com captura e estocagem de carbono (*carbon capture, utilization, and storage – CCUS*); e (iv) energia nuclear, com a ampliação da segurança e P&D em novos reatores. Na matriz de transportes: eletrificação, biocombustíveis e hidrogênio. Além disso, serão incentivadas a otimização da produção e do consumo de energia (*smart grids*, automação industrial e IoT) e a indústria de semicondutores.

Concomitantemente, o aumento da eletrificação demandará um incremento de até 50% no consumo de energia, que deverá ser atendido por meio da ampliação de oferta de fontes renováveis (50% a 60%), energia nuclear e térmica com CCUS (30% a 40%) e hidrogênio (10%). O MITI estima que o impacto orçamentário das medidas de suporte estará na casa de ¥ 2 trilhões, equivalente a cerca de US\$ 14 bilhões.

Por fim, atualmente, o Science, Technology and Innovation Basic Plan tem como meta o desenvolvimento de uma sociedade mais sustentável, segura e promotora do bem-estar. Para tanto, o governo japonês pretende gastar ¥ 30 trilhões (US\$ 210 bilhões) em investimentos em P&D com o intuito de alavancar cerca de ¥ 120 trilhões (US\$ 840 bilhões) em investimentos privados (Japan, 2019).

China

A China não se inclui na lógica de “retorno” da política industrial, dado que sempre usou, de forma muito ativa, instrumentos de apoio ao setor de indústrias, utilizando zonas especiais de exportação para atrair investimentos estrangeiros e fomentar a capacitação interna por meio da transferência de tecnologia. Diversos outros instrumentos

foram empregados, como um complexo sistema de tarifas, licenças e barreiras não tarifárias, investimentos estatais e controles das taxas de câmbio. Como resultado, construiu-se um parque industrial de empresas nacionais capazes de produzir e exportar uma pauta sofisticada de produtos de elevado valor agregado. Tendo em vista a importância do país na indústria mundial, qualquer panorama de políticas industriais vigentes estaria incompleto sem sua presença.

Entre as diversas políticas públicas, foram característicos os planos quinquenais, que estabeleciam conjuntos de metas de desenvolvimento econômico, bem como uma estrutura industrial. Como parte das medidas do 13º Plano Quinquenal (2016-2020), sobressai o Made in China 2025, inspirado no programa alemão Industrie 4.0, que é a principal estratégia chinesa para o desenvolvimento industrial. O programa visa à reestruturação da indústria, tornando-a mais competitiva, por meio da adoção e difusão de tecnologia e inovação. Ademais, prioriza o desenvolvimento de dez setores-chave: tecnologias da informação (TI), máquinas de controle numérico e robótica, equipamentos aeroespaciais, veículos de alta tecnologia e fontes de energia renováveis, equipamentos ferroviários, indústria naval de alta tecnologia, biomedicina, equipamentos médicos de alta performance, novos materiais e máquinas agrícolas. O montante de recursos aplicados é de cerca de US\$ 632,2 bilhões (EUCCC, 2017).

Atualmente, vige o 14º Plano Quinquenal, que segue a tendência mundial de estruturar cadeias de suprimento mais resilientes e dá destaque à difusão digital e ao meio ambiente. O plano visa acelerar o desenvolvimento tecnológico e a aplicação de tecnologias de informação, biotecnologia, desenvolvimento aeroespacial e outras indústrias consideradas estratégicas, reduzindo a dependência de tecnologias e insumos importados. Prevê, ainda, a expansão da oferta de energia limpa, de forma que atinja um mínimo de 20% do total até 2025. Também

propõe a forte expansão da frota de veículos movidos a combustíveis não fósseis, como os elétricos e híbridos (ADB, 2021). A nova diretriz de política industrial da China utiliza o conceito de *new quality productive forces* (NQPF), que tem por objetivo um *high-quality development* e compreende uma estrutura em três camadas: (i) tecnologia e inovação; (ii) desenvolvimento industrial futuro; e (iii) cadeias industriais. Além disso, o desenvolvimento de talentos, sustentabilidade ambiental e reformas nos sistemas econômicos e de inovação são identificados como os três principais facilitadores para o desenvolvimento de novas forças produtivas de qualidade (Fan, 2024).

Como se pode observar, as diversas políticas industriais aqui descritas têm em comum o reconhecimento de que os desafios da implementação de uma indústria digital, em conjunto com a emergência climática, abrem uma dupla janela de oportunidade (digital e verde) que deve ser aproveitada para a revitalização do tecido industrial, garantindo ganhos de produtividade e ampliação da resiliência nas cadeias industriais estratégicas. É nesse contexto que se insere a iniciativa Nova Indústria Brasil (NIB).

A iniciativa NIB

A partir de 2023, o governo brasileiro assumiu como prioridade uma nova política industrial visando reverter a desindustrialização precoce da economia brasileira. Esse desafio foi denominado neoindustrialização, isto é, apoiar a indústria nacional para enfrentar os desafios da transição digital e ambiental, bem como garantir a resiliência de setores estratégicos. Nesse sentido, o programa NIB está perfeitamente alinhado

com o consenso de que uma indústria forte é condição necessária para retomada e consolidação de um desenvolvimento inclusivo e sustentável.

A NIB consiste em um plano de ações para o período de 2024-2026 e está organizada em missões. O conceito de política industrial que orienta as missões pode ser encontrado em Mazzucato (2021) e apresenta-se como uma estratégia de desenvolvimento associada a um objetivo específico, podendo envolver diversos incentivos voltados ao atingimento de metas que, ao final, resultarão no cumprimento das missões.¹¹

Assim, a iniciativa pretende estimular inovações e alcançar o progresso técnico por meio da reinustrialização da economia brasileira. Esse movimento se dará pela incorporação de tecnologias digitais acompanhada pela introdução sistemática de tecnologias de baixa emissão de carbono. No Quadro 3, é possível observar as seis missões que constituem a NIB.

Quadro 3 | Missões, áreas de atuação e cadeias de produção prioritárias da NIB

Missão	Áreas de atuação	Produção prioritárias
Missão 1	Cadeias agroindustriais sustentáveis e digitais para a segurança alimentar, nutricional e energética.	Agricultura de precisão, máquinas agrícolas e componentes; fertilizantes e biofertilizantes; têxtil.
Missão 2	Complexo econômico industrial da saúde resiliente para reduzir as vulnerabilidades do Sistema Único de Saúde (SUS) e ampliar o acesso à saúde.	Medicamentos e princípios ativos biológicos; vacinas, hemoderivados e terapias avançadas.

(Continua)

11 Para a autora, atualmente, tanto o sistema financeiro quanto as empresas privadas estão pressionados a gerar resultados no curto prazo, frequentemente revisados trimestralmente. Dessa forma, há grandes dificuldades em financiar investimentos de longo prazo. A esse quadro soma-se o esvaziamento crescente do papel do Estado. O resultado é a impossibilidade de fazer frente aos grandes desafios impostos pela emergência climática, saúde pública e transformação digital. Nesse sentido, Mazzucato (2021), com base nas lições derivadas dos casos de sucesso de grandes projetos, como a missão Apolo, defende que a economia seja orientada por propósitos, o que pressupõe a reformulação do papel do Estado, que atuará orientado às ações das parcerias público-privadas para o atingimento das missões. Em suas palavras: “I call this different way of doing things a mission-oriented approach. It means choosing directions for the economy and then putting the problems that need solving to get there at the centre of how we design our economic system. It means designing policies that catalyse investment, innovation and collaboration across a wide variety of actors in the economy, engaging both business and citizens” (Mazzucato, 2021, p. 8).

(Continuação)

Missão	Áreas de atuação	Produção prioritárias
Missão 3	Infraestrutura, saneamento, moradia e mobilidade sustentáveis para a integração produtiva e bem-estar nas cidades.	Sistemas de propulsão; baterias elétricas; metroferroviário, inclusive peças e equipamentos.
Missão 4	Transformação digital da indústria (Indústria 4.0) para ampliar a produtividade.	Semicondutores; robôs industriais; produtos e serviços digitais avançados; plataformas digitais, nuvem e audiovisual.
Missão 5	Bioeconomia, descarbonização, transição e segurança energéticas para garantir os recursos para as gerações futuras.	Novas fontes de energia (hidrogênio, diesel verde e combustível sustentável de aviação – SAF); equipamentos de energia verde; descarbonização da indústria de base.
Missão 6	Tecnologias de interesse para a soberania e defesa nacionais.	Veículos lançadores; radares; satélites.

Fonte: Elaboração própria com base em Brasil (2025).

Inicialmente, foram previstos recursos para o Plano Mais Produção (braço de financiamento da NIB) no montante de R\$ 300 bilhões até o fim de 2026, tendo sido o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii) incumbidos de disponibilizar recursos. Contudo, houve um aumento desse montante de recursos, resultado da agregação de novos agentes financeiros – Banco do Brasil, Caixa Econômica Federal, Banco do Nordeste e Banco da Amazônia –, os quais, conjuntamente com os parceiros originais, alavancaram R\$ 507 bilhões. Desse valor, R\$ 384,4 bilhões já foram aprovados em 2023 e 2024 (NIB..., 2025), tendo o BNDES investido cerca de R\$ 220 bilhões (BNDES..., 2025a; BNDES..., 2025b).

Se forem somados os investimentos públicos, os valores da NIB atingem R\$ 1,2 trilhão. Essas ações ensejaram um efeito *crowding in* e investimentos

privados de R\$ 2,2 trilhões associados às missões da NIB foram anunciados (NIB..., 2025).

Desde que a NIB entrou em vigor, alguns indicadores importantes mostraram uma melhora. Segundo um levantamento da Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO, na sigla em inglês), o Brasil passou da 70^a para a 40^a posição no ranking global de produção industrial, ganhando trinta posições no último ano. Ademais, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) verificou que a indústria brasileira chegou a 83% de utilização da capacidade instalada, o maior índice dos últimos 13 anos. Outro ponto é que, na comparação com o ano anterior, a geração de novos empregos na indústria cresceu 146% em 2024 (NIB..., 2025).

Considerações finais

Nas duas últimas décadas do século XX, as políticas industriais foram reduzidas nas principais economias industrializadas do Ocidente. Isso porque havia sido difundida uma visão de que elas teriam dois grandes defeitos: primeiro, que as assimetrias de informação impedem o Estado de definir corretamente as intervenções, criando ineficiências; segundo, que grupos de interesse são capazes de capturar politicamente os governos e fazer prevalecer seus interesses.¹²

De modo crescente, importantes cadeias industriais foram migrando para países asiáticos, os quais costumam ser mais pragmáticos quanto ao uso de instrumentos de apoio à estruturação de parques industriais. Conjuntamente com as cadeias industriais, também foram transferidas

12 Para uma análise dessas questões, ver Chang e Andreoni (2016).

a produção de diversos bens de alto valor agregado, isto é, bens oriundos de setores com elevados incentivos à inovação que permitem a transformação digital e a geração de empregos qualificados.

O século XXI e a realidade das dificuldades inerentes à desindustrialização trouxeram de volta a consciência de que a indústria é essencial ao desenvolvimento e de que uma política industrial bem estruturada e sujeita a permanente avaliação é uma aliada poderosa para a manutenção do tecido industrial. Como destacado, os desafios da manufatura avançada, da emergência climática e, mais recentemente, da instabilidade e dependência em cadeias de suprimento estratégicas alteraram definitivamente o jogo em favor do uso de políticas industriais.

Cabe destacar que trabalhos acadêmicos, como os de Juhász *et al.* (2023) e de Juhász, Lane e Rodrik (2023), e textos publicados pelo FMI (Evenett *et al.*, 2024) e pela OCDE (Criscuolo *et al.*, 2023) reportam que são os países desenvolvidos que mais utilizam políticas industriais, desmystificando argumentos de que países em desenvolvimento utilizariam o apoio do Estado para cobrir ineficiências e criar competências artificiais. Tendo isso em vista, as políticas industriais descritas ao longo deste trabalho apenas corroboram essas conclusões.

Nesse sentido, a NIB veio preencher o vácuo que existia no suporte à indústria, estimulando o progresso técnico e a transformação digital e ecológica. A NIB objetiva elevar a produtividade de nossa indústria, gerando empregos de qualidade, e ampliar nossa competitividade, repositionando o país no comércio internacional.

A complexidade dos objetivos da NIB pressupõe uma abordagem multisectorial e integrada. Exemplos de ações de enfrentamento aos desafios poderão auxiliar na compreensão de como o BNDES tem atuado para a superação dos óbices atuais e contribuído para o fortalecimento do setor industrial brasileiro. É o que se verá adiante nos artigos desta publicação.

Referências

ADB – ASIAN DEVELOPMENT BANK. *The 14th Five-Year Plan of the People's Republic of China – fostering high-quality development*. Metro Manila: ADB, 2021. Disponível em: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/705886/14th-five-year-plan-high-quality-development-prc.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2024.

A GUIDEBOOK to the Bipartisan Infrastructure Law. *The White House*, Washington, DC, jan. 2024. Disponível em: <https://bidenwhitehouse.archives.gov/build/guidebook/>. Acesso em: 23 set. 2025.

AMSDEN, A. *A ascensão do “resto”: os desafios ao Ocidente de economias com industrialização tardia*. São Paulo: Editora Unesp, 2009.

ANDREONI, A. Varieties of industrial policy: models, packages, and transformation cycles. In: NOMAN, A.; STIGLITZ, J. E. (Eds.). *Efficiency, finance, and varieties of industrial policy: guiding resources, learning and technology for sustained growth*. New York: Columbia University Press, 2016. p. 245-305.

BLOCK, F. Swimming against the current: the rise of a hidden Developmental State in the United States. *Politics & Society*, Los Altos, v. 36, n. 2, p. 169-206, 2008.

BNDES amplia para R\$ 300 bi investimento na Nova Indústria Brasil. *Agência BNDES de Notícias*, Rio de Janeiro, 26 mai. 2025a. Disponível em: <https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/detalhe/noticia/BNDES-amplia-para-R%20-300-bi-investimento-na-Nova-Industria-Brasil/>. Acesso em: 2 set. 2025.

BNDES já aprovou R\$ 220 bilhões na Nova Indústria Brasil. *Agência BNDES de Notícias*, Rio de Janeiro, 8 jul. 2025b. Disponível em: <https://agenciadenoticias.bnbes.gov.br/cultura/BNDES-ja-aprovou-R%20-220-bilhoes-na-Nova-Industria-Brasil/>. Acesso em: 2 set. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Nova Indústria Brasil – forte, transformadora e sustentável*: Plano de Ação para a Neoindustrialização 2024-2026. Brasília, DF: MDIC, 2025. Disponível em: www.gov.br/mdic/pt-br/composicao/se/cndi/plano-de-acao/nova-industria-brasil-plano-de-acao-2024-2026-1.pdf. Acesso em: 2 set. 2025.

CALIDAS, D.; LI, C. Beyond rhetoric: the enduring political appeal of U.S. Industrial Policy for Critical and Strategic Technologies. *Harvard's Belfer Center for Science and International Affairs*, Cambridge, 14 mar. 2025. Disponível em: <https://www.belfercenter.org/research-analysis/beyond-rhetoric-us-industrial-policy>. Acesso em: 2 set. 2025.

CEU-UIA – CENTRO DE ESTUDIOS DE LA UNIÓN INDUSTRIAL ARGENTINA. *Retorno de la política industrial*. Buenos Aires: CEU-UIA, 2025. Disponível: https://drive.google.com/file/d/1w_CmRFQPSeE1ceX0c2jQuCZn5nV24y0T/view. Acesso em: 2 set. 2025.

CHANG, H. J. *Chutando a escada: a estratégia do desenvolvimento em perspectiva histórica*. São Paulo: Editora Unesp, 2004.

CHANG, H. J.; ANDREONI, A. Industrial policy in a changing world: basic principles, neglected issues and new challenges. In: 40 YEARS OF THE CAMBRIDGE JOURNAL OF ECONOMICS CONFERENCE, 1., 2016, Cambridge. *Conference papers [...]*. Cambridge: Cambridge Political Economy Society, 2016. Disponível em: https://cpes.org.uk/wp-content/uploads/2016/06/Chang_AAndreoni_2016_Industrial-Policy.pdf. Acesso em: 21 abr. 2025.

CHERIF, R.; HASANOV, F. *The return of the policy that shall not be named: principles of industrial policy*. Washington, DC: International Monetary Fund, 2019. Disponível em: <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2019/03/26/The-Return-of-the-Policy-That-Shall-Not-Be-Named-Principles-of-Industrial-Policy-46710>. Acesso em: 22 abr. 2025.

CHU, Y. (Ed.). *The Asian Developmental State: reexaminations and new departures*. New York: Palgrave Macmillan, 2016.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. *Plano de Retomada da Indústria: uma nova estratégia, focada em inovação, descarbonização, inclusão social e crescimento sustentável*. Brasília, DF: CNI, 2023. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/99/4c/994c17a5-e837-4aea-9de5-54048ec499b5/plano_de_retomada_9mai23_web.pdf. Acesso em: 21 nov. 2024.

CRISCUOLO, C. et al. *Quantifying industrial strategies across nine OECD countries*. Paris: OECD Publishing, 2023. (OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, n. 150). Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/quantifying-industrial-strategies-across-nine-oecd-countries_5f2dcc8e-en.html. Acesso em: 2 set. 2025.

CRITICAL Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future. European Comission, Brussels, 15 mar. 2023. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661. Acesso em: 2 set. 2025.

CRITICAL Raw Materials Act. European Comission, Brussels, [2024]. Disponível em: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en. Acesso em: 13 de set. 2025.

DAUDT, G.; WILLCOX, L. D. Reflexões críticas a partir das experiências dos Estados Unidos e da Alemanha em manufatura avançada. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 44, p. 5-45, set. 2016. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9936>. Acesso em: 13 set. 2025.

EUCCC – EUROPEAN UNION CHAMBER OF COMMERCE IN CHINA. *China Manufacturing 2025: putting industrial policy ahead of market forces*. Beijing: European Chamber, 2017. Disponível em: <https://www.europeanchamber.com.cn/en/press-releases/2532>. Acesso em: 4 de mai. de 2025.

EVENETT, S. et al. *The return of industrial policy in data*. Washington, DC: International Monetary Fund, 2024. Disponível em: <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2023/12/23/The-Return-of-Industrial-Policy-in-Data-542828>. Acesso em: 5 mai. 2025.

FACT Sheet: CHIPS and Science Act will lower costs, create jobs, strengthen supply chains, and counter China. *The White House*, Washington, DC, 9 ago. 2022. Disponível: <https://bidenwhitehouse.archives.gov/briefing-room/statements-releases/2022/08/09/fact-sheet-chips-and-science-act-will-lower-costs-create-jobs-strengthen-supply-chains-and-counter-china/>. Acesso em: 15 jan. 2024.

FAN, Z. China's emerging industrial vision: the significance and impact of 'New Quality Productive Forces'. *Cambridge Industrial Innovation Policy*, Cambridge, 17 abr. 2024. Disponível em: <https://www.ciip.group.cam.ac.uk/reports-and-articles/chinas-emerging-industrial-vision/>. Acesso em: 2 set. 2025.

GRK – GOVERNMENT OF THE REPUBLIC OF KOREA. *Korean New Deal: national strategy for a great transformation*. Seoul: GRK, 2020. Disponível: <https://english.moef.go.kr/skin/doc.html?fn=Korean%20New%20Deal.pdf&rs=/result/upload/mini/2020/07/>. Acesso em: 2 set. 2025.

HER MAJESTY'S GOVERNMENT. *Industrial Decarbonisation Strategy*. London: Her Majesty's Government, 2021a. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/industrial-decarbonisation-strategy>. Acesso em: 4 mai. 2025.

HER MAJESTY'S GOVERNMENT. *Net Zero Strategy: build back greener*. London: Her Majesty's Government, 2021b. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6194dfa4d3bf7f0555071b1b/net-zero-strategy-beis.pdf>. Acesso em: 4 mai. 2025.

INDUSTRIA 4.0 National Plan for Industry. *Ministero delle Imprese e del Made in Italy*, Roma, 2017. Disponível em: https://www.mimit.gov.it/images/stories/documenti/INDUSTRIA-40-NATIONAL%20PLAN_EN-def.pdf. Acesso em: 2 set. 2025.

JAPAN. Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. Science and Technology Basic Plan. *MEXT*, Tokyo, 2019. Disponível em: https://www.mext.go.jp/en/policy/science_technology/lawandplan/title01/detail01/1375311.htm. Acesso em: 2 set. 2025.

JOHNSON, C. *Miti and the Japanese miracle: the growth of industrial policy, 1925-1975*. Stanford: Stanford University Press, 1982.

JUHÁSZ, R.; LANE, N.; OEHLSSEN, E.; PÉREZ, V. C. *The who, what, when, and how of industrial policy: a text-based approach*. London: Structural Transformation and Economic Growth, 2023. (STEG Working Papers WP050). Disponível em: <https://steg.cepr.org/sites/default/files/2023-01/WP050%20Juh%C3%A1szLaneOehlsenP%C3%A9rez%20TheWhoWhatWhenAndHowOfIndustrialPolicy.pdf>. Acesso em: 2 set. 2025.

JUHÁSZ, R.; LANE, N. J.; RODRIK, D. *The new economics of industrial policy*. Cambridge: National Bureau of Economic Research, 2023. Disponível em: <https://www.nber.org/papers/w31538>. Acesso em: 4 mai. 2025.

KAPCZYNSKI, A.; MICHAELS, J. Administering a democratic industrial policy. *Harvard Law and Policy Review*, Cambridge, v. 18, p. 279-343, 2024. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4711216. Acesso em: 21 mai. 2025.

LABRUNIE, M.; PENNA, C.; KUPFER, D. O ressurgimento de políticas industriais na era da manufatura avançada: uma comparação internacional de documentos de política industrial. *Revista Brasileira de Inovação*, Campinas, v. 19, p. e0200020, 2020. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rbi/article/view/8658753>. Acesso em 22 de jul. de 2025.

LEE, K. *The art of economic catch-up: barriers, detours and leapfrogging in innovation systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.

MAZZUCATO, M. *The entrepreneurial state*. London: Anthem Press, 2013.

MAZZUCATO, M. *Mission economy: a moonshot guide to changing capitalism*. New York: HarperCollins, 2021.

MEDEIROS, C. Progresso técnico como empreendimento de Estado – Aula Magna. ANPEC, Niterói, 2018. Disponível em: <https://franklinserrano.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/12/Aula-Magna-Medeiros-2018-ANPEC.pdf>. Acesso em: 2 set. 2025.

MEDEIROS, C. Política Industrial e Divisão Internacional de Trabalho. *Revista de Economia Política*, São Paulo, v. 39, n. 1, p. 71-87, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rep/a/VRDCNpM4TrgfXGYcs5tMd3B/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 2 set. 2025.

MIGUEZ, T. et al. Uma visão de política industrial para o Brasil: resultados a partir de uma proposta de matriz tecnológica. BNDES, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15703/1/Artigo%20Matriz%20Tecnol%C3%ADgica%20-%20Atual.pdf>. Acesso em: 2 set. 2025.

MUNGIOLI, R.; DAUDT, G.; WILLCOX, L. D. Políticas econômicas de enfrentamento da Covid-19: da conjuntura global ao (o)caso da indústria brasileira. *BNDES Setorial*, v. 26, n. 52, p. 45-103, set. 2020. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/20181>. Acesso em: 13 set. 2025.

NET-ZERO Industry Act: making the EU the home of clean tech industries. *European Comission*, Brussels, 15 mar. 2023. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_1665. Acesso em: 4 mai. 2023.

NIB completa 1 ano com R\$ 3,4 trilhões de investimentos e crescimento industrial. *Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços*, Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2025/fevereiro/nib-completa-1-ano-com-r-3-4-trilhoes-de-investimentos-e-crescimento-industrial>. Acesso em: 2 set. 2025.

NSTC – NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL. *National Critical and Emerging Technologies Report*. Washington, DC: NSTC, 2022. Disponível em: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CMR-PREX23-00185928/pdf/CMR-PREX23-00185928.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2025.

REYNOLDS, E. Trump's industrial policy is more continuity than disruption. *Project Syndicate*, New York, 31 jan. 2025. Disponível em: <https://www.project-syndicate.org/commentary/trump-industrial-policy-similar-to-biden-administration-by-elisabeth-reynolds-2025-01>. Acesso em: 2 set. 2025.

ROSENBERG, N. Technological change in the machine tool industry, 1840-1910. *The Journal of Economic History*, Cambridge, v. 23, n. 4, p. 414-443, 1963.

THE WHITE HOUSE. *Building a clean energy economy: a guidebook to the Inflation Reduction Act's investments in clean energy and climate action*. Washington, DC: The White House, 2023. Disponível em: <https://case.house.gov/uploadedfiles/inflation-reduction-act-guidebook.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

THIRLWALL, A. A Plain Man's Guide to Kaldor's Growth Laws. *Journal of Post Keynesian Economics*, Armonk, v. 5, n. 3, p. 345-358, 1983.

UK GOVERNMENT. *The UK's Modern Industrial Strategy 2025*. London: UK Government, 2025. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/collections/the-uks-modern-industrial-strategy-2025>. Acesso em: 4 mai. 2025.

WADE, R. The American paradox: ideology of free markets and the hidden practice of directional thrust. *Cambridge Journal of Economics*, Cambridge, v. 41, n. 3, p. 859-880, 2017.

WARWICK, K. Beyond industrial policy: emerging issues and new trends. *OECD Publishing*, Paris, n. 2, 2013. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/beyond-industrial-policy_5k4869clw0xp-en.html. Acesso em: 8 jan. 2025.

DENSIDADE TECNOLÓGICA NO CONTEXTO DA NOVA POLÍTICA INDUSTRIAL

*Fabrício Brollo Dunham
Isabela Brod Lemos de Abreu
Maurício dos Santos Neves
João Paulo Pieroni
Marília Bassetti Marcato**

Palavras-chave: política industrial; inovação; neoindustrialização; densidade tecnológica.

* Respectivamente, gerente, coordenadora e chefe do Departamento de Inovação e Estratégia Industrial da Área de Desenvolvimento Produtivo e Inovação do BNDES; superintendente da mesma Área; e assessora do Presidente do BNDES.

TECHNOLOGICAL DENSITY IN THE CONTEXT OF THE NEW INDUSTRIAL POLICY

Fabrício Brollo Dunham

Isabela Brod Lemos de Abreu

Maurício dos Santos Neves

João Paulo Pieroni

*Marília Bassetti Marcato**

Keywords: industrial policy; innovation; neo-industrialization; technological density.

* Respectively, manager, coordinator, and head of the Innovation and Industrial Strategy Department of the BNDES's Productive Development and Innovation Division; superintendent of the same Division; and executive advisor of the BNDES's President.

Resumo

Este artigo avalia o apoio à inovação, considerando a densidade tecnológica dos projetos apoiados por instrumentos de crédito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), identificando seu alinhamento com as diretrizes da estratégia de neoindustrialização e com o aumento da complexidade da matriz produtiva brasileira. Para tanto, avaliaram-se os projetos aprovados entre 2023 e 2024, apoiados na modalidade direta por meio do Programa BNDES Mais Inovação. Atualmente, o Brasil enfrenta o desafio de retomar a produção industrial em novas bases, o que tem sido organizado por meio da política industrial vigente, denominada Nova Indústria Brasil (NIB). Para além do aumento da participação da indústria na economia, a estratégia de neoindustrialização busca impulsionar atividades de maior densidade tecnológica. A partir de uma análise qualitativa das operações, com base na combinação entre a classificação por intensidade tecnológica da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e a aderência a tecnologias habilitadoras do National Science and Technology Council (NSTC), este estudo identifica que o apoio do BNDES está alinhado aos objetivos da política industrial em vigor. Os segmentos de maior complexidade tecnológica ampliaram sua participação na indústria brasileira, respondendo aos instrumentos de apoio à inovação, o que sublinha sua relevância para a promoção do desenvolvimento industrial de forma estrutural.

Abstract

This article examines support for innovation by analyzing the technological density of projects financed through Brazilian Development Bank (BNDES) credit instruments. It identifies how these projects align with the guidelines of Brazil's neo-industrialization strategy and the goal of increasing the complexity of the national productive structure. The analysis focuses on projects approved between 2023 and 2024 that received direct support through the BNDES Innovation Program. Brazil currently faces the challenge of revitalizing its industrial production on new foundations. This revitalization is being structured within the ongoing industrial policy New Industry Brazil (NIB). The neo-industrialization strategy goes beyond simply expanding industry's share in the economy. It seeks to foster activities with

higher technological intensity. The study adopts a qualitative approach, combining the OECD's classification of technological intensity with the NSTC's enabling technologies framework. The results indicate that BNDES support matches the objectives of the current industrial policy. Sectors with greater technological complexity have expanded their presence in the Brazilian industry in response to innovation support instruments. This shows their importance for promoting structural industrial development.

Introdução

O fenômeno da desindustrialização, inclusive em sua faceta prematura, como é o caso brasileiro, apresenta diferentes padrões e heterogeneidades setoriais que são historicamente determinados. No Brasil, a desindustrialização, compreendida a partir da participação setorial no produto interno bruto (PIB) a preços constantes,¹ tem sido ainda mais expressiva nos setores intensivos em tecnologia e conhecimento (Araujo; Peres; Araujo, 2023; Morceiro; Guilhoto, 2023). Diante dessa caracterização, é cada vez mais relevante que as políticas direcionadas ao desenvolvimento industrial, ao considerarem o comportamento dos subsetores manufatureiros, busquem impulsionar as atividades produtivas de maior complexidade tecnológica. Nesse âmbito, cabe destacar a formulação da recente política industrial brasileira: a Nova Indústria Brasil (NIB).

A NIB considera, entre suas premissas, a necessidade de recomposição do tecido industrial em novas bases, colocando a capacidade inovativa no centro da busca por ganhos de competitividade. Os desafios estruturais e os aspectos relacionados às novas tendências mundiais também foram ponderados na formulação de uma política pública orientada por missões, cujo braço de apoio financeiro é o Plano Mais Produção, no qual o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) atua de forma substancial como apoiador de projetos de inovação.

Nesse sentido, este artigo busca avaliar o apoio à inovação a partir de instrumentos de crédito operados pelo BNDES, quanto à densidade tecnológica dos projetos, identificando seu alinhamento com as diretrizes

1 Há diferentes formas de retratar o fenômeno da desindustrialização. Ver Tregenna (2015) para uma ampla discussão a respeito das definições tradicionalmente utilizadas, tendo em vista diferentes dimensões analíticas, tais como emprego, valor adicionado e comércio internacional.

da estratégia de neoindustrialização e com o aumento da complexidade da matriz produtiva brasileira. Ao considerar o componente tecnológico dos projetos de inovação, esta análise baseia-se em uma amostra das operações de crédito realizadas, demonstrando que o atual cenário de recuperação da indústria de transformação brasileira reflete, pelo menos em parte, o esforço conjunto das referidas instituições vinculadas ao Governo Federal para estimular projetos de maior densidade tecnológica.

O contexto da indústria brasileira

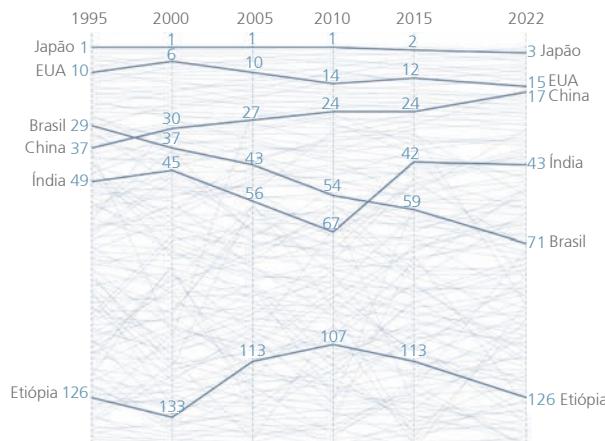
O Brasil experimentou um processo de desindustrialização acentuada, que se configura como um fenômeno experimentado por diversos países a partir da década de 1980. Esse fenômeno está relacionado ao deslocamento da produção industrial para o Sudeste Asiático. Nesse processo, os países desenvolvidos foram os mais afetados, substituindo as atividades industriais por serviços (Gordon; Pieroni, 2024).

No contexto brasileiro, a desindustrialização se processa de forma precoce e rápida, com significativa perda de complexidade industrial. Morceiro e Guilhoto (2023), ao construírem séries de dados setoriais para a indústria de transformação brasileira no período de 1970 a 2016, concluem que a desindustrialização brasileira é normal (e esperada) para os subsetores manufatureiros intensivos em mão de obra, mas prematura (e indesejável) para os subsetores intensivos em tecnologia. Os autores alertam para as consequências negativas da desindustrialização prematura no Brasil para o futuro desenvolvimento científico e tecnológico do país, como a perda de capacidade de aprendizado tecnológico e o enfraquecimento dos encadeamentos produtivos.

Nesse mesmo sentido, outros autores têm buscado retratar o processo de desindustrialização brasileiro sob a perspectiva da heterogeneidade subsetorial (Araujo; Peres; Araujo, 2023; Oliveira; Marcato, 2023). A desindustrialização como um fenômeno de mudança estrutural deve ser compreendida à luz das heterogeneidades de desempenho dentro do próprio setor manufatureiro, com diferentes níveis de sofisticação tecnológica. Ao buscar medir quão sofisticada e diversificada é a produção de um determinado local, o índice de complexidade econômica (ICE) dos bens comercializados por um país em perspectiva comparada tornou-se uma métrica amplamente utilizada. O ICE classifica os países com base na diversidade e complexidade de sua cesta de exportação. Países que têm uma ampla gama de conhecimentos produtivos, especialmente conhecimentos especializados e complexos, são capazes de produzir uma grande variedade de produtos sofisticados (Hausmann *et al.*, 2013).

O Gráfico 1 apresenta a ordenação dos países segundo o ICE. Nele observa-se a queda na complexidade dos bens exportados pelo Brasil, um dos principais desafios enfrentados pelo país recentemente.

Gráfico 1 | ICE dos países 1995-2022



Fonte: Havard Growth Lab (c2025).

Como destacado por Felipe *et al.* (2012), a motivação para impulsionar a complexidade industrial está relacionada ao fato de que os principais exportadores de produtos mais complexos são os países de alta renda, enquanto os produtos menos complexos são majoritariamente exportados por países de baixa renda. Assim, parece haver uma correlação entre a complexidade dos produtos e o nível de desenvolvimento econômico dos países.

De acordo com Britto, Freitas e Romero (2015), um país só alcança alta complexidade produtiva quando é capaz de fabricar produtos e oferecer serviços que exigem múltiplas competências técnicas e que estejam interligados a outros bens e setores competitivos. Nesse sentido, as medidas de complexidade econômica permitem avaliar o nível de desenvolvimento industrial de um país.

A perda de complexidade das exportações brasileiras é um indicativo do desafio que o Brasil enfrenta para alcançar a diversificação técnica da sua indústria, sendo necessário internalizar competências e conhecimentos e aumentar a interligação entre os diferentes segmentos produtivos. Esse é o desafio da agenda de inovação no Brasil, que demanda estímulos para ampliar quantitativamente o percentual de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) em relação ao PIB, priorizando qualitativamente os setores e projetos de maior densidade tecnológica.

Cauville (2024) reforça que a inovação é o principal motor dos países de alta renda. Cabe destacar ainda que os investimentos em ciência, tecnologia e inovação são parte relevante e integrante das políticas industriais dessas nações.

A NIB busca a neoindustrialização do Brasil, tendo como um de seus princípios o “desenvolvimento produtivo e tecnológico e inovação” (Brasil, 2023). Trata-se de uma oportunidade relevante para reforçar a estratégia de integrar a inovação com a política industrial. Encarar esse desafio

permitirá ao país reduzir sua dependência em relação à exportação de *commodities* e promover o desenvolvimento econômico de longo prazo.

A NIB e a atuação do BNDES

Breve contexto

Após sete anos inoperante, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial (CNDI) foi reativado em julho de 2023 pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC). Órgão consultivo da Presidência da República, o CNDI anunciou a NIB em 6 de julho de 2023, isto é, uma política formulada a partir do estabelecimento de seis missões que orientam as ações dos agentes econômicos públicos e privados (Brasil, 2023). As missões, seus objetivos específicos e metas refletem os desafios da sociedade brasileira, com o objetivo de retomada da industrialização.

As seis missões estabelecidas no âmbito da NIB são:

- i) cadeias agroindustriais sustentáveis e digitais para a segurança alimentar, nutricional e energética;
- ii) complexo econômico industrial da saúde resiliente, para reduzir as vulnerabilidades do Sistema Único de Saúde (SUS) e ampliar o acesso à saúde;
- iii) infraestrutura, saneamento, moradia e mobilidade sustentáveis para a integração produtiva e o bem-estar nas cidades;
- iv) transformação digital da indústria para ampliar a produtividade;
- v) bioeconomia, descarbonização, transição e segurança energéticas, a fim de garantir recursos para as futuras gerações; e
- vi) tecnologias de interesse para a soberania e a defesa nacionais.

Para sua execução, a NIB prevê ações em três pilares: (i) regulatório, com a formulação de leis e demais normas que promovam o desenvolvimento industrial;² (ii) compras públicas, fazendo com que o poder de compra do Estado estimule a produção industrial;³ e (iii) apoio financeiro, oferecendo linhas de apoio, em diferentes modalidades para fomentar o desenvolvimento industrial, coordenadas no Plano Mais Produção, do qual o BNDES é uma instituição relevante.

O Plano Mais Produção

O Plano Mais Produção foi lançado em 22 de janeiro de 2023, durante a segunda reunião do CNDI, com o objetivo de promover e coordenar o apoio financeiro à NIB. O Plano Mais Produção abrange um período de quatro anos (2023 a 2026) e é composto por quatro qualificadores alinhados ao que se busca impulsionar na indústria brasileira. A Figura 1 apresenta os qualificadores do Plano Mais Produção.

Figura 1 | Qualificadores que orientam o Plano Mais Produção



Fonte: Elaboração própria.

2 Como exemplo, pode-se citar a Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024, que traz um cronograma de escalonamento do uso obrigatório de combustíveis sustentáveis, dando previsibilidade para a produção industrial e inovações em combustíveis, motores e sistemas associados.

3 A exigência de conteúdo local e a possibilidade de uso de margens de preferência nas compras do Plano de Aceleração do Crescimento (Novo PAC) são exemplos de conexão do poder de compra com a produção industrial.

Inicialmente, o plano previa a disponibilidade de R\$ 300 bilhões, com a participação do BNDES, da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e da Associação Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii). Atualmente, além dessas instituições, o Plano Mais Produção congrega o Banco do Brasil (BB), o Banco da Amazônia (Basa), o Banco do Nordeste do Brasil (BNB) e a Caixa Econômica Federal (CEF), totalizando R\$ 611,3 bilhões a serem aplicados até 2026. A Tabela 1 apresenta a participação atualizada de cada instituição na composição dos recursos do Plano Mais Produção.

Tabela 1 | Participação das instituições que compõem o Plano Mais Produção (R\$ bilhão)

Eixo	BNDES	BB	CEF	Finep	Embrapii	BNB	Basa
+ Inovadora e digital	25	–		51,6	1	1	0,1
+ Verde	12	–	–	–	–	20,1	–
+ Exportadora	40	–	–	–	–		0,6
+ Produtiva	223	101	118,5	–	–	3,7	5,5
Total	300	101	118,5	51,6	1	24,8	14,4

Fonte: Elaboração própria com base nos dados disponibilizados pelo CNDI (2025).

O BNDES tem a inovação como um elemento central do planejamento estratégico e alinha suas ações ao processo de neoindustrialização, orientando-se pelas seis missões da NIB. Dessa forma, emprega esforços para impulsionar a indústria brasileira para que seja mais dinâmica, diversificada e tecnologicamente avançada.

A situação recente da indústria

Considerando o biênio 2023-2024, a indústria tem apresentado sinais de retomada da atividade econômica. Certamente, o desempenho positivo é resultado de um conjunto de fatores e, entre os mais recentes,

incluem-se os estímulos da NIB, com o apoio de R\$ 340,2 bilhões em projetos (CNDI, 2025). A análise da contribuição de cada fator para o melhor desempenho da indústria foge aos objetivos deste artigo. Para além das relações de causalidade, é preciso cautela quanto à interpretação dos resultados apresentados, tendo em vista o limitado recorte temporal. Todavia, merecem destaque algumas características que apontam para um possível início de reversão do problema de perda de complexidade industrial.

Em 2024, a produção da indústria de transformação avançou 3,7%, superando o desempenho da indústria geral (3,1%), que inclui também as atividades extrativas, conforme informações do Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial – IEDI (2025). Foi um crescimento suficiente para reverter os recuos dos dois anos anteriores. Ainda segundo o IEDI (2025), trata-se de um desempenho digno de nota, já que não há paralelo na última década. A expansão entre 2017 e 2019 não foi capaz de recompor a perda de 2016 e muito menos a do triénio 2014-2016. Em 2021, a recuperação do setor também não conseguiu compensar o impacto negativo da pandemia de Covid-19 em 2020 (IEDI, 2025).

Considerando a classificação de intensidade tecnológica, o acumulado de 2024 revelou um crescimento de 6,6% para a indústria de alta intensidade tecnológica, com destaque para o setor eletrônico. Por sua vez, a indústria de média-alta intensidade tecnológica registrou uma expansão de 6,9%, impulsionada pelos setores automotivo e de materiais elétricos (IEDI, 2025).

Uma situação semelhante foi identificada nas exportações de bens de alta tecnologia que apresentaram crescimento de 11,5% em 2024 (Castro, 2024). Dentre os produtos que se destacam, encontram-se aeronaves, instrumentos e aparelhos de medição e verificação, equipamentos de comunicação e medicamentos (Exportação..., 2025).

Como já mencionado, a indústria aponta sinais de reversão ao voltar seu crescimento para segmentos de maior densidade tecnológica, porém a pouca extensão temporal impede qualquer avaliação aprofundada. Os resultados recentes, no entanto, demonstram haver espaço para que a indústria brasileira possa retomar um movimento virtuoso.

Para melhor compreender o alinhamento dos estímulos direcionados pelo BNDES a tal movimento, é necessário analisar a carteira de operações de crédito para a inovação no âmbito da NIB, o que será feito aplicando-se metodologia específica.

Metodologia

Ferramental analítico

Intensidade tecnológica

A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) publicou uma taxonomia que classifica os segmentos econômicos de acordo com seu nível de intensidade tecnológica – mensurado pela razão entre os gastos com pesquisa e desenvolvimento (P&D) e o valor agregado de uma indústria. Atualizada em 2016, essa taxonomia se baseia na International Standard Industrial Classification (ISIC), correlacionando as diferentes atividades econômicas com o nível de intensidade tecnológica. As atividades industriais e não industriais são agrupadas em cinco categorias: alta, média-alta, média, média-baixa e baixa intensidade em P&D (Galindo-Rueda; Verger, 2016). No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) traduziu a classificação da ISIC para a Classificação Nacional de Atividades

Econômicas (Cnae),⁴ possibilitando estudos que consideram a realidade do país.

Com base nesse ferramental analítico internacionalmente reconhecido, diversos grupos de pesquisa e organizações realizam avaliações da produção industrial brasileira em relação às categorias de intensidade tecnológica (Morceiro, 2018). Trata-se de material útil aos estudos de economia da inovação e à aplicação das políticas públicas voltadas aos setores (Morceiro, 2019). No âmbito industrial, o IEDI realiza periodicamente análises sobre a evolução da indústria de transformação, segmentando-a nas cinco categorias de intensidade tecnológica (IEDI, 2025).

A despeito da importância das avaliações com base nessa metodologia, ela se esgota na medida em que mesmo segmentos classificados como de baixa intensidade tecnológica podem desenvolver determinados escopos de projetos intensivos em inovação. Por esse motivo, é necessário complementar esse instrumento analítico, como proposto a seguir.

Tecnologias habilitadoras

As tecnologias habilitadoras, também conhecidas como tecnologias de propósito geral (*general-purpose technologies* – GPT), são descobertas decorrentes de atividades científicas e de engenharia avançadas, com potencial para permitir a criação ou a melhoria do desempenho em uma vasta gama de categorias de produtos (Teece, 2016). Tais tecnologias são caracterizadas pelo potencial de uso generalizado em múltiplos setores e pelo dinamismo tecnológico, com numerosas interações e fortes complementaridades com outras tecnologias existentes ou novas (Rosenberg, 1982; Teece, 2016).

4 Disponível em: https://cnae.ibge.gov.br/images/concla/documentacao/CNAE20_Correspondencia_4x4.xls. Acesso em: 29 abr. 2025.

Bresnahan e Trajtenberg (1995) argumentam que uma tecnologia de propósito geral deve ser difundida, capaz de ser melhorada ao longo do tempo e de gerar inovações complementares. Historicamente, a máquina a vapor, a eletricidade, o motor de combustão interna e os computadores são alguns exemplos de importantes tecnologias de propósito geral. Segundo Brynjolfsson, Rock e Syverson (2018), tais exemplos mostram a capacidade das tecnologias habilitadoras de aumentar a produtividade, não apenas diretamente, mas também estimulando inovações complementares.

Não existe um conjunto preestabelecido e consolidado de tecnologias habilitadoras na literatura. Dessa forma, é possível encontrar diferentes conjuntos de tecnologias habilitadoras a depender do propósito do estudo. Para fins deste trabalho, utilizou-se como referência o relatório de 2022 emitido pela National Science and Technology Council (NSTC) dos Estados Unidos da América (EUA), que enumerou as tecnologias críticas e emergentes potencialmente relevantes para a segurança nacional norte-americana (NSTC, 2022). Ainda que outras metodologias sejam conhecidas e usadas, a proposta pela NSTC é a mais recente e a que melhor identifica tecnologias digitais.

A tabela completa das tecnologias habilitadoras e suas descrições encontra-se no Apêndice A deste artigo.

Método

Para avaliar o alinhamento do apoio à inovação realizado pelo BNDES com o desafio de aumentar a densidade tecnológica no Brasil, foram utilizados os seguintes passos:

- i) delimitação temporal e definição do conjunto das operações de apoio;

- ii) avaliação das operações quanto às cinco categorias de intensidade tecnológica, conforme taxonomia da OCDE apresentada na subseção “Intensidade tecnológica” deste artigo;
- iii) avaliação das operações classificadas como de média, média-baixa e baixa intensidade tecnológica quanto à aderência a uma das tecnologias habilitadoras definidas pelo NSTC (2022), conforme discutido na subseção “Tecnologias habilitadoras” deste artigo.

Essa estratégia analítica dialoga com a literatura de desenvolvimento baseado em recursos naturais (Andersen; Marìn; Simensen, 2018; Marìn; Navas-Alemán, 2014; Marìn; Navas-Alemán; Pérez, 2015; Pérez, 2010). Tal vertente teórica ressalta que diversas atividades intensivas em recursos naturais, como é o caso de grande parte das atividades consideradas de baixa intensidade tecnológica de acordo com a taxonomia da OCDE, seriam muito mais intensivas em conhecimento e tecnologia do que o retrato usual. Além disso, essas atividades apresentam fortes efeitos de encadeamento quando considerada a infraestrutura necessária para transporte e logística de mercadorias.

O suposto baixo dinamismo tecnológico nesses setores intensivos em recursos naturais não considera, por exemplo, inovações recentes importantes baseadas em avanços biotecnológicos, como a seleção de marcadores no melhoramento de plantas e uso de bactérias na mineração. Essa visão abrangente sinaliza para uma janela de oportunidade para economias como a brasileira, que dispõem de abundantes recursos naturais. Porém, cabe reforçar que não se trata de alavancar uma estratégia de desenvolvimento produtivo baseada em recursos naturais *stricto sensu*, sendo, portanto, fundamental articular tais atividades produtivas às capacidades inovativas e tecnológicas do país.

Nesse sentido, a estratégia utilizada busca avaliar as oportunidades tecnológicas existentes na estrutura produtiva brasileira. Essa estratégia metodológica possibilita identificar os investimentos com maior densidade tecnológica, definidos como a soma dos investimentos em projetos de alta e média-alta intensidade com os projetos de média, média-baixa e baixa intensidade aderentes a pelo menos uma das tecnologias habilitadoras.

Por fim, é importante reconhecer que se trata de uma combinação de conjuntos distintos, resultantes de avaliações baseadas em diferentes ferramentais teóricos, um relacionado à ótica macro do projeto (pelo seu Cnae) e outro voltado ao escopo da tecnologia do projeto. O objetivo é justamente capturar a aderência dos projetos a temas e segmentos de maior densidade tecnológica, seja pela caracterização subsetorial, tendo em vista a intensidade tecnológica a partir da taxonomia da OCDE, seja pela tecnologia habilitadora associada à operação em si.

Delimitação temporal e do conjunto das operações de apoio

O Programa BNDES Mais Inovação é o principal instrumento de apoio à inovação e utiliza condições financeiras incentivadas pela Taxa Referencial (TR). Além disso, o programa exige o alinhamento dos projetos com a NIB.

No BNDES, em relação aos planos de pesquisa, desenvolvimento e inovação, bem como às plantas pioneiros, os projetos de inovação apoiados pelo Programa BNDES Mais Inovação ocorrem apenas na modalidade direta. Ou seja, o apoio se dá com a celebração de contratos de crédito firmados diretamente entre o Banco e a empresa cliente, sem o uso de instituições financeiras repassadoras.

O financiamento direto tem valores mínimos de R\$ 10 milhões para as regiões Norte e Nordeste e de R\$ 20 milhões para as demais regiões do Brasil. Nesse sentido, o BNDES foi autorizado pela Lei 14.592, de 30 de maio de 2023, a operar linhas de inovação utilizando a TR como custo financeiro, sendo as condições de crédito previamente harmonizadas com a Finep.

Assim, para fins deste trabalho, foram avaliadas as operações diretas de apoio do Programa BNDES Mais Inovação, realizadas nos anos 2023 e 2024, a partir do lançamento da NIB. O Quadro 1 resume a base de operações sobre a qual a avaliação foi conduzida.⁵

Quadro 1 | Principais características da base de operações

Período das operações	Aprovações nos exercícios de 2023 e 2024
Modalidade de apoio	Operações diretas
Operações de crédito	98
Valor do apoio aprovado	R\$ 10,674 bilhões

Fonte: Elaboração própria com base em dados do BNDES. Disponível em: <https://www.bnDES.gov.br/wps/portal/site/home/transparencia/estatisticas-desempenho>. Acesso em: 6 set. 2025.

Avaliação das operações quanto às categorias de intensidade tecnológica

A carteira de operações do BNDES foi avaliada quanto à aderência dos projetos às cinco categorias de intensidade tecnológica, conforme definido na subseção “Intensidade tecnológica” deste artigo. É preciso destacar que a avaliação utilizou o Cnae dos projetos, e não o Cnae das empresas apoiadas. Ou seja, buscou-se identificar os Cnaes considerando os objetivos e atividades a serem efetivamente desenvolvidas

⁵ Os contratos de financiamento podem incluir uma ou mais operações de crédito, conforme características financeiras do objetivo do financiamento.

com o projeto. Essa distinção é relevante, uma vez que muitas empresas realizam atividades de PD&I em campos de conhecimento e segmentos econômicos diferentes de suas atividades principais.

Avaliação das operações quanto à aderência a uma das tecnologias habilitadoras

Uma vez realizada a avaliação quanto à intensidade tecnológica, os projetos classificados como de média, média-baixa e baixa intensidade, de acordo com a taxonomia da OCDE, foram submetidos a uma avaliação qualitativa de seus objetivos, buscando identificar a aderência a pelo menos uma das tecnologias habilitadoras definidas pelo NSTC (2022).

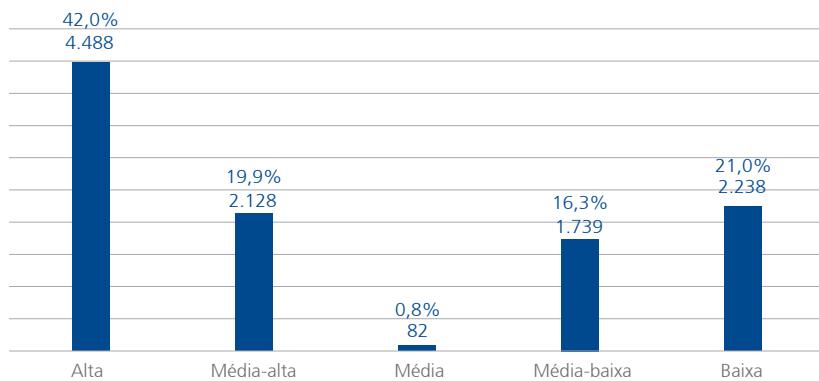
A justificativa para o uso das tecnologias habilitadoras como refinamento metodológico reside na sua capacidade de capturar as especificidades dos projetos, ao considerar de forma mais detalhada as inovações tecnológicas aplicadas em cada caso. Em contraste com a classificação tradicional baseada no Cnae, o conceito de tecnologia habilitadora adota uma abordagem qualitativa, permitindo uma análise individualizada dos projetos.

Um exemplo desse enfoque qualitativo pode ser observado no caso do projeto de inovação da Suzano (BNDES..., 2024), apoiado pelo BNDES. O projeto foi classificado com Cnae relacionado à expansão do plantio de eucalipto, atividade principal do financiamento, o que corresponde à categoria de baixa intensidade tecnológica. Entretanto, um olhar detalhado sobre os objetivos do projeto identificou ações aderentes ao campo das tecnologias habilitadoras de biotecnologia.

Avaliação dos resultados

Considerando a avaliação de intensidade tecnológica, 62% do montante de operações aprovadas do BNDES é classificado como de alta e média-alta intensidade, o que corresponde a cerca de R\$ 6,6 bilhões. O resultado é apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2 | Avaliação de intensidade tecnológica das operações diretas aprovadas no Programa BNDES Mais Inovação 2023-2024 (R\$ milhões)



Fonte: Elaboração própria.

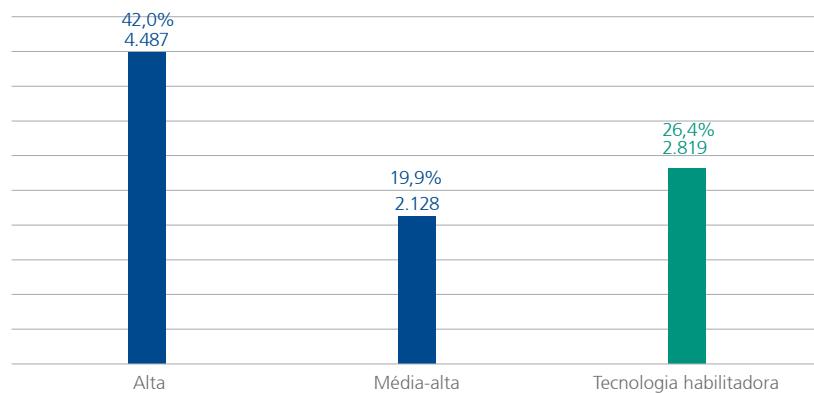
Como apontam Lall (2000) e Hirsch-Kreinsen *et al.* (2005), setores de baixa e média intensidade tecnológica, apesar de frequentemente negligenciados, têm papel relevante no acúmulo de capacidades e no aumento da produtividade, sobretudo em economias em desenvolvimento.

Com base nos resultados obtidos, os projetos de média, média-baixa e baixa intensidade tecnológica, que totalizam R\$ 4,1 bilhões, foram avaliados quanto à aderência a pelo menos uma das tecnologias habilitadoras, conforme método apresentado na subseção “Avaliação das operações quanto à aderência a uma das tecnologias habilitadoras”.

Considerando esse conjunto, verificou-se que um montante equivalente a R\$ 2,8 bilhões é aderente ao conjunto de tecnologias habilitadoras definidas pelo NSTC (2022).

Portanto, combinando os resultados das duas formas de avaliação, conclui-se que 88,3% do valor das operações realizadas pelo Programa BNDES Mais Inovação é de alta densidade tecnológica, o que representa R\$ 9,4 bilhões, sinalizando a convergência desses programas com os objetivos da estratégia de neoindustrialização. O Gráfico 3 explicita o resultado consolidado.

Gráfico 3 | Resultado combinado da avaliação de intensidade tecnológica e tecnologias habilitadoras das operações diretas aprovadas pelo BNDES 2023-2024 (R\$ milhões)



Fonte: Elaboração própria.

Trata-se de um percentual representativo para impulsionar a indústria no desenvolvimento de inovações mais robustas e complexas, ajudando na diversificação do tecido industrial brasileiro e na superação do baixo dinamismo inovativo. Além disso, contribui para aumentar a competitividade do país em setores estratégicos e, em alguns casos, permite disputar posições de liderança na corrida tecnológica global, como nas áreas de aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical (eVTOL, na

sigla em inglês) e combustíveis sustentáveis de aviação (SAF, na sigla em inglês).

Conclusão

O Brasil enfrenta um enorme desafio para reverter o processo de desindustrialização precoce e acelerada. A perda de complexidade do tecido industrial é resultado desse processo, corroendo o nível tecnológico e a competitividade das empresas industriais brasileiras.

Tendo em vista tal contexto, é preciso retomar o desenvolvimento industrial brasileiro. Ciência, tecnologia e inovação são partes integrantes de políticas que incentivam a indústria, estando presentes nos esforços das nações de alta renda. Nesse sentido, a NIB, expressa em seis missões, tem o desenvolvimento produtivo e tecnológico e inovação como um de seus princípios norteadores.

Com isso, o BNDES demonstra estar empenhado em oferecer o melhor apoio aos projetos da nova política industrial. A avaliação da carteira de projetos do Programa BNDES Mais Inovação é relevante para que se tenha uma medida de quanto os esforços de apoio estão alinhados às orientações das políticas públicas.

Dessa forma, este artigo buscou avaliar em que medida os projetos apoiados pelo BNDES estão aderentes ao objetivo de ampliar a complexidade industrial brasileira, apoiando inovações de maior densidade tecnológica. A metodologia utilizada possibilitou refinar a avaliação de intensidade tecnológica, com base no ferramental da OCDE. Ademais, a análise dos projetos de menor intensidade com o ferramental das

tecnologias habilitadoras possibilitou identificar esforços de inovação relevantes e aderentes à vanguarda tecnológica.

O resultado é expressivo. Conforme o recorte da carteira definido na subseção “Delimitação temporal e do conjunto das operações de apoio”, 88,3% dos projetos de inovação apoiados pelo BNDES são de alta densidade tecnológica. Foram destinados R\$ 9,4 bilhões em empresas industriais, com o objetivo de aumentar o conteúdo tecnológico de seus produtos e processos, em linha com tecnologias de alta e média-alta intensidade ou com setores considerados como portadores de tecnologias habilitadoras.

Na avaliação dos resultados, cabe sublinhar o papel relevante do BNDES ao atuar em setores que, pela metodologia da OCDE, teriam menor dinamismo tecnológico. A avaliação da carteira evidenciou um conjunto representativo de projetos classificados como de baixa, média-baixa e média intensidade, os quais são, na realidade, projetos com inovações em tecnologias habilitadoras. Trata-se de um trabalho relevante para aumentar a densidade tecnológica embarcada em setores intensivos em recursos naturais, em que se destaca o agronegócio brasileiro. No entanto, cabe reforçar que não se trata de uma estratégia de desenvolvimento baseada em recursos naturais, mas sim de articular tais atividades produtivas às capacidades inovativas e tecnológicas do país.

O estudo tem suas limitações. Ainda é prematuro (e fugiu ao escopo do trabalho) fazer qualquer correlação entre o apoio e o resultado da indústria. Todavia, os avanços da complexidade industrial entre 2023 e 2024 apontam para uma trajetória positiva. Não há dúvidas de que políticas industriais são estratégias estruturantes e por isso de médio a longo prazo de implementação. Nesse sentido, no horizonte temporal definido pela NIB, a manutenção do apoio é essencial para gerar dados que possam ser avaliados em termos da efetividade do apoio.

Assim, é crucial que as políticas industriais, como as delineadas pela NIB, sejam amplamente discutidas e institucionalizadas como uma política de Estado, a fim de assegurar sua continuidade e adequação às necessidades futuras do país. A promoção de uma industrialização sustentável e tecnologicamente avançada requer um comprometimento contínuo, com uma abordagem que integre inovação, sustentabilidade e inclusão. Além disso, é o caminho para que o Brasil supere os desafios da desindustrialização e avance em direção a um futuro mais próspero, com uma indústria inovadora, verde, competitiva e resiliente.

Por fim, os autores sugerem aplicar a mesma metodologia de avaliação aos projetos apoiados pela Finep.

Referências

ANDERSEN, A. D.; MARÍN, A.; SIMENSEN, E. O. Innovation in natural resource-based industries: a pathway to development? Introduction to a special issue. *Innovation and Development*, London, v. 8, n. 1, p. 1-27, 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/2157930X.2018.1439293?scroll=top&needAccess=true#abstract>. Acesso em: 6 set. 2025.

ARAUJO, E.; PERES, S. C.; ARAUJO, E. L. Desindustrialização e heterogeneidade subsetorial: padrões internacionais e desafios para a economia brasileira. *Revista de Economia Contemporânea*, Rio de Janeiro, v. 27, p. 1-31, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rec/a/3mGbjBy3z7H3bHMkBXzHhxbl?lang=pt>. Acesso em: 6 set. 2025.

BNDES apoia investimentos da Suzano em inovação e manejo florestal sustentável. BNDES, Rio de Janeiro, 7 mar. 2024. Disponível em: <https://www.bnDES.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-apoia-investimento-da-suzano-em-inovacao-e-manejo-florestal-sustentavel#modalCompartilhar>. Acesso em: 22 ago. 2025.

BRASIL. Resolução CNDI/MDIC 1, de 6 de julho de 2023. Propõe a nova política industrial, com a finalidade de nortear as ações do Estado Brasileiro em favor do desenvolvimento industrial. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, n. 137, p. 16, 20 jul. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mdic/pt-br/composicao/se/cndi/arquivos/decretos-e-portarias/arquivos/dou_2023-07-20-resolucao-cndi-mdic-no-1-de-6-de-julho-de-2023-missoes-republicacao/view. Acesso em: 16 mai. 2025.

BRESNAHAN, T. F.; TRAJTENBERG, M. General purpose technologies 'Engines of growth?'. *Journal of Econometrics*, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 83-108, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030440769401598T>. Acesso em: 6 set. 2025.

BRITTO, G.; FREITAS, E.; ROMERO, J. P. Competitividade industrial e inovação na abordagem da complexidade: uma análise do caso brasileiro. In: BARBOSA, N. et al. (eds.). *Indústria e desenvolvimento produtivo no Brasil*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. p. 417-438.

BRYNJOLFSSON, E.; ROCK, D.; SYVERSON, C. Artificial intelligence and the modern productivity paradox: A clash of expectations and statistics. In: AGRAWAL, A.; GANS, J.; GOLDFARB, A. (eds.). *The economics of artificial intelligence: an agenda*. Chicago: University of Chicago Press, 2018. p. 23-57.

CASTRO, R. Exportação de bens de alta tecnologia foi a que mais cresceu em 2024. *O Globo*, Rio de Janeiro, 10 jan. 2025. Blogs – Lauro Jardim. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/blogs/lauro-jardim/post/2025/01/exportacao-de-bens-de-alta-tecnologia-foi-a-que-mais-cresceu-em-2024.ghtml>. Acesso em: 27 mar. 2025.

CAUVILLE, T. F. M. Ciência, tecnologia e inovação como elementos centrais de uma política de (neo)industrialização. In: VELHO, S. R. K. (org.). *Neoindustrialização brasileira*. São Paulo: Blucher, 2024. p. 225-244.

CNDI – CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Plano Mais Produção (P + P). CNDI, Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/composicao/se/cndi/pmaisp>. Acesso em: 8 ago. 2025.

EXPORTAÇÃO de bens de alta tecnologia foi a que mais cresceu em 2024. *Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços*, Brasília, DF, 10 jan. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2025/janeiro/exportacao-de-bens-de-alta-tecnologia-foi-a-que-mais-cresceu-em-2024>. Acesso em: 19 mai. 2025.

FELIPE, J. et al. Product complexity and economic development. *Structural Change and Economic Dynamics*, Oxford, v. 23, n. 1, p. 36-68, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0954349X11000567>. Acesso em: 6 set. 2025.

GALINDO-RUEDA, F.; VERGER, F. *OECD Taxonomy of Economic Activities Based on R&D Intensity*. Paris: OECD, n. 2016/04, 2016. OECD Science, Technology and Industry Working Papers. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/oecd-taxonomy-of-economic-activities-based-on-r-d-intensity_5jlv73sqqp8r-en.html. Acesso em: 27 jun. 2025.

GORDON, J. L.; PIERONI, J. P. O papel do BNDES no contexto da nova política industrial. In: VELHO, S. R. K. (org.). *Neoindustrialização brasileira*. São Paulo: Blucher, 2024. p. 293-324.

HARVARD GROWTH LAB. *Country & Product Complexity Rankings*. Cambridge: Harvard Growth Lab, c2025. Disponível em: <https://atlas.hks.harvard.edu/rankings>. Acesso em: 22 ago. 2025.

HARVARD GROWTH LAB. *The Atlas of Economic Complexity*. Cambridge: Harvard Growth Lab, 2025. Disponível em: <https://atlas.hks.harvard.edu/>. Acesso em: 16 mai. 2025.

HAUSMANN, R. et al. *The atlas of economic complexity: mapping paths to prosperity*. Cambridge: MIT Press, 2013. Disponível em: https://growthlab.hks.harvard.edu/files/growthlab/files/atlas_2013_part1.pdf. Acesso em: 22 ago. 2025.

HIRSCH-KREINSEN, H. et al. Low and medium technology industries in the knowledge economy: the analytical issues. In: HIRSCH-KREINSEN, H.; JACOBSON, D.; LAESTADIUS, S. (eds.). *Low-tech innovation in the knowledge economy*. Frankfurt: Peter Lang, 2005. p. 11-31.

IEDI – INSTITUTO DE ESTUDOS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. A indústria por intensidade tecnológica: especificidades de 2024. *Carta IEDI*, São Paulo, edição 1306, 14 mar. 2025. Disponível em: https://www.iedi.org.br/cartas/carta_iedi_n_1306.html. Acesso em: 26 mar. 2025.

LALL, S. The technological structure and performance of developing country manufactured exports, 1985-98. *Oxford Development Studies*, Abingdon, v. 28, n. 3, p. 337-369, 2000. Disponível em: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:d28fd1c6-8621-4338-a4fb-dc1ab6666635>. Acesso em: 6 set. 2025.

MARÍN, A.; NAVAS-ALEMÁN, L. The possible dynamic role of natural resource-based networks in Latin American development strategies. In: DUTRÉNIT, G.; SUTZ, J. (eds.). *National innovation systems, social inclusion and development*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2014. p. 380-412.

MARÍN, A.; NAVAS-ALEMÁN, L.; PÉREZ, C. Natural resource industries as a platform for the development of knowledge intensive industries. *Tijdschrift voor economische en sociale geografie*, Rotterdam, v. 106, n. 2, p. 154-168, 2015.

MORCEIRO, P. C. *A indústria brasileira no limiar do século XXI: uma análise da sua evolução estrutural, comercial e tecnológica*. 2018. Tese (Doutorado em Economia do Desenvolvimento) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

MORCEIRO, P. C. Nova classificação de intensidade tecnológica da OCDE e a posição do brasil. *Boletim de Informações Fipe*, São Paulo, v. 461, p. 8-13, 2019. Disponível em: <https://downloads.fipe.org.br/publicacoes/bif/bif461-8-13.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2025.

MORCEIRO, P. C.; GUILHOTO, J. J. M. Desindustrialização setorial e estagnação de longo prazo da manufatura brasileira. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA INDUSTRIAL E INOVAÇÃO, 4., 2019, Campinas. *Anais* [...]. Campinas: Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas, 2019. p. 152-167.

MORCEIRO, P. C.; GUILHOTO, J. J. M. Sectoral deindustrialization and long-run stagnation of Brazilian manufacturing. *Brazilian Journal of Political Economy*, São Paulo, v. 43, n. 2, p. 418-441, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rep/a/jyQCmYg8BPPFWbFRjG7tGSq/?format=html&lang=en>. Acesso em: 6 set. 2025.

NSTC – NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL. *National Critical and Emerging Technologies Report*. Washington, DC: NSTC, 2022. Disponível em: <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2022/02/02-2022-Critical-and-Emerging-Technologies-List-Update.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2025.

OLIVEIRA, P.; MARCATO, M. Desindustrialização e cadeias globais de valor: considerações sobre o caso brasileiro. In: ARAUJO, E.; FEIJÓ, C. (orgs.). *Industrialização e desindustrialização no Brasil: teorias, evidências e implicações de política*. Curitiba: Appris, 2023. p. 249-284.

PÉREZ, C. Technological dynamism and social inclusion in Latin America: a resource-based production development strategy. *CEPAL Review*, Santiago, v. 2010, n. 100, p. 121-141, 2010. Disponível em: <https://www.un-ilibrary.org/content/journals/16840348/2010/100/6>. Acesso em: 6 ago. 2025.

ROSENBERG, N. *Inside the black box: technology and economics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.

TEECE, D. J. Enabling technologies. In: Augier, M., Teece, D. (eds.). *The Palgrave Encyclopedia of Strategic Management*. London: Palgrave Macmillan, London, 2016. p. 1-3. Disponível em: https://link.springer.com/rwe/10.1057/978-1-349-94848-2_78-1. Acesso em: 2 abr. 2025.

TREGENNA, F. *Deindustrialisation, structural change and sustainable economic growth*. Vienna: United Nations Industrial Development Organization, 2015. (Inclusive and Sustainable Industrial Development Working Paper Series, n. 2).

Apêndice A – Tecnologias habilitadoras

Quadro A.1 | Tecnologias habilitadoras e seu descriptivo

Tecnologia habilitadora	Descrição
Computação avançada	i) Supercomputação; ii) <i>edge computing</i> ; iii) computação em nuvem; iv) armazenamento de dados; v) arquiteturas computacionais; e vi) técnicas de processamento e análise de dados.
Materiais de engenharia avançados	i) Materiais por design e genômica de materiais; ii) materiais com novas propriedades; iii) materiais com melhorias substanciais nas propriedades existentes; e iv) caracterização de propriedades materiais e avaliação do ciclo de vida.
Tecnologias avançadas de motores de turbina e gás	i) Tecnologias de desenvolvimento e produção aeroespacial, marítima e industrial; e ii) controle digital de motor com autoridade total, fabricação de seções quentes e tecnologias associadas.
Manufatura avançada	i) Fabricação aditiva; ii) fabricação limpa e sustentável; iii) fabricação inteligente; e iv) nanofabricação.
Gerenciamento de sensores e assinaturas avançados e em rede	i) Cargas úteis, sensores e instrumentos; ii) processamento de sensores e fusão de dados; iii) óptica adaptativa; iv) detecção remota da terra; v) gestão de assinaturas; vi) detecção e caracterização de materiais nucleares; vii) detecção e caracterização de armas químicas; viii) detecção e caracterização de armas biológicas; ix) detecção e caracterização de agentes patogênicos emergentes; x) sensoriamento do setor de transportes; xi) detecção do setor de segurança; xii) sensoriamento do setor da saúde; xiii) sensoriamento do setor energético; xiv) detecção do setor da construção; e xv) sensoriamento do setor ambiental.
Tecnologias avançadas de energia nuclear	i) Sistemas de energia nuclear; ii) energia de fusão; e iii) energia nuclear espacial e sistemas de propulsão.

(Continua)

(Continuação)

Tecnologia habilitadora	Descrição
Inteligência artificial	i) Aprendizado de máquina (<i>machine learning</i>); ii) aprendizagem profunda (<i>deep learning</i>); iii) aprendizagem por reforço (<i>reinforcement learning</i>); iv) percepção e reconhecimento sensorial; v) IA de próxima geração (<i>next-generation AI</i>); vi) planejamento, raciocínio e tomada de decisão; e vii) IA segura e/ou protegida.
Sistemas autônomos e robótica	i) Superfícies; ii) ar; iii) marítimo; e iv) espaço.
Biotecnologia	i) Síntese de ácidos nucleicos e proteínas; ii) engenharia do genoma e das proteínas, incluindo ferramentas de <i>design</i> ; iii) multiómica e outras biometrologias, bioinformática, modelagem preditiva e ferramentas analíticas para fenótipos funcionais; iv) engenharia de sistemas multicelulares; v) engenharia de sistemas vírais e de distribuição viral; e vi) tecnologias de biofabricação e bioprocessamento.
Tecnologias de comunicação e rede	i) Circuitos, antenas, filtros e componentes de radiofrequência (RF) e sinais mistos; ii) tecnologias de gestão do espectro; iii) redes sem fio de próxima geração, incluindo 5G e 6G; iv) ligações ópticas e tecnologias de fibra; v) cabos terrestres/submarinos; vii) comunicações por satélite; viii) hardware, firmware e software; viii) comunicações e segurança de redes; e ix) redes <i>mesh</i> /tecnologias de comunicação independentes de infraestrutura.
Energia direcionada	i) Lasers; ii) microondas de alta potência; e iii) feixes de partículas.
Tecnologias financeiras	i) Tecnologias de contabilidade distribuída; ii) ativos digitais; iii) tecnologias de pagamento digital; e iv) infraestrutura de identidade digital.
Interfaces homem-máquina	i) Realidade aumentada; ii) realidade virtual; iii) interfaces cérebro-computador; e iv) equipe homem-máquina.
Hipersônico	i) Propulsão; ii) aerodinâmica e controle; iii) materiais; iv) detecção, rastreamento e caracterização; e v) defesa.
Sensores e detecção em rede	Detalhamento não disponível.

(Continua)

(Continuação)

Tecnologia habilitadora	Descrição
Tecnologias de informação quântica	i) Computação quântica; ii) materiais, isótopos e técnicas de fabricação de dispositivos quânticos; iii) criptografia pós-quântica; iv) sensoriamento quântico; e v) rede quântica.
Geração e armazenamento de energia renovável	i) Geração renovável; ii) combustíveis renováveis e sustentáveis; iii) armazenamento de energia; iv) motores elétricos e híbridos; v) baterias; vi) tecnologias de integração na rede; e vii) tecnologias de eficiência energética.
Semicondutores e microeletrônica	i) Ferramentas de <i>design</i> e automação de projetos eletrônicos; ii) tecnologias de processos e equipamentos de fabricação; iii) tecnologia complementar de semicondutores de óxido metálico (CMOS); iv) integração heterogênea e empacotamento avançado; v) componentes de <i>hardware</i> especializados/adaptados para inteligência artificial, natural e hostil; vi) ambientes de radiação, componentes ópticos e de RF, dispositivos de alta potência e outras aplicações críticas; vii) novos materiais para microeletrônica avançada; e viii) tecnologias de banda larga e ultralarga para gerenciamento, distribuição e transmissão de energia.
Tecnologias e sistemas espaciais	i) Manutenção, montagem e fabricação em órbita; ii) ônibus satélite “comoditizados”; iii) veículos lançadores de baixo custo; iv) sensores para imagens locais e de campo amplo; v) propulsão espacial; vi) posicionamento, navegação e temporização resilientes (PNT); vii) gestão de fluidos criogênicos; e viii) entrada, descida e pouso.

Fonte: Elaboração própria com base em NSTC (2022).

THE NIB HEALTH MISSION AND PUBLIC FUNDING POLICIES

Adriana Inhudes

Larissa Barbosa

Diego Nyko

Vitor Paiva Pimentel

*Hevellyn Camille da Silva**

Keywords: industrial policy; public policy; credit; health economic-industrial complex.

* Respectively, economists, manager, and intern of the Industrial Complex and Health Services Department of the BNDES's Productive Development and Innovation Division. The authors thank Carlos Alexandre Raupp, Luise Velloso, Carla Reis, and the guest editorial board for their suggestions and comments. They also thank Igor Bueno for his comments and for providing FINEP data.

Resumo

A Missão 2 da Nova Indústria Brasil (NIB) estabelece metas desafiadoras para o complexo econômico-industrial da saúde (Ceis), reconhecendo sua relevância para o desenvolvimento econômico e a melhoria do bem-estar social. Esta pesquisa analisa a trajetória e as perspectivas da indústria de dispositivos para saúde e da cadeia farmacéutica diante dos desafios globais e da busca do sistema de saúde brasileiro por sustentabilidade. Nesse contexto, discute-se o papel histórico da estratégia de priorização do complexo da saúde nas políticas industriais, com seus reflexos sobre as oportunidades e os desafios para as políticas públicas de crédito executadas pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) no âmbito da NIB.

Abstract

The New Industry Brazil (NIB) establishes ambitious goals for the health economic-industrial complex (HEIC) on its second mission, recognizing the relevance of health value chain for economic development and social well-being. This paper analyzes Brazilian MedTech and Biopharma evolution and their perspectives in the face of global challenges and in the mission for achieving sustainability in the Brazilian health system. In this context, we examine the historical prioritization strategy of the health industry complex in industrial policies, reflecting on the opportunities and challenges for the financing policies of Brazilian Development Bank (BNDES) and Financier of Studies and Projects (FINEP) within NIB.

Introdução

A Nova Indústria Brasil (NIB), composta sob a ótica de missões, retoma o papel protagonista do Estado brasileiro na indução de investimentos e na estruturação de setores estratégicos da economia. Ao dedicar ao complexo industrial da saúde uma missão específica, a NIB estabelece metas desafiadoras para esse setor, reconhecendo sua relevância enquanto segmento crítico para o avanço econômico e a melhoria do bem-estar social.

Tendo em vista o histórico de priorização do complexo da saúde¹ nas políticas de desenvolvimento produtivo brasileiras ao longo do século XXI, o artigo analisa a trajetória das indústrias da saúde no Brasil e as perspectivas diante dos desafios colocados pela dinâmica global desse segmento e pela busca por sustentabilidade econômica e tecnológica do Sistema Único de Saúde (SUS). O recorte deste estudo são as políticas de crédito, notadamente aquelas relacionadas à atuação do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), atores mais relevantes no financiamento público à indústria e à inovação. Após atualizar o diagnóstico de cada um dos segmentos do complexo econômico-industrial da saúde (Ceis), o artigo busca posicionar novos instrumentos de financiamento desenvolvidos por BNDES e Finep, tais como os programas BNDES Mais Inovação e BNDES Fornecedores SUS, além de um fundo de investimento em participações com recorte setorial (FIP Saúde), em parceria com a própria Finep e a Fundação Butantan.

Este artigo integra uma série de publicações elaboradas pela equipe do Departamento do Complexo Industrial e de Serviços da Saúde

¹ O texto trata dos segmentos industriais cujo foco principal é a saúde humana ou aqueles abarcados pelos seguintes códigos da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (Cnae): C 21.10; C 21.21; C 21.23-8; C 26.60-4; C 32.50-7.

do BNDES, que discutiram: (i) as características das políticas industriais para saúde no mundo pós-pandemia de Covid-19 (Nyko; Pimentel; Braga, 2024); e (ii) a dinâmica econômica e tecnológica das indústrias de saúde (Pimentel *et al.*, 2024).

Além desta introdução, o artigo está estruturado em cinco seções. Na primeira, é definido o conceito de Ceis e apresentado o potencial da dinâmica entre serviços e indústrias da saúde no desenvolvimento econômico, tecnológico e social do país. Na segunda, detalha-se a Missão 2 da NIB e sua articulação com as demais políticas públicas lideradas pelo Ministério da Saúde (MS). Na terceira, analisa-se o uso do instrumento de crédito na política pública industrial e de inovação, sobretudo via BNDES e Finep, a partir da caracterização dos segmentos industriais do Ceis e suas particularidades no Brasil. Na quarta, são analisados os desafios para o fomento ao ecossistema de *startups* de base tecnológica em saúde, com foco em iniciativas no âmbito da NIB. A última seção traz as conclusões do estudo.

O complexo econômico-industrial da saúde no Brasil

O Ceis é composto pelo subsistema de prestação de serviços de saúde, tanto públicos quanto privados, e pelo subsistema industrial, também chamado de complexo industrial da saúde (CIS), o qual pode ser dividido em dois segmentos: a indústria de dispositivos para saúde e a cadeia farmacêutica. Em 2021, o Ceis respondia por 9,6% do produto interno bruto (PIB) e 7,4% do emprego total no país, enquanto a sua base industrial representava 2% do PIB (IBGE, 2024). Sua relevância está intrinsecamente ligada ao SUS, reconhecido como o maior sistema universal de saúde pública do mundo.

O sistema de saúde brasileiro vem enfrentando pressões financeiras crescentes, alavancadas por duas macrotendências: o envelhecimento populacional, que aumenta a demanda por cuidados de saúde; e a mudança epidemiológica, com a prevalência de doenças crônicas como diabetes, hipertensão e obesidade, que exigem tratamentos contínuos e caros. Em um cenário conservador, as projeções indicam que a saúde deverá representar 11% do PIB até 2030, chegando a 12,8% do PIB em 2060, o que ampliará a pressão sobre o orçamento público ou agravará a desigualdade, com a maior presença de serviços de acesso restrito (Rocha; Furtado; Spinola, 2019).

Os gastos com saúde podem crescer ainda mais devido à incorporação de inovações tecnológicas, que, embora contribuam para melhorar a qualidade dos serviços, elevam os custos ao sobrepor novas terapias, diagnósticos avançados e tecnologias de ponta às alternativas existentes (Reis; Barbosa; Pimentel, 2016). Por fim, as mudanças climáticas trazem impactos adicionais sobre o sistema, representando uma ameaça às conquistas históricas do SUS, especialmente no que diz respeito à prevenção de doenças infecciosas (Barcellos *et al.*, 2009; Sousa *et al.*, 2018).

Essas tendências representam desafios substanciais para o financiamento à saúde em todo o mundo, e, no Brasil, demandam políticas eficazes que equilibrem a ampliação do acesso à assistência e a sustentabilidade do SUS. Ademais, ao se reconhecer a centralidade da área da saúde para o desenvolvimento e o caráter múltiplo de seu impacto, os efeitos das políticas públicas podem ser potencializados, a fim de atingir simultaneamente objetivos de política industrial, tecnológica e sanitária (Gadelha, 2003). É nesse contexto que as políticas industriais para saúde se inserem, buscando resiliência em etapas críticas da cadeia de valor da saúde, como na produção de insumos e equipamentos estratégicos e na inovação alinhada ao perfil epidemiológico brasileiro, buscando conferir maior autonomia para o SUS (Nyko; Pimentel; Braga, 2024).

Arcabouço das políticas públicas brasileiras atuais para o Ceis

A Missão 2 da NIB é voltada para o setor da saúde, conforme mostra o Quadro 1. Entre os instrumentos para alcançar a missão, estão previstas a prioridade de financiamento com recursos reembolsáveis e não reembolsáveis operacionalizados pelo BNDES e pela Finep, medidas para melhoria do ambiente de negócios – via regulação sanitária, propriedade intelectual, isonomia tributária e infraestrutura de qualidade –, além de contratações públicas, com destaque para os investimentos previstos no Novo PAC Saúde,² que podem chegar a R\$ 30 bilhões até 2026.

No contexto da NIB, é reconhecido que as ações para alcançar a Missão 2 devem ser orientadas pelo Ministério da Saúde (MS) no âmbito do SUS. A estratégia nacional para o desenvolvimento do Ceis, complementar à NIB, foi instituída por meio do Decreto 11.715, de 26 de setembro de 2023, tendo como finalidade orientar investimentos públicos e privados nos segmentos produtivos e de inovação da saúde, buscando soluções produtivas e tecnológicas para enfrentar os desafios do setor, reduzir a vulnerabilidade do SUS e ampliar o acesso à saúde.

Já a matriz dos desafios produtivos e tecnológicos em saúde, instituída pela Portaria GM/MS 2.261, de 8 de dezembro de 2023, define as demandas prioritárias do SUS e tem o papel de orientar as políticas públicas voltadas para o desenvolvimento do Ceis, sendo dividida em dois blocos: preparação do sistema de saúde para emergências sanitárias (Bloco I) e doenças e agravos

2 O Programa de Aceleração do Crescimento (Novo PAC) é o programa de investimentos em infraestrutura lançado pelo Governo Federal em 2023. Na frente de saúde, estão previstos mais de R\$ 30 bilhões em investimentos, compreendendo a construção de unidades básicas de saúde (UBS), policlínicas, maternidades, entre outros, além de investimentos em telessaúde e no CIS, incluindo estruturação de laboratórios públicos e fortalecimento de pesquisa e desenvolvimento (P&D).

críticos para o SUS (Bloco II), conforme resumido no Quadro 2. Para cada desafio em saúde, são indicadas as soluções produtivas e tecnológicas para o SUS, que podem consistir em plataformas ou produtos.

Quadro 1 | Detalhamento da Missão 2 da NIB

Missão 2: Ceis resiliente para reduzir a vulnerabilidade do SUS e ampliar o acesso à saúde.					
Meta aspiracional: Produzir, no país, 70% das necessidades nacionais em medicamentos, vacinas, equipamentos e dispositivos médicos, materiais e outros insumos e tecnologias em saúde.					
Desafios <ul style="list-style-type: none"> • Minimizar a importação de insumos básicos. • Alinhar as políticas industriais e de comércio exterior. • Aumentar a efetividade da indução ao investimento privado. • Reduzir o custo do crédito, especialmente para equipamentos e insumos. • Aumentar a produção nacional de equipamentos médicos. • Integrar e articular o uso do poder de compra nos diversos entes federativos. • Promover inovações disruptivas na área da saúde. 					
Cadeias produtivas prioritárias <table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">Medicamentos e princípios ativos biológicos</td><td style="text-align: center;">Vacinas, hemoderivados e terapias avançadas</td><td style="text-align: center;">Dispositivos médicos (equipamentos médicos)</td></tr> </table>			Medicamentos e princípios ativos biológicos	Vacinas, hemoderivados e terapias avançadas	Dispositivos médicos (equipamentos médicos)
Medicamentos e princípios ativos biológicos	Vacinas, hemoderivados e terapias avançadas	Dispositivos médicos (equipamentos médicos)			
Objetivos específicos <ol style="list-style-type: none"> I. Desenvolver tecnologias e adensar a produção nacional de bens e serviços em saúde com vistas a reduzir a dependência externa, ampliar o acesso à saúde no SUS e preparar o complexo econômico-industrial da saúde (Ceis) para o enfrentamento de emergências futuras em saúde pública. II. Liderar a pesquisa, o desenvolvimento, a inovação e a produção de tecnologias e serviços voltados à prevenção, ao diagnóstico e ao tratamento de doenças endêmicas e negligenciadas no país e na região. III. Desenvolver tecnologias da informação e da comunicação, com domínio nacional de dados, de forma a ampliar a capacidade de resposta do SUS e expandir e qualificar a oferta de produtos e a prestação de serviços de saúde. IV. Fortalecer a capacidade nacional em pesquisa clínica e pré-clínica em tecnologias críticas ligadas à prevenção e ao tratamento de doenças e agravos com maior impacto para a sustentabilidade do SUS. V. Liderar elos das cadeias produtivas da saúde intensivos no uso sustentável e inovador da biodiversidade. 					

Fonte: Adaptado de Brasil (2025).

Quadro 2 | Resumo da matriz dos desafios produtivos e tecnológicos em saúde

Bloco I: preparação do sistema de saúde para emergências sanitárias	Bloco II: doenças e agravos críticos para o SUS
<ul style="list-style-type: none"> Preparação para resposta a emergências e proteção para doenças imunopreveníveis. Soros imunoprotetores. Hemoderivados, bioprodutos e hemoterapia. Insumos críticos (IFA, * medicina nuclear, antimicrobianos e insumos para dispositivos médicos). Química verde e biodiversidade. Tecnologias para sistemas de saúde. 	<ul style="list-style-type: none"> Doenças e populações negligenciadas. Cânceres com maior incidência. Doenças cardiovasculares. Diabetes. Doenças associadas ao envelhecimento. Doenças raras. Outras doenças crônicas não transmissíveis.

Fonte: Elaboração própria com base em Brasil (2023).

* Insumo farmacêutico ativo (IFA) é a substância química que confere a atividade farmacológica a um medicamento.

Características dos segmentos industriais da saúde e instrumentos de crédito para o setor

O financiamento público, especialmente o crédito direcionado, desempenha papel estratégico no apoio às empresas brasileiras, induzindo investimentos em produção e inovação.³ Nesta seção, serão analisadas as atuações de BNDES e Finep no financiamento aos subsegmentos industriais da saúde – dispositivos para saúde e farmacêutico – dadas suas características e estágio de desenvolvimento.

³ Utilizando modelos econôméticos, Machado et al. (2017) estimaram que empresas financiadas pelo BNDES investem, em média, pelo menos 30% a mais em atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) quando comparadas a empresas de mesmo perfil não financiadas.

A indústria de dispositivos para saúde

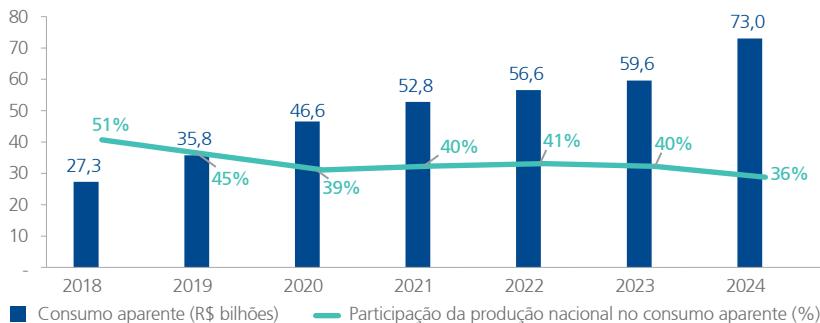
A indústria de dispositivos para saúde caracteriza-se pela heterogeneidade tecnológica e diversidade de segmentos. Seus produtos abrangem desde bens de capital de alta complexidade, como equipamentos de diagnóstico por imagem e cirurgia robótica, até produtos consumíveis, como equipamentos de proteção individual (EPI), seringas e agulhas. Ademais, tal indústria destaca-se como impulsionadora do desenvolvimento tecnológico e da inovação, devido à necessidade de integração de diferentes áreas, como ciências biomédicas, informática e engenharia, nas atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) (Moreli *et al.*, 2010; Pieroni; Reis; Souza, 2010).

O segmento pode ser caracterizado como um oligopólio, no qual poucos grandes grupos econômicos multinacionais oferecem ao mercado soluções integradas, associando ao produto industrial serviços como assistência técnica, treinamento, manutenção, *software* e até serviços financeiros. Outrossim, muitos fabricantes trabalham com modelos de negócio que integram equipamentos de alto valor unitário a bens de consumo recorrente, como reagentes de diagnóstico ou consumíveis plásticos, gerando uma dependência prolongada entre fornecedores e consumidores e servindo como barreira à entrada de concorrentes (Maldonado; Cruz, 2022).

O mercado de dispositivos para saúde é, historicamente, dominado por países da União Europeia, que detêm superávits comerciais estruturais na fabricação desse tipo de produto. Com a reorganização do comércio global ensejada pela pandemia de Covid-19, os dispositivos para saúde têm sido objeto de grande interesse das políticas industriais ativas de países como China, Estados Unidos da América e Índia, além da própria União Europeia (Nyko; Pimentel; Braga, 2024).

No Brasil, a vulnerabilidade externa é crítica, tendo em vista a dependência de componentes eletrônicos importados e a baixa competitividade do setor, composto, de modo geral, por empresas de pequeno e médio porte com atuação em nichos de mercado (Landim *et al.*, 2013). Conforme dados da Associação Brasileira da Indústria de Dispositivos Médicos (Abimo), em 2024, 88,7% das empresas do setor contavam com menos de cinquenta funcionários, enquanto apenas oito tinham mais de mil empregados (Abimo, 2025).

Gráfico 1 | Consumo aparente de dispositivos médicos e participação da indústria nacional 2018-2024 (R\$ bilhões)



Fonte: Adaptado de Abimo (2025).

O valor da produção brasileira de dispositivos médicos em 2024 foi de R\$ 26,1 bilhões, ou 36% do consumo aparente⁴ do segmento, como mostra o Gráfico 1. Como resultado, o setor apresenta déficit externo elevado, superior a US\$ 8,5 bilhões em 2024 (Abimo, 2025).

Apesar do porte, o dispêndio de pesquisa e desenvolvimento (P&D) das empresas de dispositivos de saúde no Brasil foi de 1,1% da receita líquida de vendas, superior à média da indústria de transformação, de 0,6% em 2017, último ano disponível para comparação conforme dados

⁴ Consumo aparente é a soma da produção interna com as importações, subtraindo as exportações. Leva esse nome por desconsiderar eventuais variações do estoque de bens produzidos, porém não consumidos no mesmo período.

da Pesquisa de Inovação (Pintec).⁵ De todo modo, esse índice ainda é muito reduzido quando comparado aos dispêndios em P&D das grandes companhias globais do segmento (Landim *et al.*, 2013).

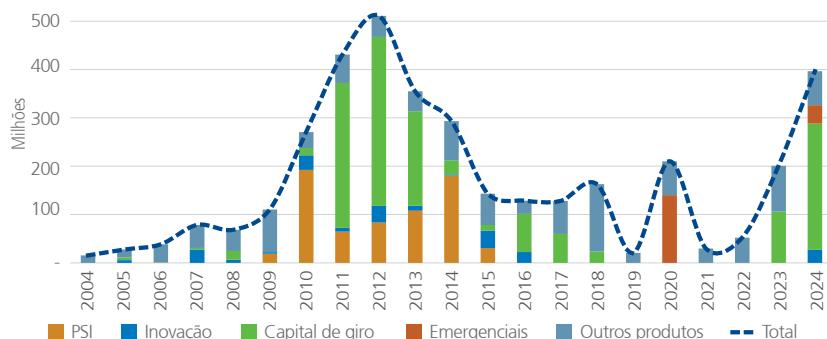
Necessidade de capital de giro e criação do Programa BNDES Fornecedores SUS

No segmento de dispositivos para saúde, há grande prevalência de modelos de negócio em que os produtos são fornecidos em regime de comodato ou embutidos em uma prestação de serviços. Sob essa ótica, os equipamentos acabam compondo, financeiramente, o estoque do fabricante ou do distribuidor, embora alocados fisicamente no contratante do serviço. Isso gera um ciclo financeiro alongado, o que eleva significativamente o consumo de capital de giro e muitas vezes compromete operações industriais de empresas menos capitalizadas. Ademais, o menor porte e as restrições financeiras podem resultar em obstáculos para obtenção de crédito no sistema bancário.

O Gráfico 2 organiza as linhas e programas do BNDES em tipos de apoio, de acordo com seus objetivos declarados, e mostra que as linhas de crédito para capital de giro do BNDES foram as que mais atenderam às necessidades específicas do segmento de dispositivos para saúde. Entre 2010 e 2014, a linha BNDES Giro, reforçada no contexto pós-crise de 2008 e em conjunto com o Programa de Sustentação do Investimento (PSI), foi o principal instrumento de apoio a essas empresas. Importante mencionar que a demanda pelo PSI foi mais intensa nos produtos destinados à aquisição de bens de capital e exportação, reforçando o perfil de busca por liquidez para atividades operacionais. Os anos de maior financiamento do BNDES para o setor de dispositivos para saúde foram 2011 e 2012, somando quase R\$ 1 bilhão em aprovações no biênio.

5 Dados da Pintec estão disponíveis em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/ciencia-tecnologia-e-inovacao/9141-pesquisa-de-inovacao.html>. Acesso em: 13 jun. 2025

Gráfico 2 | Aprovações do BNDES para o setor de dispositivos para saúde 2004-2024 (total e instrumentos de crédito selecionados, por tipo: PSI, inovação, capital de giro e linhas emergenciais)



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BNDES.

Tabela 1 | Aprovações do BNDES para o setor de dispositivos para saúde (dados consolidados)

	2004-2009	2010-2014	2015-2022	2023-2024
PSI	19,0	629,0	30,7	0,0
Inovação	42,6	84,7	58,3	26,8
Capital de giro	0,0	889,9	174,1	367,3
Emergenciais	0,0	0,0	140,0	38,4
Total	338,4	1861,0	875,4	597,4

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BNDES.

Nota: No Gráfico 2 e na Tabela 1 os valores estão em R\$ milhões atualizados a preços de março de 2025. Além disso, as seguintes definições foram aplicadas: (i) PSI: Programa de Sustentação do Investimento; (ii) Inovação: compreende o BNDES Profarmá⁶ e o Programa BNDES Mais Inovação; (iii) Capital de giro: compreende as linhas/programas BNDES Giro,⁷ BNDES Exim Pré-embarque⁸ e BNDES Fornecedores SUS; (iv) Programas emergenciais: compreende os programas BNDES de Apoio Emergencial ao Combate da Pandemia do Coronavírus e BNDES Emergencial para o Rio Grande do Sul.⁹

6 Originalmente denominado Programa BNDES de Apoio ao Desenvolvimento da Cadeia Produtiva Farmacêutica, o BNDES Profarmá foi criado com o objetivo de incentivar a produção nacional de medicamentos e insumos, melhorar padrões de qualidade, reduzir o déficit comercial do setor e fortalecer empresas nacionais. Em 2008, o programa incorporou a indústria de dispositivos para saúde e seu nome foi alterado para Programa BNDES de Apoio ao Desenvolvimento do Complexo Industrial da Saúde mantendo, contudo, a sigla original.

7 Linha específica para apoio a capital de giro isolado. A linha vigorou em vários períodos, com formatos distintos.

8 Financia a produção para exportação, comprovada pela efetiva venda ao exterior.

9 O programa BNDES de Apoio Emergencial ao Combate da Pandemia do Coronavírus apoiou a expansão de leitos para atendimento das vítimas de Covid-19 e a produção de materiais, insumos e equipamentos no contexto da pandemia. O programa BNDES Emergencial para o Rio Grande do Sul apoiou empresas de diferentes portes e setores diretamente impactados pelas enchentes de 2024. Ambos já foram encerrados.

Em 2020, linhas de crédito emergenciais com condições acessíveis voltaram a atrair empresas do setor. No mesmo ano, foram aprovados R\$ 140 milhões para fabricantes de dispositivos para saúde no Programa BNDES de Apoio Emergencial ao Combate da Pandemia do Coronavírus. Em 2024, R\$ 38,4 milhões foram disponibilizados para o segmento no Programa BNDES Emergencial para o Rio Grande do Sul. É importante destacar que esses programas tinham como objetivo dar fôlego financeiro de forma transversal, em contextos emergenciais, não tendo sido desenhados especificamente para o segmento.

A análise histórica sugere que, embora as empresas do subsetor no Brasil invistam em inovação um valor superior à média do setor industrial como um todo, desafios operacionais destacam-se como um dos entraves para o seu pleno desenvolvimento tecnológico. Isso se reflete no valor tímido das contratações efetivadas pelas empresas do setor nas linhas de inovação.

Convergente à NIB, em maio de 2024 foi criado o Programa BNDES Fornecedores SUS. A criação da linha teve como objetivos: (i) apoiar o fortalecimento do SUS por meio da concessão de crédito associado a metas de fornecimento de dispositivos de saúde para unidades que prestam serviços ao SUS; e (ii) contribuir para a melhoria da estrutura financeira dos fabricantes de dispositivos para saúde em operações comerciais com o sistema público.

Além da grande simplificação operacional, decorrente da substituição da apresentação de um projeto de investimento por uma meta de fornecimento ao SUS, o programa conta com outras três características adequadas ao perfil das empresas do segmento, conforme normativos internos do BNDES: (i) redução do valor mínimo das operações diretas, de R\$ 20 milhões para R\$ 10 milhões; (ii) possibilidade de flexibilização

de garantias reais; e (iii) possibilidade de taxa de juros pré-fixada, conferindo maior previsibilidade ao fluxo financeiro para as empresas.

O Programa BNDES Fornecedores SUS tem dotação de R\$ 500 milhões, com prazo de vigência até 30 de junho de 2028. Em seu primeiro ano em vigor, encerrado em março de 2025, foram aprovados R\$ 117 milhões.

A cadeia farmacêutica

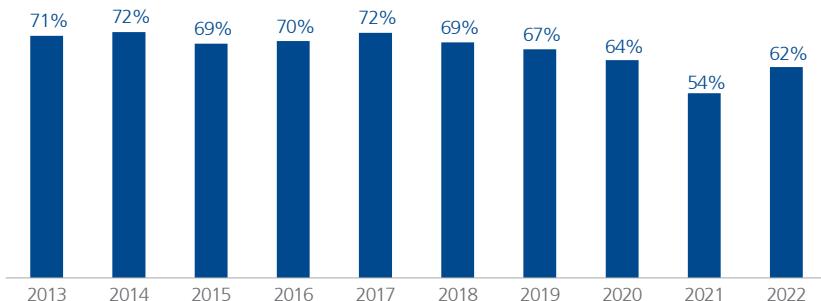
A indústria farmacêutica global apresenta estrutura concentrada, com barreiras significativas à entrada de concorrentes. A inovação é o principal fator de competitividade e, portanto, as empresas direcionam vultuosos recursos para P&D. As grandes companhias do setor investiram mais de US\$ 160 bilhões em P&D em 2023, buscando inovações na fronteira tecnológica, como medicamentos biológicos e terapias avançadas. Para tanto, recorrem fortemente a aquisições ou fusões com empresas de biotecnologia de porte pequeno a médio, que estão na fronteira do desenvolvimento farmacêutico (IQVIA, 2024; Pimentel *et al.*, 2024).

As empresas de capital brasileiro encontram seu principal motor de crescimento no mercado interno, composto por mais de 200 milhões de pessoas e por um sistema de saúde público de cobertura universal. O avanço econômico e a mobilidade social experimentados pelo Brasil no início dos anos 2000, somados às transições demográfica e epidemiológica, impulsionaram o crescimento da demanda nas últimas décadas (Palmeira Filho *et al.*, 2012).

A demanda por medicamentos no Brasil apresentou taxas de crescimento consistentes: entre 2015 e 2023, cresceu em média 7% em

termos reais ao ano,¹⁰ atingindo R\$ 142 bilhões em receitas e 5,7 bilhões de embalagens comercializadas em 2023 (Cerqueira; Lopes, 2024). A produção industrial farmacêutica nacional apresentou crescimento real de 37% nos últimos dez anos (IBGE, 2024), com participação de, em média, 67% do consumo aparente no período analisado, como se observa no Gráfico 3.

Gráfico 3 | Participação da produção farmacêutica brasileira no consumo aparente 2013-2022



Fonte: Elaboração própria com base nos dados da Pesquisa Industrial Mensal divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e nos dados de exportação e importação divulgados pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) por meio do Comex Stat. Disponíveis em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3653> e <https://comexstat.mdic.gov.br/bpt/geral>. Acessos, respectivamente, em: 13 jun. 2025 e 28 fev. 2025.

Nota: O cálculo da participação nacional foi feito a partir do valor bruto da produção industrial, segundo dados do IBGE, dividido pelo consumo aparente. Este último foi calculado a partir do valor bruto da produção industrial, somado aos valores da importação e subtraídos os da exportação, com base em dados disponíveis no Comex Stat.

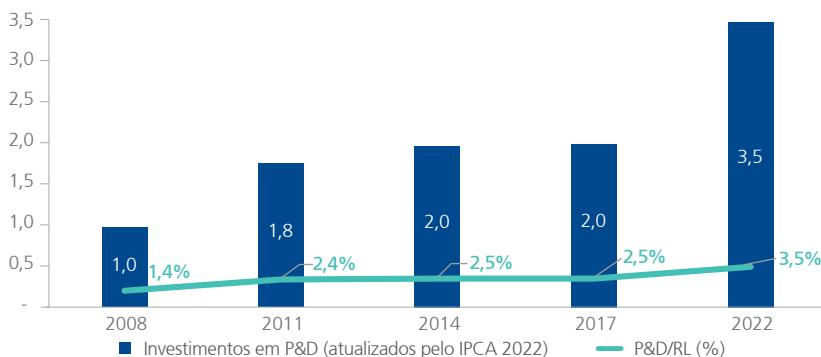
Do total de empresas atuantes no setor no Brasil, 68% eram nacionais, representando 50% das vendas no mercado doméstico (incluindo as vendas no varejo e as institucionais, estas destinadas ao SUS e às unidades assistenciais privadas) e 81% das unidades vendidas em 2023 (Sindusfarma, 2025). Apesar dos avanços, a produção nacional concentra-se em produtos genéricos e similares, enquanto medicamentos patenteados são amplamente dominados pelas empresas multinacionais.

10 Dados elaborados com base nos relatórios da Câmara de Regulação do Mercado de Medicamentos (CMED) (Cerqueira; Lopes, 2024). Para calcular a taxa de crescimento anual composta do setor farmacêutico brasileiro, foi utilizado o faturamento real registrado de 2015 a 2023, deflacionados pelo índice nacional de preços ao consumidor amplo (IPCA) para produtos farmacêuticos.

Como resultado da forte demanda interna e da dependência de produtos importados de alto custo, o setor farmacêutico brasileiro apresenta um déficit estrutural na balança comercial, que oscilou entre US\$ 5 e 7 bilhões entre 2010 e 2020. Em 2021 e 2024, esse déficit superou os US\$ 10 bilhões devido a uma combinação de fatores, como interrupções na cadeia de produção e aumento das importações de vacinas durante a pandemia de Covid-19, além do aumento dos custos de insumos e transporte (Pimentel *et al.*, 2024).

Em relação às atividades de P&D no Brasil, estima-se que o setor investiu R\$ 3,5 bilhões em 2022, o que representa 3,5% de sua receita líquida de vendas no mesmo ano. O Gráfico 4 mostra que as atividades de P&D na indústria farmacêutica vêm crescendo de forma significativa, com destaque para o crescimento dos investimentos em P&D sobre a receita líquida (RL) que passou de 1,4% em 2008 para 3,5% em 2022. Esses percentuais são substancialmente acima da média da indústria de transformação brasileira, que variou entre 0,61% e 0,5% no mesmo período.

Gráfico 4 | Gasto em P&D das indústrias farmacêutica e farmoquímica (R\$ bilhões)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados da Pintec Semestral e da Pesquisa Industrial Anual disponíveis em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/ciencia-tecnologia-e-inovacao/35867-pesquisa-de-inovacao-semestral.html>; https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/fe5a0fcfed6a9b2071f4b8ee23663213.pdf; e <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pia-empresa/quadros/brasil/2023>. Acesso em: 13 jun. 2025.

Nota: Os valores de despendidos em atividades internas de P&D do setor de fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos foram extraídos da Pintec Semestral e divididos pela receita líquida de venda das empresas industriais do mesmo setor – contida na Pesquisa Industrial Anual – com cinco ou mais pessoas ocupadas.

Apesar do destaque sobre os demais segmentos da indústria de transformação nacional, o percentual de gastos em P&D é baixo se comparado aos investimentos das 15 maiores farmacêuticas mundiais, equivalentes a 23,4% de suas receitas em 2023. Ademais, as atividades de P&D da indústria farmacêutica brasileira se concentram no desenvolvimento de medicamentos genéricos e similares, além de inovações incrementais, enquanto as empresas líderes mundiais investem, sobretudo, em inovações radicais e novas plataformas tecnológicas (IQVIA, 2024; Pimentel *et al.*, 2024).

A indústria farmoquímica

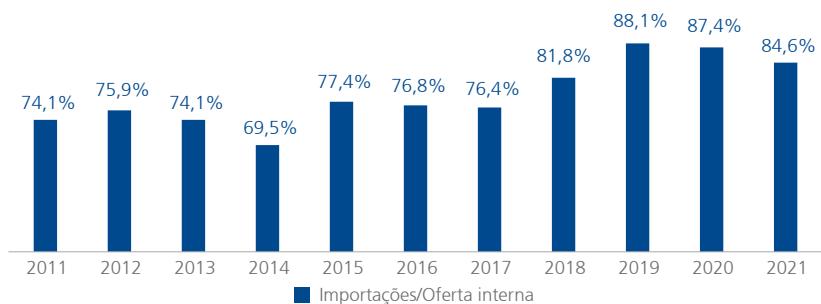
A indústria farmoquímica produz insumos farmacêuticos ativos (IFA) e não ativos (adjuvantes), compondo a cadeia farmacêutica. Os fabricantes podem atuar somente na produção de farmoquímicos, de forma independente, ou como unidade farmoquímica associada a uma empresa farmacêutica verticalizada. Observa-se no cenário internacional um movimento de verticalização de IFAs estratégicos realizado por empresas farmacêuticas, sobretudo após a pandemia de Covid-19, quando a resiliência produtiva e a segurança no fornecimento de insumos críticos ganharam conotação estratégica (Pimentel *et al.*, 2024).

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Química Fina – Abifina (III Censo..., 2024), 37 empresas declararam atuar no setor farmoquímico no Brasil em 2024. Esse número considera produtos de rota sintética, biológica e de extração vegetal e animal, das quais mais de 90% são nacionais. Na rota sintética, são produzidos mais de 2 mil princípios ativos e associações, e 40% das empresas atuam no mercado internacional. Já entre as empresas de rota biológica, 50% são laboratórios públicos.

Gráfico 5a | Produtos farmoquímicos: oferta total e produção interna 2011-2021

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2024).

Nota: Valores em R\$ bilhões a preços de 2021.

Gráfico 5b | Produtos farmoquímicos: participação percentual das importações na oferta total 2011-2021

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2024).

Em 2021, a oferta total de produtos farmoquímicos no Brasil foi de R\$ 24,6 bilhões, mais do que o dobro do valor observado em 2011. No mesmo período, as importações cresceram quase 170%, refletindo a demanda da indústria farmacêutica nacional por esses produtos. Em contrapartida, a produção interna de farmoquímicos pouco avançou, alcançando R\$ 2,7 bilhões em 2021. Com isso, a participação das importações na oferta interna atingiu 84,6% do total, patamar dez pontos percentuais superior ao de 2011 (IBGE, 2024).

A concorrência com o preço dos farmoquímicos importados, sobretudo da China e da Índia, é um dos principais desafios para o desenvolvimento do segmento no Brasil. Por outro lado, a manutenção de uma capacidade produtiva interna, ainda que limitada, ao longo das últimas décadas pode servir de base para novos investimentos, especialmente em um contexto de acirramento das disputas geopolíticas e comerciais.

Apoio à cadeia farmacêutica e o Programa BNDES Mais Inovação

A cadeia farmacêutica tem sido priorizada desde a primeira onda de políticas industriais brasileiras do século XXI. A Política Industrial Tecnológica e de Comércio Exterior (PITCE), lançada em 2004, mencionava explicitamente a indústria de fármacos e medicamentos como estratégica, além de citar a biotecnologia como uma das bases tecnológicas “portadoras de futuro” (Palmeira Filho *et al.*, 2012).

O apoio do BNDES ao segmento tem seu marco na criação do BNDES Profarma, que aprovou R\$ 4,4 bilhões para as indústrias farmacêuticas entre 2004 e 2017. Nos primeiros anos, enfatizou-se a construção e a adequação de plantas farmacêuticas às regras sanitárias exaradas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa). A partir de 2013, o foco foi o financiamento à instalação de estruturas industriais e P&D para produtos de biotecnologia (Meirelles *et al.*, 2020). É importante salientar que a inovação esteve presente ao longo de todas as versões do programa, com escopo elegível e condições financeiras ajustados ao estágio de desenvolvimento do setor, propondo o conceito de acumulação de competências tecnológicas (Palmeira Filho *et al.*, 2012).

O Gráfico 6 mostra o histórico do apoio do BNDES ao setor a partir dos principais instrumentos de crédito utilizados. O BNDES Profarma foi o principal instrumento de apoio para as empresas entre 2004 e 2009. A partir de 2010, o PSI também se destacou no financiamento às farmacêuticas, em paralelo ao BNDES Profarma – embora essa distinção se relacione mais à fonte de recursos prevista¹¹ do que ao tipo de projeto financiado. É possível afirmar que, no que tange à indústria farmacêutica, o PSI deu continuidade à estratégia delineada pelo BNDES Profarma, melhorando as condições financeiras disponibilizadas ao setor.

Com o encerramento do BNDES Profarma a partir de 2017, o Banco continuou apoiando os investimentos da indústria farmacêutica com suas linhas transversais. Entre 2015 e 2022, o total aprovado foi de R\$ 1,9 bilhão na linha BNDES Finem para as farmacêuticas. Além disso, o Fundo Tecnológico (Funtec) do BNDES foi utilizado, pontualmente, no suporte não reembolsável ao desenvolvimento de novos produtos de interesse público. Foram aprovados mais de R\$ 650 milhões somente para a indústria farmacêutica entre 2004 e 2023. Nesse caso, a ênfase foi principalmente em projetos estratégicos para a saúde pública, em alinhamento com o MS, como desenvolvimento e produção de vacinas para uso no SUS.

Nota-se que o histórico do apoio do BNDES ao setor permeia a evolução da indústria farmacêutica nacional em seus diversos estágios, desde a estruturação de unidades produtivas no bojo da regulação sanitária, passando pelo fomento à produção de genéricos

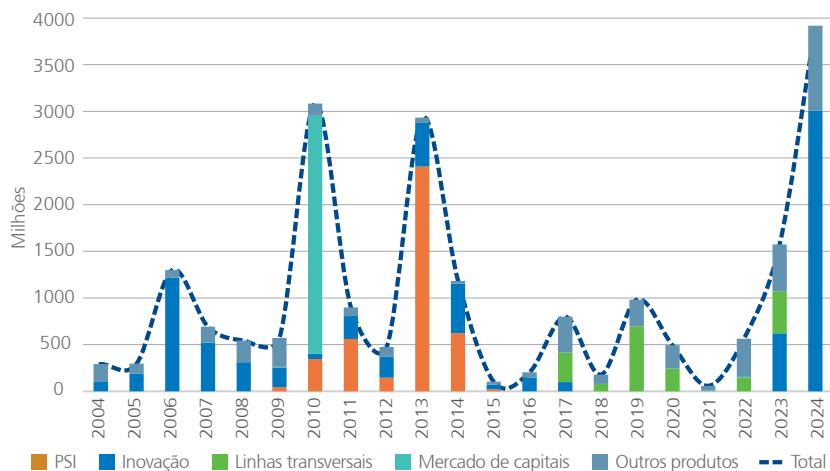
11 Enquanto o BNDES Profarma valia-se de recursos ordinários do BNDES, captados pelo Fundo de Amparo ao Trabalhador (FAT) e referenciados à taxa de juros de longo prazo (TJLP), no PSI a Lei 12.096, de 24 de novembro de 2009, autorizou a União a conceder subvenção econômica ao BNDES, na modalidade equalização de taxas de juros.

e ao desenvolvimento de inovações incrementais, até a instalação de plantas de biotecnologia (Meirelles *et al.*, 2020; Palmeira Filho *et al.*, 2012).

Em 2023, já durante a vigência da NIB, foi estruturado o programa BNDES Mais Inovação. No setor da saúde, o objetivo é apoiar projetos de inovação produtiva de interesse público com base na matriz de desafios tecnológicos do SUS. Entre 2023 e 2024, o BNDES aprovou R\$ 3,6 bilhões para investimentos no segmento farmacêutico no BNDES Mais Inovação. Nessa nova fase do apoio ao segmento, o Banco reconhece a maturidade das empresas, as quais dominam competências tecnológicas necessárias para o desenvolvimento de medicamentos genéricos, inovações incrementais e, ainda que pontuais e em menor escala, inovações radicais.

Adicionalmente, incluiu-se no âmbito do BNDES Mais Inovação a possibilidade de financiamento à implantação de unidades industriais pioneiras. Conforme analisado anteriormente, tendo em vista os desafios de adensamento da cadeia produtiva, são consideradas unidades industriais ou plantas pioneiras aquelas associadas à plataforma biotecnológica, como vacinas e anticorpos monoclonais, além de unidades farmoquímicas. Até junho de 2025, foram aprovados três projetos nessa modalidade, que totalizam R\$ 888 milhões.

**Gráfico 6 | Aprovações do BNDES para o setor farmacêutico 2004 – 2024
(total e instrumentos de crédito selecionados, por tipo: PSI, inovação,
mercado de capitais e linhas transversais)**



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2 | Aprovações do BNDES para o setor farmacêutico (dados consolidados)

	2004-2009	2010-2014	2015-2022	2023-2024
PSI	45,2	4086,3	20,3	0,0
Inovação	2555,0	1526,2	296,4	3629,1
Linhas transversais	0,0	0,0	1480,2	450,7
Mercado de capitais	7,4	2549,3	14,0	0,0
Total	3695,7	8574,5	3381,3	5490,9

Fonte: Elaboração própria.

Nota: No Gráfico 6 e na Tabela 2 os valores estão em R\$ milhões atualizados a preços de março de 2025. Além disso, as seguintes definições foram aplicadas: (i) PSI: Programa de Sustentação do Investimento; (ii) Inovação: compreende o BNDES Profarmá e o Programa BNDES Mais Inovação; (iii) Linhas transversais: linhas no âmbito do produto BNDES Finem;¹² (iv) Mercado de capitais: linha BNDES Mercado de Capitais.¹³

12 BNDES Finem é o produto tradicional do BNDES para apoio a projetos de investimento em diversos setores.

13 A linha, operada pela BNDES Participações S.A. (BNDESPAR), visa apoiar o desenvolvimento do mercado de capitais brasileiro por meio de instrumentos de renda variável.

Dinâmica inovativa das empresas farmacêuticas e apoio do BNDES à P&D

Desde a vigência do BNDES Profarma, o Banco apoia o fortalecimento das atividades inovativas das empresas. Um dos elementos centrais é o equilíbrio entre: (i) financiar inovações relevantes para a população brasileira; (ii) manter elegíveis alvos compatíveis com o estágio competitivo e tecnológico das empresas; e (iii) avançar no acúmulo de competências tecnológicas para inovação.

Na indústria farmacêutica, uma única empresa detém um portfólio composto por dezenas ou até centenas de medicamentos em desenvolvimento, com diferentes níveis de desafio tecnológico, impacto mercadológico e grau de inovação. Outro aspecto relevante são os prazos necessários para o desenvolvimento e registro de um produto, que usualmente ultrapassam os prazos máximos de utilização dos recursos previstos em contrato. Finalmente, os projetos de inovação podem ser iniciados em diferentes estágios do desenvolvimento, e/ou ser cancelados antes do previsto, tendo em vista os riscos tecnológicos e de mercado associados.

Nesse contexto, não são financiados projetos específicos, adotando-se uma abordagem abrangente de financiamento dos planos estratégicos de investimento em inovação das empresas. Dessa forma, há flexibilidade para que projetos sejam interrompidos e novos projetos sejam incluídos, desde que as condições contratuais de elegibilidade sejam respeitadas.

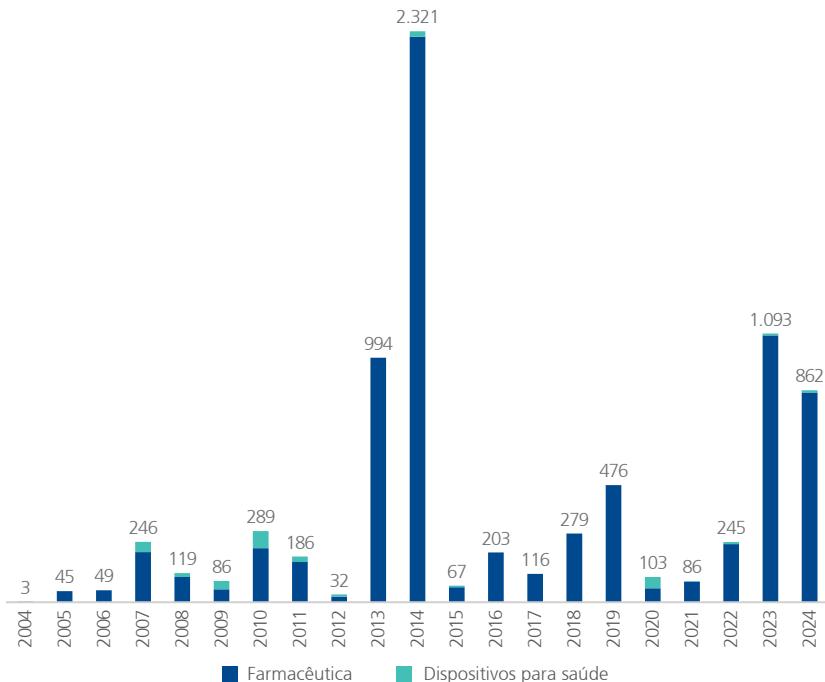
No âmbito do BNDES Mais Inovação, retomou-se a lógica de financiamento aos planos de investimento em P&D. As condições de elegibilidade dos subprojetos são: (i) alinhamento aos objetivos específicos da Missão Saúde da NIB; ou (ii) alinhamento à matriz de desafios produtivos e tecnológicos do SUS. Além dos planos de investimento em inovação, são também financiáveis a construção ou expansão de centros de P&D.

A Finep e o financiamento coordenado à inovação

O apoio da Finep abrange todas as etapas do processo de desenvolvimento científico, desde a pesquisa básica de um produto até o desenvolvimento de novos mercados, atuando em consonância com as políticas públicas. Entre 2004 e 2024, a Finep contratou R\$ 7,9 bilhões para projetos nos setores industriais da saúde. Desse total, R\$ 7,6 bilhões foram demandados pelo setor farmacêutico, conforme mostra o Gráfico 7. Nota-se que o Programa Inova Saúde, lançado em 2013, impulsionou significativamente as contratações, que chegaram a R\$ 2,3 bilhões em 2014.

O apoio coordenado entre BNDES e Finep à indústria farmacêutica, via crédito público para inovação, contribuiu para a modernização do parque industrial e a criação de competências tecnológicas. Particularmente no caso do fomento ao desenvolvimento e à produção de medicamentos biológicos, houve avanço significativo na construção de uma base produtiva nacional. Tendo em vista os altos investimentos necessários, a atuação conjunta das instituições permitiu o compartilhamento de riscos, viabilizando, do ponto de vista financeiro, a montagem das operações de grande porte. Para além do financiamento, a estratégia brasileira para biotecnologia envolveu um amplo esforço de alinhamento de políticas públicas, com destaque para as compras do SUS por meio das parcerias para o desenvolvimento produtivo (PDP) e a regulação sanitária (Bueno, 2021).

**Gráfico 7 | Finep - contratações de projetos no setor industrial da saúde 2004-2024
(R\$ milhões)**



Fonte: Elaboração própria com base em dados da Finep.

Nota: Valores em R\$ milhões a preços de 2024. Inclui operações diretas de crédito realizadas pela Finep para empresas dos segmentos abrangidos pelos seguintes códigos da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (Cnae): C 21 (exceto 21.22), C 26.60-4 e C 32.50-7.

Com o lançamento da NIB, a atuação da Finep foi fortalecida: o orçamento do Fundo Nacional para o Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia (FNDCT), principal fonte de financiamento da Finep, foi ampliado em aproximadamente 50% por meio de crédito suplementar aprovado pela Lei 14.577, de 10 de maio de 2023. Além disso, o referencial da taxa de juros para operações de crédito da Finep foi alterado, reduzindo significativamente o custo dessas operações.¹⁴

14 A Lei 14.554, de 20 de abril de 2023, alterou a taxa de juros de remuneração do FNDCT, introduzindo a Taxa Referencial (TR) que substituiu a Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP).

Essas duas medidas se somaram à Lei Complementar 177, de 21 de janeiro de 2021, que vedou a possibilidade de contingenciamento dos recursos do FNDCT. Assim, conforme dados do Portal da Transparéncia,¹⁵ em 2021 o FNDCT teve dotação orçamentária de R\$ 7,3 bilhões e execução de apenas R\$ 1,9 bilhão (26%); em 2024, o orçamento de R\$ 12,7 bilhões foi integralmente utilizado. Para 2025, o orçamento previsto para o FNDCT é de R\$ 14,7 bilhões.

Com recursos disponíveis e forte priorização da área da saúde no âmbito da NIB, a Finep lançou editais de recursos não reembolsáveis que totalizaram R\$ 500 milhões para o setor, partilhado entre empresas e institutos de ciência e tecnologia (ICT). Na vertente dedicada ao fomento a empresas, a demanda alcançou mais de R\$ 2,4 bilhões, denotando o apetite por recursos não reembolsáveis para P&D em saúde. Foram aprovados 21 projetos nessa modalidade até agosto de 2025, sendo seis na Linha Temática I, que apoia projetos de desenvolvimento de IFA inovadores ou aprimorados; quatro na Linha Temática II, voltada ao desenvolvimento de produtos biológicos com alto impacto para o SUS; cinco na Linha Temática III, focada na realização de pesquisas clínicas; e seis na Linha Temática IV, que tem por objetivo apoiar produtos prioritários definidos pelas parcerias para o desenvolvimento produtivo (PDP) e pelo Programa de Desenvolvimento e Inovação Local (PDIL).

Na modalidade ICT, houve suplementação de recursos para atendimento de todas as propostas aprovadas, atingindo mais de R\$ 650 milhões em contratações até agosto de 2025. Foram aprovados 51 projetos, sendo 15 na Linha Temática I, direcionada a projetos de IFA; 16 na Linha Temática II, dedicada às pesquisas em produtos de terapias avançadas; e 20 na Linha Temática III, que engloba

¹⁵ Disponível em: <https://portaldatransparencia.gov.br/orgaos/24901>. Acesso em: 1º ago. 2025.

projetos de P&D de produtos e terapias com alto impacto para o SUS (Finep..., 2024).¹⁶

Com isso, as contratações diretas da Finep para o setor da saúde alcançaram R\$ 2 bilhões no biênio 2023-2024, com foco no segmento farmacêutico, como mostra o Gráfico 7. Assim, em linha com as prioridades da NIB, a Finep consolida-se como um dos grandes financiadores da inovação no setor de saúde.

Fomento ao ecossistema de startups de saúde

Como visto, as atividades das indústrias de saúde são baseadas em ciência e apresentam padrão concorrencial sustentado por inovações, muitas situadas na fronteira do desenvolvimento científico. Destacam-se os avanços contidos nas novas plataformas tecnológicas, em especial no campo da biotecnologia, bem como o desenvolvimento e o uso de ferramentas digitais e analíticas que podem, entre outras coisas, acelerar o processo de descoberta de novas moléculas (Pimentel *et al.*, 2024). À medida que o ecossistema de inovação em saúde brasileiro ganha maturidade em direção a inovações radicais, os instrumentos de crédito vão se tornando menos efetivos.

Nesse cenário, é crescente o número de empresas de menor porte especializadas em realizar etapas mais arriscadas ou radicais da inovação, especialmente no setor farmacêutico, focando sua atuação nas etapas iniciais da pesquisa clínica. Para algumas tecnologias avançadas, 90%

¹⁶ Disponível em: <http://www.finep.gov.br/chamadas-publicas/chamadapublica/727>; <http://www.finep.gov.br/chamadas-publicas/chamadapublica/730>. Acesso em: 26 ago. 2025.

da pesquisa clínica já é patrocinada por *startups* ou por instituições acadêmicas. Em 2022 havia quase três mil empresas e organizações envolvidas no desenvolvimento de novos medicamentos em todo o mundo, sendo que as chamadas *biotechs*, ou empresas de biotecnologia para saúde, representavam dois terços do total – em 2002 eram apenas um terço (IQVIA, 2023).

Nesse arranjo, parte considerável da pesquisa atualmente liderada pelas grandes empresas farmacêuticas teve origem em empresas de menor porte e *startups* de saúde, das quais muitas recebem apoio governamental não reembolsável (*grants*) em seus países de origem. As grandes empresas costumam entrar nas fases mais avançadas do desenvolvimento clínico. As *startups* de saúde baseadas em ciência têm características distintas das *startups* de outros setores da economia: não contam com fontes relevantes de receitas recorrentes; têm baixa capacidade de buscar crédito e ciclos relativamente longos de PD&I de um novo produto ou tratamento; e demandam elevados investimentos em atividades que envolvem riscos substanciais de diferentes naturezas.

Instrumentos de dívida, mesmo com taxas de juros incentivadas, são inadequados para esse tipo de empresa, tendo em vista a ausência de fluxo de receitas recorrente para pagamento de juros durante o prazo de carência do crédito, além da ausência de ativos que possam ser utilizados como garantia. Por se tratar de empresas em estágio pré-comercial, o acesso das *biotechs* à bolsa de valores é limitado, sendo financiadas principalmente por recursos públicos (não reembolsáveis) destinados à pesquisa e por meio de estruturas de capital de risco (*venture capital*). Em 2024, as estruturas de *venture capital* aportaram US\$ 24 bilhões no setor, valor próximo ao financiamento público por meio de *grants* (US\$ 25 bilhões) (IQVIA, 2025).

Nesse contexto, o BNDES, em parceria com a Finep e a Fundação Butantan, lançou o FIP Saúde, um fundo de capital de risco cujo objetivo é fomentar *startups* baseadas em ciência, com perfil inovador, complementando assim as ações da NIB. A iniciativa reúne atores relevantes no ecossistema de ciência, tecnologia, inovação e produção em saúde, com objetivos alinhados à política industrial e forte aderência ao SUS. Com capital mínimo de R\$ 200 milhões, o fundo contará com aporte mínimo de R\$ 50 milhões de cada um dos três parceiros. A depender da atração de novos parceiros, o BNDES poderá aportar até R\$ 125 milhões no fundo, limitado a 25% do capital total. Assim, a iniciativa poderá chegar a R\$ 500 milhões.

O FIP Saúde se insere na estratégia mais ampla da NIB, complementando o portfólio de soluções financeiras voltadas a adensar o ecossistema de inovação em saúde brasileiro. A iniciativa reforça a parceria histórica entre BNDES e Finep, trazendo ainda a Fundação Butantan, entidade que aportará não apenas recursos financeiros, mas também conhecimento científico, além de fortalecer ainda mais a conexão com os desafios de saúde do SUS e da população brasileira. Espera-se que o fundo possa atuar de forma complementar aos instrumentos de crédito para inovação e aos de apoio não reembolsável, financiando inovações com maior risco tecnológico e movimentando o ecossistema em direção a inovações radicais.

Conclusões

Nas duas últimas décadas, as políticas públicas brasileiras destacaram o caráter estratégico das indústrias da saúde, em especial a farmacêutica, que foi apoiada por programas governamentais voltados ao fortalecimento da inovação e da estrutura produtiva de forma sistêmica.

As políticas de crédito contribuíram para avanços na trajetória produtiva e tecnológica da indústria farmacêutica brasileira, iniciando com genéricos, passando por inovações incrementais e chegando à entrada do Brasil na biotecnologia moderna. Apesar dessa evolução, diversos desafios ainda permanecem: do ponto de vista produtivo, o país importa parcela significativa dos insumos farmacêuticos; do ponto de vista da inovação, as empresas ainda têm nos genéricos e nas inovações incrementais seu foco, com investimentos tímidos em inovações radicais de âmbito global.

Já o segmento de dispositivos de saúde não avançou na mesma velocidade. Desafios específicos caracterizam o setor, como a ausência de padronização dos produtos intercambiáveis, a necessidade de soluções integradas e modelos de negócio intensivos em capital de giro, ampliando a complexidade do desenvolvimento da política pública. Adicione-se a multiplicidade de compradores de dispositivos, predominantemente formados por grandes atores institucionais, como redes hospitalares e operadores de planos de saúde, diante de um setor formado por empresas de pequeno a médio porte. Para serem efetivas, as políticas de financiamento precisam considerar as especificidades dos diferentes segmentos do Ceis, como se buscou com a criação do BNDES Fornecedores SUS e do FIP Saúde.

Após um período sem políticas industriais explícitas, a NIB resgatou o papel ativo do Estado como indutor do desenvolvimento produtivo e tecnológico do país. Na Missão 2, voltada para a saúde, a abordagem enfatizou a conexão da política industrial com as necessidades da população brasileira e do SUS. A NIB encontrou o setor farmacêutico maduro, resultado da combinação de políticas públicas e decisões empresariais tomadas durante os ciclos anteriores de política industrial. Assim, o setor tem sido o principal destaque em termos do valor aprovado no âmbito do Programa BNDES Mais Inovação.

Um dos desafios não endereçados nessa cadeia pelas políticas industriais anteriores foi o adensamento produtivo. Viabilizar a produção brasileira de IFAs, sejam eles químicos ou biológicos, segue sendo um desafio relevante. Enquadrar a produção desse segmento como planta pioneira no âmbito do BNDES Mais Inovação foi um avanço significativo da NIB. Entretanto, o financiamento, isoladamente, não será capaz de promover o adensamento da cadeia produtiva, sendo necessária a articulação com outras políticas públicas – a exemplo do que foi feito para a biotecnologia moderna.

Já no caso das empresas de dispositivos para saúde, o cenário encontrado foi bem diferente: a maioria delas encontra dificuldades de acesso a crédito em condições adequadas para sua atividade operacional. O BNDES Fornecedores SUS buscou tratar parte dessa limitação, com condições desenhadas especificamente para o setor.

Por fim, o amadurecimento do ecossistema de inovação em saúde no país exige buscar inovações radicais. Nesse contexto, os instrumentos de crédito são pouco efetivos. Duas iniciativas relevantes no âmbito da NIB apontam nessa direção. Primeiramente, a estabilização do FNDCT, com o consequente avanço na disponibilidade de recursos não reembolsáveis pela Finep, poderá contribuir para a geração de inovações. Em segundo lugar, o FIP Saúde poderá viabilizar *startups* que tiverem sucesso nas etapas iniciais do desenvolvimento tecnológico.

No âmbito da NIB, as prioridades do SUS configuraram a base para a destinação dos investimentos em um contexto de limitação de recursos. Apesar de a conexão com a demanda interna ser fundamental para a legitimidade da política industrial e de inovação, o avanço na trajetória tecnológica em direção à inovação radical requer adicionar uma camada de ambição internacional, uma vez que o custo para desenvolver essas inovações só se justifica considerando o mercado global.

Este artigo limitou-se à análise das políticas de financiamento da NIB, enfatizando o papel do BNDES e da Finep em decorrência da importância da inovação enquanto fator de competitividade das indústrias de saúde. É importante salientar que a política industrial brasileira traz um rol muito mais amplo de instrumentos de alta relevância para o Ceis, como compras governamentais, políticas de conteúdo local e regulação. Para pesquisas futuras, é fundamental ampliar o escopo de instrumentos analisados.

Referências

ABIMO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE DISPOSITIVOS MÉDICOS. *Relatório Setorial: dados consolidados de 2024 e perspectivas 2025*. São Paulo: Abimo, 2025. Disponível em: <https://abimo.org.br/dados-do-setor/relatorio-setorial/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

BARCELLOS, C. et al. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, Brasília, DF, v. 18, n. 3, p. 285-304, 2009. Disponível em: http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1679-49742009000300011&lng=pt&nrm=is. Acesso em: 31 jul. 2025.

BRASIL. Portaria GM/MS 2.261, de 8 de dezembro de 2023. Estabelece a Matriz de Desafios Produtivos e Tecnológicos em Saúde. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 8 dez. 2023. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2023/prt2261_08_12_2023.html. Acesso em: 13 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Plano de Ação para a Neoindustrialização 2024-2026*. Brasília, DF: MDIC, 2025.

BUENO, I. F. *Financiamento à inovação na indústria farmacêutica brasileira: uma análise do papel do BNDES e da Finep no período de 2007 até 2018-2021*. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/27168>. Acesso em: 31 jul. 2025.

CERQUEIRA, D. M.; LOPES, R. F. (coord.). *Anuário Estatístico do Mercado Farmacêutico 2023*. Brasília, DF: Anvisa, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/centraisdeconteudo/publicacoes/medicamentos/cmed/anuario-estatistico-do-mercado-farmaceutico-2023.pdf>. Acesso em: 9 mai. 2025.

FINEP amplia participação na NIB para R\$ 511,6 bi, com R\$ 3,5 bi para saúde [...]. *Finep*, Rio de Janeiro, 15 ago. 2024. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/noticias/todas-noticias/6832-finep-amplia-participacao-na-nib-para-r-51-6-com-r-3-5-bi-para-saude-no-setor-em-18-meses-empresa-ja-ultrapassou-em-25-o-aplicado-de-2019-22>. Acesso em: 7 mai. 2025.

GADELHA, C. A. G. O complexo industrial da saúde e a necessidade de um enfoque dinâmico na economia da saúde. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, p. 521-535, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-81232003000200015>. Acesso em: 31 jul. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Conta-satélite de saúde*: Brasil: 2010-2021. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2102075>. Acesso em: 26 mar. 2025.

IQVIA – INSTITUTE FOR HUMAN DATA SCIENCE. *Global trends in R&D 2023: activity, productivity, and enablers*. Parsippany: IQVIA, 2023. Disponível em: <https://www.farmindustria.it/app/uploads/2023/02/iqvia-institute-global-trends-in-rd-2023-forweb.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2025.

IQVIA – INSTITUTE FOR HUMAN DATA SCIENCE. *Global trends in R&D 2024: Activity, productivity, and enablers*. Parsippany: IQVIA, 2024. Disponível em: <https://www.iqvia.com/insights/the-iqvia-institute/reports-and-publications/reports/global-trends-in-r-and-d-2024-activity-productivity-and-enablers>. Acesso em: 8 mai. 2025.

IQVIA – INSTITUTE FOR HUMAN DATA SCIENCE. *Global trends in R&D 2025: Progress in recapturing momentum in biopharma innovation*. Parsippany: IQVIA, 2025. Disponível em: <https://www.iqvia.com/insights/the-iqvia-institute/reports-and-publications/reports/global-trends-in-r-and-d-2025>. Acesso em: 13 jun. 2025.

LANDIM, A. et al. Equipamentos e tecnologias para saúde: oportunidades para uma inserção competitiva da indústria brasileira. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 37, p. 173-226, 2013. Disponível em: <http://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1494>. Acesso em: 26 mar. 2025

MACHADO, L.; MARTINI, R.; GAMA, M. M. *Does BNDES innovation credit boost firms' R&D expenditures?: evidence from Brazilian panel data.* Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017. (Working paper). Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/13595>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MALDONADO, J.; CRUZ, A. Oportunidades e desafios para a indústria de dispositivos médicos. In: GADELHA, Carlos A. G. (coord.). *Saúde é desenvolvimento: o complexo econômico-industrial da saúde como opção estratégica nacional.* Rio de Janeiro: Centro de Estudos Estratégicos da Fiocruz, 2022. p. 134-154. Disponível em: <https://cee.fiocruz.br/?q=node/1660>. Acessado em: 9 mai. 2025.

MEIRELLES, B. et al. Balanço da estratégia de desenvolvimento da biotecnologia farmacêutica no Brasil: 2009-2019. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 51, p. 7-75, 2020. Disponível em: <http://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/19802>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MORELI, E. C. et al. (coord.). *Cenários internacional e nacional do setor de equipamentos médicos, hospitalares e odontológicos.* Ribeirão Preto: [s.n.], 2010.

NYKO, D.; PIMENTEL, V. P.; BRAGA, C. A. Políticas industriais para o complexo industrial da saúde no mundo pós-Covid-19. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, v. 30, n. 59, p. 93-148, jun. 2024. Disponível em: <http://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/24865>. Acesso em: 31 jul. 2025.

PALMEIRA FILHO, P. et al. O desafio do financiamento à inovação farmacêutica no Brasil: a experiência do BNDES Profarma. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, n. 37, p. 67-90, 2012. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2595>. Acesso em: 31 jul. 2025.

PIERONI, J. P.; REIS, C.; SOUZA, J. O. B. A indústria de equipamentos e materiais médicos, hospitalares e odontológicos: uma proposta de atuação do BNDES. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 31, 2010. Disponível em: <http://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1761>. Acesso em: 31 jul. 2025.

PIMENTEL, V. et al. O complexo econômico-industrial da saúde no mundo: estrutura e tendências das indústrias farmacêutica e de dispositivos para saúde. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 30, n. 58, 2024. Disponível em: <https://web.bnnes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/26147>. Acesso em: 31 jul. 2025.

REIS, C.; BARBOSA, L. M. L. H.; PIMENTEL, V. P. O desafio do envelhecimento populacional na perspectiva sistêmica da saúde. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 44, 2016. Disponível em: <https://web.bnnes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9955>. Acesso em: 31 jul. 2025.

ROCHA, R.; FURTADO, I.; SPINOLA, P. *Garantindo o futuro da saúde no Brasil: necessidades de financiamento e projeção de gastos*. Rio de Janeiro: IEPS, 2021. Disponível em: <https://ieps.org.br/estudo-institucional-01/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

SINDUSFARMA – SINDICATO DA INDÚSTRIA DE PRODUTOS FARMACÊUTICOS NO ESTADO DE SÃO PAULO. *Relatório Anual de Atividades 2024*. São Paulo: Sindusfarma, 2025. Disponível em: <https://sindusfarma.org.br/publicacoes/obras-institucionais>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SOUZA, T. C. M. et al. Doenças sensíveis ao clima no Brasil e no mundo: revisão sistemática. *Revista Panamericana de Salud Pública*, Washington, n. 42, p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.26633/RPSP.2018.85>. Acesso em: 31 jul. 2025.

III CENSO do Setor de Insumos Farmacêuticos. *ABIFINA*, Rio de Janeiro, 6 dez. 2024. Disponível em: <https://abifina.org.br/acontece-na-abifina/iii-censo-do-setor-de-insumos-farmacêuticos-ativos/>. Acesso em: 14 mar. 2025.

DECARBONIZING BUSES: OPPORTUNITIES BEYOND BATTERY-ELECTRIC VEHICLES

Pedro Henrique de Moraes Marques

Filipe de Oliveira Souza

James Patrick Maher Junior

*Luís Inácio Senos Dantas**

Keywords: decarbonization; energy transition; public transportation; hybrid bus; biofuels.

* Respectively, head of the Urban Mobility and Logistics Department of the Infrastructure Division, architect of the Urban Mobility Solutions Department of the City Solutions Division, architect and engineer of the Urban Mobility and Logistics Department of the Infrastructure Division.

Resumo

O transporte público coletivo desempenha papel fundamental na mobilidade urbana, mas constitui uma relevante fonte de emissões de gases de efeito estufa, especialmente em razão da predominância de ônibus movidos a *diesel*. Embora os ônibus elétricos a bateria se destaquem nas estratégias de descarbonização da frota, este artigo examina as tecnologias alternativas de baixa emissão disponíveis, como os veículos híbridos e a biocombustíveis, comparando-as entre si. A análise contempla também experiências internacionais, políticas públicas e impactos sobre o sistema produtivo. Por fim, o estudo defende a relevância de uma estratégia nacional integrada, capaz de combinar diferentes soluções para a transição energética no setor, em alinhamento com a Nova Indústria Brasil (NIB).

Abstract

Public transportation plays a fundamental role in urban mobility but also represents a significant source of greenhouse gas emissions, particularly due to the predominance of diesel-powered buses. While battery-electric buses stand out in fleet decarbonization strategies, this article examines the available low-emission alternative technologies, such as hybrid and biofuel-powered vehicles, comparing their features and performance. The analysis also considers international experiences, public policies, and impacts on the productive system. Finally, the study highlights the importance of an integrated national strategy that combines various solutions for the sector's energy transition, aligned with New Industry Brazil (NIB).

Introdução

O transporte público coletivo tem papel estruturante nas cidades brasileiras, sendo essencial para garantir o direito à mobilidade, diminuir as desigualdades socioespaciais e promover a eficiência urbana. No entanto, o setor também é um dos grandes emissores de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil, especialmente pela predominância de ônibus a *diesel*. Nesse contexto, descarbonizar a frota de ônibus é uma estratégia-chave para reduzir impactos ambientais, contribuir para as metas climáticas do Acordo de Paris e melhorar a qualidade do ar nas cidades.

A transição energética no transporte público pode impulsionar a reinindustrialização verde, baseada em inovação e fortalecimento das cadeias produtivas nacionais. Essa perspectiva se alinha aos objetivos da Nova Indústria Brasil (NIB), lançada em 2023 pelo Governo Federal, que marca o retorno de uma política industrial ativa e sustentável. A Missão 5 da NIB – Bioeconomia, descarbonização e transição e segurança energéticas – lançada em 2024, estabelece metas para ampliar a participação de biocombustíveis na matriz de transporte (Missão..., 2024).

O artigo reconhece a centralidade dos ônibus elétricos a bateria (OEB) na atual estratégia de transição energética do transporte público. No entanto, propõe uma análise de tecnologias alternativas de propulsão de baixo carbono, como ônibus híbridos e a biocombustíveis, especialmente aplicáveis em locais onde a implantação de OEBs enfrenta limitações técnicas, financeiras ou de infraestrutura. Além das questões técnicas, a análise contempla o mercado nacional, as políticas setoriais, as experiências internacionais e o impacto no sistema produtivo. O objetivo do estudo é apoiar o debate sobre uma transição energética eficaz, justa

e sustentável do setor, conciliando metas ambientais e industriais e promovendo o fortalecimento da indústria nacional, em alinhamento com as diretrizes da NIB.

O mercado de ônibus no Brasil

Em 2024, a frota nacional de ônibus totalizou 773,5 mil unidades (Fe nabrave, 2024), das quais cerca de 107 mil são destinadas ao transporte público urbano (NTU, 2024). Nesse mesmo ano, foram produzidos 31,2 mil ônibus de diferentes tipos, com 22,4 mil unidades licenciadas (Anfavea, 2025). O Brasil exportou cerca de 30% da sua produção total de ônibus nos últimos cinco anos. A Tabela 1 oferece a evolução da produção doméstica e sua destinação a partir de 2020.

Tabela 1 | Produção doméstica e exportação de ônibus em geral (unidades)

	Produção	Exportações
2020	20.546	6.260
2021	20.817	6.145
2022	35.155	8.733
2023	24.089	8.406
2024	31.220	8.370

Fonte: Elaboração própria com base em Anfavea (2025).

Entre 2005 e 2024, a produção nacional acumulada totalizou 797 veículos eletrificados e 21 a gás natural veicular (GNV) (Anfavea, 2025). Embora os números ainda sejam modestos, observa-se um crescimento expressivo do uso de ônibus elétricos, enquanto a aplicação das demais tecnologias baseadas em combustíveis alternativos ao diesel é historicamente insignificante. O volume de ônibus eletrificados licenciados

em 2024 representa um aumento de 265% em relação ao ano de 2023, e mais de 1.000% em relação à média dos três anos anteriores. A Tabela 2 apresenta os emplacamentos de ônibus no Brasil desde 2020, por origem de fabricação e por tipo.

Tabela 2 | Emplacamentos de ônibus urbanos

Emplacamentos por origem		Emplacamentos por tipo					Total	
Nacionais	Importados	Diesel	Gasolina	Etanol	Elétrico	Gás		
2020	13.940	0	13.921	1	0	18	0	13.940
2021	14.060	2	14.040	0	0	20	2	14.062
2022	17.356	1	17.322	0	0	35	0	17.357
2023	20.428	7	20.347	0	0	86	2	20.435
2024	22.402	33	22.118	1	1	314	1	22.435

Fonte: Elaboração própria com base em Anfavea (2025).

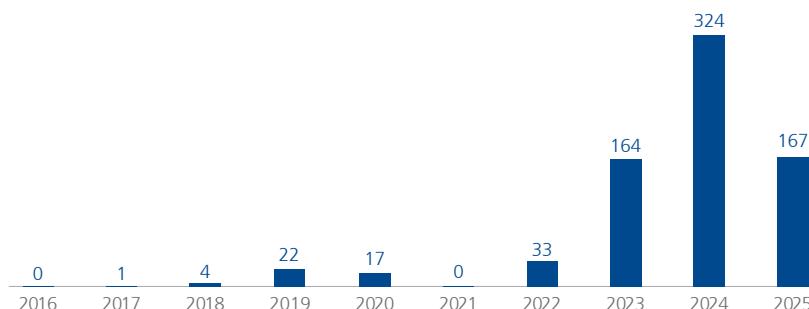
Os números de ônibus elétricos em operação exclusivamente nos sistemas de transporte público são apurados pela aliança Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator (ZEBRA)¹ e divulgados na plataforma E-Bus Radar. Os gráficos 1 e 2 ilustram, respectivamente, a evolução do uso e a participação de ônibus elétricos no Brasil por fabricante.

A combinação entre marcos regulatórios, políticas públicas coordenadas, incentivos financeiros e capacidade produtiva nacional confere ao mercado de ônibus elétricos no Brasil um cenário promissor de expansão sustentada, com potencial de diversificação geográfica e aumento da participação de fabricantes nacionais. Apesar dos avanços recentes, o setor ainda enfrenta desafios relevantes, como a instabilidade da demanda, o elevado custo dos veículos e a necessidade de investimentos em infraestrutura de recarga. Tais desafios, por sua vez,

¹ Mais informações sobre a aliança ZEBRA estão disponíveis em: <https://www.c40.org/what-we-do/scaling-up-climate-action/transportation/zero-emission-rapid-deployment-accelerator-zebra-partnership/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

podem abrir espaço para tecnologias alternativas, as quais, embora tenham participação marginal e enfrentem obstáculos de outras naturezas, podem ganhar importância em contextos específicos, diante da busca por soluções mais viáveis e adaptadas às realidades locais, ainda que transitoriamente.

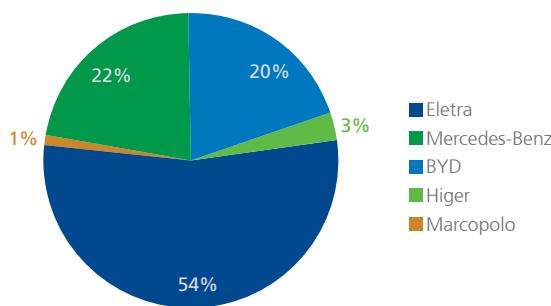
Gráfico 1 | Evolução da quantidade de ônibus elétricos a bateria em operação no Brasil



Fonte: Elaboração própria com base em E-Bus Radar (c2025).

Nota: O período analisado no gráfico compreende 1.1.2016 a 9.6.2025.

Gráfico 2 | Distribuição por fabricante de ônibus novos elétricos a bateria no Brasil



Fonte: Elaboração própria com base em E-Bus Radar (c2025).

Nota: O período analisado no gráfico compreende 1.1.2016 a 9.6.2025.

Tecnologias de propulsão alternativas

Os motores de combustão interna utilizados no transporte coletivo urbano têm evoluído de forma significativa. Tornaram-se mais eficientes no consumo de energia e passaram a emitir menos poluentes, impulsionados pelo maior rigor dos padrões técnico-regulatórios e pela melhoria da qualidade dos combustíveis.²

Quando esses avanços são acompanhados da adoção de eletrificação ou biocombustíveis, permite-se, ainda, maior redução de emissões, assim como ganhos de eficiência. As considerações levantadas nesta seção têm como objetivo contextualizar as diferentes tecnologias de propulsão, apresentando suas principais características, níveis de desenvolvimento e aplicações.

Propulsão elétrica

Atualmente os ônibus elétricos podem ser alimentados por cabos aéreos, baterias e até hidrogênio. O uso comercial de energia elétrica no transporte coletivo urbano, porém, remonta à inauguração da primeira linha de bonde elétrico, em 1881, na Alemanha (A história..., 2020). As razões que, na época, motivaram o uso da eletricidade como alternativa aos sistemas de transporte baseados em combustão ou vapor –

2 Em menos de duas décadas, os limites máximos de emissão de elementos poluentes e particulados no âmbito do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), conforme regulamentado por resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), passaram por importantes reduções. Em comparação à fase P-5 do Proconve (equivalente ao Euro III), vigente desde 2006, a fase P-8 (equivalente ao Euro VI), em vigor desde 2023, apresentou as seguintes reduções nos limites máximos toleráveis de emissões, em g/kWh: de 2,1 de monóxido de carbono (CO) para 1,5; de 0,66 de hidrocarbonetos (HCs) para 0,13; de 5,0 de óxidos de nitrogênio (NOx) para 0,4; e de 0,10 de micropartículados para 0,01. Além disso, a fase P-8 prevê a obrigatoriedade do uso de tecnologias avançadas de controle de emissões, como sistemas de redução catalítica seletiva (*selective catalytic reduction – SCR*) e filtros de partículas (*diesel particulate filter – DPF*), além de sistemas de diagnóstico de bordo (*on-board diagnostics – OBD*). O Proconve não regula especificamente a emissão de GEE.

especialmente no transporte de passageiros – permanecem até hoje: maior eficiência energética e redução de ruídos, vibrações, temperaturas, emissões de fuligem e de gases de combustão.

Ao longo do tempo, tais benefícios foram potencializados pelo desenvolvimento de novos componentes e subsistemas, como baterias e motores-geradores cada vez mais leves e eficientes, além de sistemas auxiliares de recuperação de energia, como o sistema de frenagem regenerativa, a regeneração por desaceleração em rampa e o sistema de recuperação de calor, entre outros, em desenvolvimento.

Outro fator relevante para a aplicação da propulsão elétrica é o potencial de descarbonização associado ao uso da eletricidade, especialmente no Brasil, em razão de sua matriz elétrica de baixa intensidade de carbono. O país mantém, há 20 anos, uma expressiva participação de fontes renováveis na geração de eletricidade, superior a 70%, atingindo pico de 89,2% em 2023 (EPE, 2024).³ É importante, no entanto, contrapor que a eletrificação depende da implantação de infraestrutura adequada, como estações de recarga específicas ou, no caso dos trólebus, redes aéreas de alimentação.

Ônibus elétrico a bateria

A viabilidade do uso de baterias na propulsão veicular só foi alcançada com o uso das baterias de íon de lítio nos anos 1990 (Santos, 2019), que trouxeram densidade energética e leveza inéditas. Inicialmente, esse avanço revolucionou a portabilidade de diversos equipamentos elétricos. Com a evolução química das baterias e o aumento da escala de produção, houve significativa redução de custo, peso e volume, permitindo que

³ O Relatório Energético Nacional 2024 (ano de referência 2023) informa que o setor elétrico brasileiro emitiu em média 55,1 gCO₂eq/KWh de energia elétrica gerada.

fossem aplicadas em veículos pesados, como os ônibus, que passaram a ter mais autonomia no uso regular.

Atualmente, veículos elétricos a bateria são uma tendência global. Em 2024, foram vendidos cerca de 17 milhões de veículos elétricos e híbridos *plug-in*, um aumento de 25% em relação a 2023. Considerando apenas ônibus elétricos novos, foram comercializadas aproximadamente 70 mil unidades em 2024, um aumento de cerca de 30% em relação ao ano anterior. Para ilustrar a atual tendência da demanda global por veículos elétricos, em 2024, foi comercializado 1 TWh de baterias para esse fim, valor que deve triplicar até 2030 (IEA, 2025).

Entre as tecnologias disponíveis, destacam-se as baterias de fosfato de ferro-lítio (LFP), níquel-manganês-cobalto (NMC) e níquel-cobalto-alumínio (NCA), cada uma com características específicas de custo, desempenho e segurança. Além das melhorias incrementais nas baterias de íon de lítio, cresce o interesse pelas baterias de estado sólido, que oferecem maior densidade energética, mais segurança, menor tempo de recarga e maior autonomia e vida útil. Apesar dos desafios para produção em escala, testes conduzidos por fabricantes globais apresentam resultados promissores (Onstad, 2024; Contemori, 2025), o que poderá representar um novo salto tecnológico para os meios de transporte eletrificados e para inúmeras outras aplicações.

A expansão da eletrificação veicular traz benefícios tecnológicos, energéticos e ambientais, mas também impõe desafios significativos. Além daqueles associados à necessidade de maior investimento e de mitigação de riscos operacionais (como contextos de crise energética), deve-se considerar a necessidade de adoção de práticas responsáveis na cadeia produtiva, especialmente no que se refere a logística reversa, reciclagem e recondicionamento de baterias e componentes críticos. Há ainda o desafio, situado a montante na cadeia produtiva, da crescente

demandas mundiais por minerais críticos e terras raras, cuja exploração e processamento são essenciais não apenas para a mobilidade elétrica – como a fabricação de baterias de íon lítio e ímãs permanentes de motores elétricos – mas também para a engenharia de materiais avançados e ligas especiais em geral, de múltiplas aplicações, o que exige atenção estratégica.

Célula de combustível de hidrogênio

A célula de combustível de hidrogênio converte a energia química do hidrogênio em eletricidade, calor e vapor de água. Suas principais vantagens sobre os OEBs são o reabastecimento rápido e a maior densidade de energia, o que amplia a autonomia dos veículos (Soleimani *et al.*, 2024). Desde meados dos anos 2000, os ônibus a hidrogênio operam em sistemas de transporte público na Europa, na Ásia e nos Estados Unidos da América (EUA), com autonomia entre 300 e 500 km. No Brasil, há apenas iniciativas experimentais, sem operações comerciais dessa tecnologia.

O hidrogênio enfrenta barreiras que limitam sua adoção comercial. Por ser um gás de baixíssima densidade e altamente inflamável, o armazenamento e a distribuição seguros elevam significativamente os custos, que se somam ao alto custo de produção. O impacto ambiental varia conforme a fonte de energia usada para a produção do hidrogênio: o hidrogênio cinza, derivado da reforma de gás natural fóssil, pode apresentar um balanço de emissões de CO₂ desfavorável; por outro lado, o hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, é uma alternativa com potencial de emissão praticamente nula ao longo de todo o seu ciclo de vida.

No Brasil, a adoção escalável de ônibus a hidrogênio dependeria da produção centralizada de hidrogênio verde em regiões com alta geração

renovável e forte demanda por transporte coletivo.⁴ Uma alternativa promissora no contexto brasileiro é a produção de hidrogênio a partir do etanol, o que eliminaria os desafios logísticos da distribuição do gás. Nesse caso, o hidrogênio seria produzido por unidades reformadoras instaladas nos próprios postos de abastecimento. Essa tecnologia já conta com iniciativas-piloto e experimentais em andamento no Brasil (Melloni, 2025; Gama, 2025).

Trólebus

Trólebus são ônibus elétricos alimentados continuamente por uma rede de fiação elétrica aérea. Essa solução oferece os benefícios da motorização elétrica, contudo é limitada pelo alto custo da infraestrutura e pela baixa flexibilidade operacional.

O Brasil tem apenas dois sistemas de trólebus de porte significativo operando comercialmente: o da capital paulista, que conta com frota moderna e opera principalmente na Zona Leste da cidade; e o sistema denominado Corredor Metropolitano ABD, que liga a cidade de São Paulo ao Grande ABC empregando ônibus e trólebus (Bazani, 2024).

Embora a infraestrutura de trólebus seja dispendiosa, a demanda por veículos elétricos e a elevada oferta doméstica de energia elétrica renovável podem gerar oportunidades para as indústrias de transporte e de energia no Brasil. Além disso, o avanço das tecnologias de armazenamento de energia podem tornar os trólebus uma inspiração para soluções de transporte coletivo urbano mais atrativas.

4 Não sem razão, o Nordeste brasileiro concentra os principais anúncios de iniciativas de produção de hidrogênio verde do país, entre os quais destacam-se o projeto Base One, da Enegix, em Pecém (CE), o Green Energy Park na Zona de Processamento de Exportação de Parnaíba (PI), o projeto da Qair, em Suape (PE), a planta industrial da Unigel em Camaçari (BA), e o Complexo Alto dos Ventos (RN), todos impulsionados pelo alto potencial em energia renovável e infraestrutura portuária para exportação.

Um exemplo é o sistema que combina alimentação por rede aérea e uso de baterias, permitindo que o veículo opere conectado à rede, quando disponível, e utilize as baterias em trechos sem cabeamento. Essa solução será aplicada no sistema de transporte rápido por ônibus do ABC paulista (BRT-ABC), que ligará São Paulo a municípios vizinhos em um trajeto de 17,3 km. O início da operação está previsto para o segundo semestre de 2026, com 92 veículos articulados e rede aérea instalada em apenas um dos sentidos.

Ônibus a biocombustíveis

Os biocombustíveis permitem reduzir as emissões de GEE, pois o carbono liberado na queima foi previamente capturado da atmosfera pelas plantas durante seu crescimento, por meio da fotossíntese, ou reaproveitado a partir de resíduos orgânicos, o que neutraliza grande parte do ciclo do carbono.

Motores a *diesel* ainda predominam nas frotas de ônibus urbanos e devem continuar presentes no transporte coletivo urbano por prazo ainda indefinido. Mesmo sendo fontes de ruído, calor, vibrações e poluentes, esses motores permanecem como a principal escolha para veículos pesados, em razão de seu alto torque, eficiência e durabilidade – características valorizadas nas operações de transporte.

Nesse contexto, o uso de combustíveis renováveis é uma solução viável, sobretudo porque certos biocombustíveis podem ser adicionados às misturas de *diesel* já utilizadas ou até mesmo substitui-lo integralmente. Isso permite reduzir as emissões sem a necessidade de substituir a frota existente. Paralelamente, o desenvolvimento de ônibus projetados para operar exclusivamente com combustíveis de origem renovável avança, ampliando possibilidades de transição para um transporte mais sustentável.

Biodiesel

O *biodiesel* é um biocombustível produzido a partir de óleos vegetais ou gorduras de origem animal. Cerca de 70% da produção do *biodiesel* brasileiro tem como matéria-prima a soja, seguida por gorduras animais, algodão, milho e óleo de cozinha reciclado (Cotta, 2023). Em 2024, o Brasil registrou a produção recorde de mais de 9 milhões de m³ de *biodiesel*, contra cerca de 7,5 milhões de m³ produzidos em 2023 (Produção..., 2025).

O *biodiesel* tem o objetivo de substituir o *diesel* ou ser adicionado como mistura. No entanto, em razão de algumas características físico-químicas, como menores densidades volumétrica e energética, maiores viscosidade, higroscopicidade e poder solvante, misturas acima de 20% podem requerer adaptações no motor a *diesel* (ANP, 2018). No Brasil, o porcentual de *biodiesel* adicionado ao *diesel* comercial é de 15% (ou B15), em razão de decisão do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) havida em 1º de agosto de 2025.

Óleo vegetal hidrotratado

O *hydrotreated vegetable oil* (HVO) é um biocombustível avançado, produzido a partir dos mesmos insumos biológicos do *biodiesel*. No entanto, sua obtenção se dá por meio de hidrogenação, processo mais custoso do que a transesterificação usada na produção do *biodiesel*. O resultado é um produto quimicamente semelhante ao *diesel*, e que, diferentemente do *biodiesel*, pode ser utilizado sem adaptações nos motores, independentemente do porcentual de adição.

Por se adaptar imediatamente à frota existente, o HVO teria ampla aceitação entre operadores de transportes públicos. No Brasil, o uso do HVO ainda está restrito a poucas iniciativas de caráter experimental e

voluntário, em razão de disponibilidade e custo. A Tabela 3 compara os custos do *biodiesel* puro (B100), do HVO e do *diesel* (S10).

Tabela 3 | Comparativo de custos energéticos do *biodiesel*, do HVO e do *diesel*

Combustível	Preço por litro (R\$)	Poder calorífico inferior (kWh/litro)	Custo por kWh (R\$)
<i>Biodiesel</i> (B100)	5,41	9,0	0,60
HVO (estimado)	8,92 a 9,81	9,8	0,91 a 1,00
<i>Diesel</i> fóssil (S10)	3,27	9,9	0,33

Fonte: Elaboração própria com base em Fecomcombustíveis (HVO..., 2021) e ANP (2020).

Etanol

Apesar de a indústria brasileira estar apta a oferecer ônibus urbanos movidos a etanol e de o país ser um grande produtor desse insumo, o uso desses veículos é insignificante no Brasil, com operação comercial limitada a algumas poucas linhas na cidade de São Paulo. Mesmo com a facilidade logística, por estar localizada em um estado produtor de etanol (ANP, 2024), essas iniciativas não lograram sucesso.

A utilização do etanol em veículos pesados enfrenta desafios técnicos, a começar pela expressiva diferença entre os poderes caloríficos do etanol e do *diesel*, da qual resultam aumentos substanciais de volume e peso, o que dificulta especialmente a cobertura de longas distâncias. Outras variáveis passam a ser consideradas na equação de viabilidade, como estabilidade e custo de oportunidade dos preços do etanol, custos de manutenção mais elevados, uso intensivo de aditivos para uso em motores de ciclo *diesel* (Lascala, 2011).

Por se tratar de um combustível com alta disponibilidade e contar com uma rede de distribuição já consolidada, o etanol pode encontrar nichos de aplicação viáveis. Um exemplo é o seu uso em sistemas híbrido-elétricos, havendo modelo recentemente lançado no Brasil.

Biometano

O biometano, nome dado ao gás metano de origem renovável, é derivado da purificação do biogás gerado pela decomposição de resíduos orgânicos. Suas principais fontes no Brasil são oriundas da atividade sucroalcooleira, de processos de saneamento e de outras atividades agropecuárias.

O biometano pode ser utilizado sem prejuízo nos veículos movidos a GNV, cuja tecnologia é madura e consolidada, apesar de uso incipiente no Brasil. Atualmente tem potencial estimado em 84,6 bilhões de Nm³/ano, o maior do mundo até o momento (Lemos; Cardoso; Costa, 2024). A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) calcula que um terço do consumo total de diesel e gasolina no Brasil, correspondente a 150% de suas importações, apresenta potencial para ser substituído por biometano economicamente viável (ao preço de R\$ 2,90/m³), a partir somente do aproveitamento de resíduos da indústria agropecuária (EPE, 2025a).

O Brasil possui capacidade instalada de 4,7 bilhões de Nm³/ano de biogás em 1.587 plantas. Apenas 54 produzem biometano (1,7 bilhão de Nm³/ano), enquanto a maior parte é destinada à geração elétrica em 1.349 unidades (2,8 bilhões de Nm³/ano) (CIBiogás, 2024).

Duas abordagens de uso do biometano contribuem para a descarbonização do transporte público, ambas aplicadas a sistemas de ônibus urbanos a GNV. A primeira é a implantação de sistemas que utilizam exclusivamente biometano envasado, adquirido diretamente dos produtores. A segunda é a descarbonização progressiva do setor de gás natural como um todo, prevista na Lei do Combustível do Futuro (Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024). Essa lei determina a adição obrigatória de 1% de biometano ao gás natural fóssil produzido ou importado a partir de 2026, com possibilidade de aumento gradual até 10% em 2034, conforme decisão do CNPE, com comprovação por meio do Certificado de Garantia de Origem de Biometano (CGOB).

Apesar do grande potencial de oferta local e de uma indústria capaz de produzir comercialmente novos ônibus coletivos urbanos a GNV (Plattek; Villarim; Cavalcanti, 2025), há importantes desafios para a implementação em escala de ônibus a biometano no Brasil, começando pela distribuição. Em locais já atendidos por rede de gás natural, a injeção de biometano demandaria investimentos na ligação aos produtores e na adaptação de estações de abastecimento dos ônibus urbanos. Assinala-se, ainda, que mesmo os postos de abastecimento de GNV existentes nas cidades dotadas de rede são equipados para alimentar apenas veículos leves (BNDES, 2020).

Não obstante, além de movimentos orientados ao uso em escala de biometano em ônibus urbanos, como o que recentemente vem sendo patrocinado pela Prefeitura Municipal de São Paulo (Especialistas..., 2025), observa-se no Brasil o surgimento de outros projetos-piloto, com uso exclusivo de biometano. Isso demonstra um crescente interesse no uso desse insumo, a fim de reduzir as emissões e a dependência de combustíveis fósseis.

Ônibus híbridos

O conceito de veículo híbrido inclui uso de diferentes combinações energéticas, formas de recarga e estratégias de gerenciamento de energia. Os veículos híbridos mais comuns no segmento de transporte coletivo urbano combinam motores a combustão interna (geralmente *diesel* ou gás) e motores elétricos, em três arranjos básicos mais comuns: o *hybrid electric vehicle* (HEV), o *plug-in hybrid electric vehicle* (PHEV) e o *mild hybrid electric vehicle* (MHEV). Do ponto de vista industrial, a cadeia produtiva dos híbridos compartilha diversos componentes com a dos OEBs (Plattek; Villarim; Cavalcanti, 2025), o que demonstra sinergia entre as diferentes plataformas tecnológicas.

Quadro 1 | Resumo das principais características de ônibus urbanos híbridos

Tipo	Características
HEV	<ul style="list-style-type: none"> • Não requer infraestrutura de recarga, uma vez que a bateria é recarregada por regeneração de energia e pelo motor a combustão. • Apresenta consumo e emissões moderadamente reduzidos, com uso preferencial em tráfego urbano, com frenagens frequentes. Emissões globais podem ser reduzidas pelo uso de combustíveis renováveis. • Autonomia elétrica muito limitada, com acionamento do motor elétrico restrito a velocidades e torques mais baixos, e dependente do estado de carga da bateria. • Eficiência ambiental e econômica dependem consideravelmente do perfil de uso, com maior vantagem em tráfego urbano e menor vantagem em trajetos longos ou de alta velocidade.
PHEV	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de infraestrutura de recarga e emprego de dois sistemas de tração veicular – motor elétrico e a combustão – com desempenho próximos tornam a solução mais cara. • Maior autonomia em modo 100% elétrico, o que reduz significativamente as emissões, sem prejuízo de reduções adicionais em termos globais se: (i) recarregado com energia elétrica externa de fontes renováveis; e (ii) utilizado combustível de origem renovável. • Flexibilidade moderada: utiliza eletricidade em rotinas curtas e combustível em viagens longas.
MHEV	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema simples e de menor custo da frota, em que um motor elétrico de baixa potência auxilia o motor a combustão durante as acelerações e recupera energia nas frenagens. • Maior flexibilidade operacional e baixo custo de investimento no sistema, dado que não requer infraestrutura de recarga. • Não opera em modo totalmente elétrico, apresentando benefícios ambientais bem mais limitados, que são mitigáveis pela adoção de combustíveis renováveis. • Diferentemente dos demais tipos, os ônibus híbridos MHEV ainda não são empregados no Brasil ou amplamente usados no mundo em sistemas de transporte urbano coletivo.

Fonte: Elaboração própria.

Os híbridos aliam as vantagens dos motores elétricos, como eficiência e durabilidade, com a flexibilidade dos combustíveis. No contexto da descarbonização, podem representar soluções intermediárias ou transitórias, e, quando associados a biocombustíveis, uma alternativa permanente rumo à neutralidade de carbono. O Quadro 1 sintetiza as principais características de cada arranjo híbrido para ônibus urbanos.

Comparativo sintético das tecnologias do transporte por ônibus

Esta seção apresenta um comparativo entre as principais opções tecnológicas e operacionais do transporte por ônibus. Os quadros 2 a 4 sintetizam as características das diferentes tecnologias e os respectivos insumos energéticos utilizados.⁵

Observa-se que o ônibus a *diesel* é o mais poluente, com altos níveis de emissões em todos os critérios. Os elétricos são a tecnologia com menor impacto ambiental, eliminando emissões locais de CO₂, óxido de nitrogênio (Nox) e material particulado (MP). As tecnologias híbridas apresentam reduções intermediárias, principalmente nas emissões locais, e podem ser soluções de transição. Os biocombustíveis (biometano, *biodiesel*, HVO e etanol hidratado) se destacam por reduzir significativamente as emissões no ciclo completo (poço à roda), mesmo mantendo emissões locais.

5 Com o objetivo de simplificar a comparação entre tecnologias, o estudo não analisa combinações específicas de veículos, misturas de combustíveis ou condições operacionais, mas considera apenas configurações comerciais típicas. As análises refletem um recorte intencionalmente generalista, diante da rápida evolução tecnológica e da complexidade das possíveis variações.

Quadro 2 | Comparativo de emissões por tecnologia e combustível

Tecnologia	Emissão de CO ₂ por unidade de trabalho		Óxido de nitrogênio (NOx) e material particulado (MP)
	Física local (escapamento)	Poço à roda (líquida)	
Combustão interna	Diesel (B15)	●●●	●●●
	GNV	●●●	●●●
	Biometano	●●●	●
	Biodiesel	●●●	●●
	HVO	●●●	●
	Etanol hidratado	●●●	●●●
Híbrida	MHEV	●●●	●●●
	HEV	●●	●●
	PHEV	●●	●●
Elétrica	Ônibus a bateria	—	●
	Trólebus	—	●
	Hidrogênio verde	—	—

— Zero ou net zero ● até 30 gCO₂eq/MJ ●● entre 31 e 60 gCO₂eq/MJ ●●● mais que 60 gCO₂eq/MJ

Fonte: Elaboração própria com base em EPE (2025b); Liu et al. (2023); Vourliotakis e Platsakis (2023) e Ognissanto e Jones (2023).

Quadro 3 | Comparativo de maturidade de mercado e principais barreiras

Tecnologia	Maturidade de mercado		Principais barreiras
	Brasil	Mundo	
Combustão interna	Diesel	Consolidada	Metas ambientais.
	GNV	Incipiente	Rede de distribuição.
	Biometano	Incipiente	Rede de distribuição e injeção.
	Biodiesel	Consolidada	Custo e oferta do combustível. Limite técnico de adição ao diesel.
	HVO	Incipiente	Custo e oferta do combustível.
	Etanol hidratado	Pouco significativa	Técnico-operacionais.
Híbrida	MHEV	Inexistente	Equivalente ao diesel.
	HEV	Em expansão	Maior investimento.
	PHEV	Em expansão	Maior investimento.
Elétrica	Ônibus a bateria	Em expansão	Maior investimento.
	Trólebus	Em desuso	Capex e opex altos. Inflexibilidade de rotas.
	Hidrogênio verde	Inexistente	Segurança e oferta de equipamentos. Custo do H ₂ . Rede de abastecimento.

Fonte: Elaboração própria.

Como se observa no Quadro 3, o *diesel* domina o mercado, principalmente em razão do baixo custo e da alta eficiência. Entre os combustíveis alternativos, o *biodiesel* é a opção mais consolidada no Brasil; biometano e HVO ainda são incipientes e enfrentam barreiras como infraestrutura e custo, enquanto o etanol hidratado é limitado por questões técnico-operacionais. Os híbridos estão em expansão, mas também exigem maior investimento. Já os ônibus a bateria avançam, embora também se deparem com alto custo inicial. O trólebus enfrenta questões com a rede aérea. E o hidrogênio verde, incipiente, lida com obstáculos como o preço e segurança.

Quadro 4 | Comparativo dos principais fatores de custo

Tecnologia		Principais fatores de custo de capital	Principais fatores de custo operacional
Combustão interna	<i>Diesel</i>	Baixo custo do equipamento.	Manutenção simples.
	GNV	Maior custo do equipamento.	Manutenção mais cara e frequente.
	Biometano	Maior custo do equipamento.	Manutenção mais cara e frequente.
	<i>Biodiesel</i>	Equivalente ao <i>diesel</i> .	Preço maior do combustível.
	HVO	Equivalente ao <i>diesel</i> .	Preço maior do combustível.
	Etanol hidratado	Equivalente ao <i>diesel</i> .	Manutenção mais cara e frequente. Maior peso para a mesma distância.

(Continua)

(Continuação)

Tecnologia	Principais fatores de custo de capital	Principais fatores de custo operacional
Híbrida	MHEV	Equivalente ao <i>diesel</i> .
	HEV	Maior custo do equipamento.
	PHEV	Maior custo do equipamento. Infraestrutura de recarga.
Elétrica	Ônibus a bateria	Maior custo do equipamento. Infraestrutura de recarga.
	Trólebus	Rede elétrica aérea.
	Hidrogênio verde	Maior custo do equipamento. Postos de hidrogênio.

Fonte: Elaboração própria.

O *diesel* é a tecnologia com o menor custo de capital. Comparativamente, o biometano apresenta custos mais elevados e necessidade de manutenção mais frequente. O *biodiesel*, o HVO e o etanol apresentam um custo de capital semelhante ao do *diesel*, porém os custos operacionais são maiores, principalmente devido ao preço do combustível e, no caso do etanol, às condições operacionais relacionadas à autonomia para a mesma quantidade de combustível. As tecnologias híbridas podem oferecer autonomia, mas o PHEV enfrenta a mesma dependência da infraestrutura de recarga dos OEBs.

Estes últimos ainda apresentam alto custo de aquisição e autonomia limitada, no entanto sua operação tende a ser mais econômica. Finalmente, o hidrogênio verde, embora combine um custo elevado dos equipamentos com desafios operacionais, como o preço do combustível e a necessidade de postos de abastecimento, destaca-se por proporcionar maior autonomia.

No caso brasileiro, os biocombustíveis são boas opções para cidades com disponibilidade regional desses insumos e infraestrutura elétrica limitada, podendo ser utilizados em operações que precisam de grande autonomia e uso contínuo. Os OEBs são particularmente recomendáveis em grandes centros urbanos com infraestrutura elétrica robusta e capacidade de investimento, onde se prioriza a qualidade do ar e a redução do ruído, e para uso em corredores de alta demanda. Já os modelos híbridos, especialmente com biocombustíveis, são indicados para localidades dispostas a investir em aplicações que buscam reduzir emissões antes de investir pesadamente em infraestrutura elétrica e sem perder flexibilidade operacional.

Experiências internacionais

A seguir são apresentadas algumas experiências internacionais de descarbonização do segmento de ônibus urbanos por meio de rotas tecnológicas alternativas aos OEBs. De maneira geral, observa-se que os entraves à consolidação dos OEBs no Brasil também são encontrados – e são, por vezes, mais acentuados – em outras rotas alternativas no cenário internacional. Por isso, o crescimento dos OEBs desponta como tendência mesmo nessas localidades onde houve experiências alternativas.

Limites à consolidação do biometano como alternativa na Suécia

A Suécia é uma das pioneiras na integração do biometano ao transporte coletivo urbano. Desde 2005, o país investe na produção do biocombustível a partir de resíduos agrícolas e orgânicos, inicialmente com preponderância de investimentos públicos e, mais recentemente, com a liderança de investimentos privados na expansão do uso de resíduos agroindustriais.

O país estabeleceu como meta a substituição progressiva do GNV pelo biometano até 2030, alcançando, em 2022, um nível de 96% de biometano no transporte a gás, em comparação aos 60% registrados em 2012. Durante esse período, o consumo total de gás no transporte manteve-se estável em torno de 1.500 GWh. Esse avanço foi impulsionado por uma combinação de fatores: altos impostos sobre combustíveis fósseis, isenções fiscais para fontes renováveis, subsídios à produção e apoio a investimentos e valorização dos créditos de carbono (Klackenberg, 2024).⁶

Apesar desse progresso, a frota de ônibus a gás na Suécia começou a cair de 2.837 veículos (21% da frota total) em 2019 para 2.433 em 2024 (17%), enquanto a frota de ônibus elétricos cresceu de 268 veículos (3%) para 1.453 (10%) no mesmo período. A tendência de eletrificação vem se fortalecendo graças à maior percepção de previsibilidade de custos e confiabilidade operacional dos OEBs, se comparados às alternativas como o HVO ou o biometano, conforme entrevistas realizadas com gestores públicos e operadores (Åslund; Pettersson-Löfstedt, 2023; Ottosson; Danell, 2024).

6 Klackenberg (2024) lista três ações/programas vigentes na Suécia de incentivo econômico para a adoção do biometano: isenção do imposto sobre CO₂ e energia para viabilizar o biometano como combustível para transportes até o fim de 2030; apoio financeiro subsidiado à produção de biogás a partir de esterco, biogás transformado em biometano e biometano liquefeito para LBG7; e apoio financeiro (até aproximadamente 45-65%) para todos os tipos de investimentos ou medidas que levem a altas reduções de emissões de GEE.

Célula de combustível de hidrogênio como aposta industrial na Coreia do Sul

A Coreia do Sul tem investido em políticas públicas para incentivar o uso de ônibus movidos a célula de combustível de hidrogênio, com foco em dominar uma das tecnologias destinadas à redução de emissões e transição energética. Até 2019, os esforços estavam concentrados em pesquisa e desenvolvimento em parceria com a indústria (Cho; Kim; Park, 2024). O impulso decisivo veio com o lançamento do *hydrogen economy roadmap* (HER) pelo governo sul-coreano, que estabeleceu metas ambiciosas, como a produção de quarenta mil ônibus a hidrogênio e a instalação de 1.200 estações de abastecimento até 2040.

O plano previa, entre outras ações, projetos-piloto, substituição de ônibus a *diesel* da frota policial, subsídios para aquisição e operação de veículos, ampliação da infraestrutura e estímulo à pesquisa e desenvolvimento (P&D) para melhorar eficiência e segurança (Government of Korea, 2019). No entanto, a meta de dois mil ônibus a hidrogênio para 2022 não foi alcançada – em 2024, a frota era de apenas mil veículos (10% da frota global de ônibus a combustível), todos produzidos pela sul-coreana Hyundai. Das 310 estações de abastecimento previstas para 2022, trezentas foram instaladas. Em contraposição, foram fabricados, em 2024, 2.800 ônibus elétricos, produção oito vezes maior do que a de ônibus a célula de combustível, o que demonstra que o hidrogênio ainda é uma alternativa complementar na Coreia do Sul (IEA, 2025).

Entre os desafios estão a baixa aceitação pública da tecnologia, especialmente por preocupações com segurança, e o fato de que a maior parte do hidrogênio produzido no país ainda tem origem fóssil, o que limita seu potencial real de descarbonização. Apesar disso, o hidrogênio segue como uma aposta estratégica para o país, dadas as restrições geográficas,

a escassez de fontes renováveis e a busca pela liderança tecnológica no setor (Cho; Kim; Park, 2024; Park; Kim, 2025).

Diversificação de alternativas na descarbonização das frotas nos EUA

Os EUA adotam uma postura relativamente neutra na descarbonização dos transportes, favorecendo veículos com diferentes fontes energéticas, ao contrário da China, que prioriza a eletrificação, ou do Brasil, que foca em biocombustíveis.⁷ Destacam-se instrumentos como créditos tributários e metas de eficiência que incentivam a redução de emissões no setor.

O governo americano também concede subsídios diretos para a compra de ônibus urbanos com baixa ou zero emissão, incluindo apoio para infraestrutura de recarga. Estados como Califórnia e Nova York lideram essas iniciativas e planejam adquirir apenas ônibus com emissão zero a partir de 2029. A Bloomberg New Energy Finance (BNEF, 2024) projeta que, em 2027, mais de 40% dos ônibus vendidos no país serão elétricos, a bateria ou a célula de combustível. No entanto, cabe observar que tais políticas estão sujeitas a alterações, nas administrações federal e local, que poderão afetar as metas indicadas (Allan; Turner; Eisenberg, 2022; BNEF, 2024; Hynes; Lemons, 2025).

A Califórnia concentra cerca de um terço da frota nacional de ônibus com emissão zero (2.285 veículos) e conta com diversas iniciativas estaduais para descarbonizar sua frota até 2040. O estado mantém uma rede consolidada de programas de apoio financeiro para aquisição de

⁷ Conforme BNEF (2024), a produção de veículos movidos à bateria elétrica na China tem direito a seis vezes mais pontos de crédito do que veículos híbridos, no âmbito do New Energy Vehicle Credit Mandate. Já no Brasil, tal incentivo se manifesta, por exemplo, por meio dos percentuais mínimos de etanol e biodiesel exigidos na gasolina e no diesel.

ônibus de baixa ou zero emissão (BNEF, 2024; Hynes; Lemons, 2025; Jeffers *et al.*, 2022).

Desde 2019, os subsídios estaduais passaram a focar exclusivamente em ônibus elétricos a bateria e ônibus a célula de combustível. Entre 2010 e maio de 2025, foram concedidos mais de 2.700 incentivos financeiros, totalizando US\$ 323,2 milhões, dos quais 87,5% foram destinados a ônibus elétricos e 8,1% a ônibus a célula de combustível. As vendas desses últimos cresceram 55% entre 2023 e 2024. Em 2024, foram anunciados US\$ 14,8 bilhões em investimentos públicos e privados na cadeia do hidrogênio, incluindo a produção local de mil ônibus a célula de combustível, considerados estratégicos para diversificar o transporte limpo (Hynes; Lemons, 2025).

O *diesel* renovável como alternativa para a descarbonização na Finlândia

Entre 2007 e 2010, a Autoridade de Transportes de Helsinque (Helsingin Seudun Liikenne – HSL) participou do projeto Optibio, que avaliou, com cerca de trezentos ônibus, o desempenho do HVO em condições reais, no maior teste com esse combustível até então. Foram testadas misturas com 30% de HVO e HVO 100%, comprovando que o HVO pode substituir integralmente o *diesel* fóssil sem adaptações nos veículos ou nos sistemas de abastecimento, além de reduzir significativamente as emissões de poluentes (Nylund *et al.*, 2011; 2020).⁸

A partir dessa experiência, a HSL passou a incentivar o uso de bio-combustíveis no transporte coletivo, oferecendo subsídios anuais de

⁸ Em comparação com o *diesel*, o HVO 100% reduziu, em média, as emissões de NOx em cerca de 10%; as emissões de material particulado e monóxido de carbono em cerca de 30%; e as emissões de hidrocarbonetos totais (THC) em 40%. Entretanto, as emissões de CO₂ foram reduzidas em apenas 5% (Nylund *et al.*, 2011).

€1,7 milhão a operadores que utilizassem combustíveis renováveis. Em 2019, cerca de 50% da frota contratada pela HSL já operava com bio-combustíveis, evidenciando o impacto positivo da política na transição energética (Nylund *et al.*, 2020).

Apesar desse avanço, entre 2019 e 2024, a frota de ônibus a *diesel* (fóssil e/ou renovável) na Finlândia diminuiu 18% e sua participação caiu de 98% para 90% da frota total. No mesmo período, a frota de ônibus elétricos cresceu quase 15 vezes, alcançando 9% do total em 2024, o que confirma a avaliação de Nylund *et al.* (2020) sobre as dificuldades de mercado – como oferta, distribuição e preços – para consolidar os biocombustíveis como única rota de descarbonização.

Políticas nacionais de descarbonização do transporte

Desde o final do século XX, uma crescente mobilização global tem se debruçado sobre a transição para uma economia de baixo carbono. No entanto, tais iniciativas não têm se articulado com as políticas de transporte – setor altamente dependente de combustíveis fósseis e responsável por cerca de 25% das emissões globais de CO₂, e que permanece sendo, em escala global, o mais resistente a esforços de descarbonização (Milanez *et al.*, 2018). No Brasil, o setor de transporte respondeu por cerca de 10% (ou 223,8 milhões tCO₂) das emissões brutas nacionais totais de CO₂ (2,3 bilhões tCO₂) em 2023, correspondendo a mais da metade das emissões brutas de CO₂ do setor de energia (420 milhões tCO₂), de acordo com dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, c2025).

Tais questões de articulação também estão presentes na trajetória das políticas nacionais de energia e transporte. Entretanto, conforme será apresentado ao longo desta seção, o Governo Federal vem buscando, nos últimos dez anos, promover maior convergência e articulação entre essas políticas setoriais. Destaca-se, ainda, que tais programas têm sido aplicados na indústria automotiva sem distinção entre os tipos de veículos (leves, caminhões, ônibus etc.), o que faz com que os efeitos e resultados sejam atingidos de forma bastante heterogênea.

Políticas de estímulo aos biocombustíveis

As primeiras iniciativas públicas brasileiras para promover alternativas aos combustíveis fósseis surgiram há cerca de cinquenta anos, com o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) e o Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos (Pró-Óleo), incluindo o Programa de Substituição do Óleo Diesel (Prodiesel). Essas políticas, no entanto, estavam mais voltadas a enfrentar os impactos do choque do petróleo na década de 1970 do que a promover a descarbonização, e perderam força com a estabilização dos preços internacionais do petróleo (Milanez *et al.*, 2022).

Nos anos 2000, a promoção de biocombustíveis foi retomada com o Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico do Biodiesel (Probiodiesel). Esse esforço evoluiu e resultou, em 2005, na criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), que estruturou o marco institucional, legal e regulatório para o *biodiesel* no país. O PNPB também buscou descentralizar a produção regionalmente e diversificar as matérias-primas para aumentar a segurança dos investimentos (Costa; Bacellar, 2022; Milanez *et al.*, 2021; 2022).

A criação da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), por meio da Lei 13.576, de 26 de dezembro de 2017, marcou a primeira tentativa de integrar produção, comercialização e consumo sustentável de biocombustíveis a metas de redução de emissões de GEE, alinhando-se ao Acordo de Paris. Diferentemente do PNBP, o RenovaBio inclui outros biocombustíveis, como etanol, biometano e bioquerosene (BNDES; CGEE, 2024; Costa; Bacellar, 2022).

Para ampliar a participação dos biocombustíveis na matriz energética, o RenovaBio estabeleceu metas de redução de emissões, certificação da produção e criação do crédito de descarbonização (CBIO). Entre 2020 e 2023, o programa evitou a emissão de 100 milhões de toneladas de CO₂ e gerou cerca de US\$ 2 bilhões em receitas para o setor de biocombustíveis (BNDES; CGEE, 2024; Milanez *et al.*, 2018; 2022).

A Lei do Combustível do Futuro (Lei 14.993/2024) instituiu um arcabouço abrangente para a aceleração da transição energética no Brasil ao promover o uso de combustíveis renováveis e de baixa emissão nos segmentos de transporte terrestre, aéreo e de gás natural, combinando exigências de mistura, incentivos à produção, certificação e regulamentação ambiental. Em síntese, a lei estabelece metas anuais crescentes para misturas de *biodiesel* no *diesel* veicular, podendo atingir ao menos 20% até 2030. Com relação ao biometano, a lei cria o CGOB, título comercializável, emitido pelos produtores ou importadores desse insumo, que torna a sua origem comprovável e o seu uso demonstrável.

A descarbonização nos regimes automotivos brasileiros recentes

A indústria automobilística brasileira foi amplamente protegida desde sua instalação no país até o início dos anos 1990. A abertura econômica em 1990-1991 encerrou os regimes discricionários de proteção, e em 1995, com o aumento das importações e a preocupação com a fuga de investimentos, o Governo Federal retomou políticas industriais voltadas ao setor, conhecidas como “regime automotivo brasileiro”, para atrair montadoras, modernizar a produção e fortalecer a cadeia de fornecedores (De Negri, 1999).

O Programa Inovar-Auto (2013-2017) introduziu metas de emissões de CO₂ para veículos leves e condicionou benefícios tributários, como crédito presumido de imposto sobre produtos industrializados (IPI) de até 30%, ao cumprimento de metas de eficiência energética, abrangendo inclusive veículos a biocombustíveis, híbridos e elétricos (Vaz; Barros; Castro, 2015). O programa seguinte, Rota 2030 (2018-2023), avançou ao incluir explicitamente a promoção de biocombustíveis e tecnologias alternativas. Durante o Inovar-Auto, a redução de emissões de CO₂ foi de 15,46%, enquanto o Rota 2030 estabeleceu metas de redução de 11% até 2022 e de 18% até 2030.

Com a criação do Programa Mobilidade Verde e Inovação (Mover), vigente entre 2024 e 2028, a descarbonização passou a ocupar posição central. O programa visa contribuir para a meta nacional de redução de 50% das emissões de carbono até 2030 (tendo como referência o ano de 2011), e ampliou seu escopo para incluir também máquinas agrícolas e rodoviárias. Entre as novidades estão exigências mínimas de reciclagem de veículos leves a partir de 2027 e de veículos pesados a partir de 2028.

O Mover modernizou o sistema de incentivos fiscais ao introduzir penalidades e recompensas no IPI com base em critérios como fonte de energia, consumo, potência, reciclagem e tecnologias assistivas, superando o foco restrito à eficiência energética e ao desempenho estrutural do Rota 2030. O novo modelo também busca reduzir a renúncia fiscal elevada dos programas anteriores (Presidente..., 2024).

Uma inovação importante foi a mudança da metodologia de cálculo das emissões: o Mover substituiu a abordagem “do tanque à roda” (considerando apenas o uso do veículo) pela metodologia “do poço à roda”, que contabiliza todo o ciclo da fonte energética, da extração ao consumo. A partir de 2027, será adotada a metodologia “do berço ao túmulo”, que avaliará a pegada de carbono de todos os componentes e etapas do ciclo de vida dos veículos (Mover, 2023; Entendendo..., 2023).

O Novo PAC e o estímulo à demanda por transporte público coletivo descarbonizado

Em 2023, o Governo Federal lançou o Programa de Renovação de Frota do Transporte Público Coletivo Urbano (Refrota), incluído no Programa de Aceleração do Crescimento (Novo PAC) e voltado à renovação de frotas de ônibus. O Refrota foi impulsionado pela crise proveniente da pandemia e pela necessidade de modernização dos sistemas de transporte. Diferentemente das políticas citadas anteriormente, que atuam transversalmente à indústria automotiva ou à produção de energia, o Refrota aplica-se apenas aos veículos de transporte público. Inicialmente focado em veículos a *diesel*, o programa passou a priorizar OEBs⁹ devido à crescente preocupação com a redução de emissões de GEE.

⁹ Conforme item 3.1. do anexo da Portaria MCid 1.273, de 6 de outubro de 2023, a priorização de propostas com incremento de ônibus elétricos na frota constou entre os critérios de seleção.

Por meio da Portaria MCid 445, de 7 de maio de 2024, foram selecionados projetos que preveem a aquisição de 2.296 ônibus elétricos e seus sistemas de recarga, com investimento estimado em R\$ 7,3 bilhões, financiado por recursos do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS) e Fundo Clima. A iniciativa atenderá 49 municípios e sete estados, representando um avanço significativo no número de cidades interessadas na eletrificação de sua frota de ônibus urbanos, bem como na escala de eletrificação da frota nacional (Villen *et al.*, 2024). Além dessa, novas seleções estão previstas.

Oportunidades para a indústria brasileira

A indústria brasileira, com tradição nos setores energético, agrícola, automotivo e de serviços, tem historicamente respondido agilmente às demandas do transporte urbano, consolidando um mercado interno de ônibus e destacando-se nas exportações. No contexto da agenda de descarbonização do segmento de transportes públicos urbanos, o ingresso de novos fabricantes tende a reforçar esse padrão de resposta. Para tanto, é fundamental que políticas públicas eficazes e incentivos adequados sejam estabelecidos nos níveis federal, estadual e municipal, alinhando os interesses industriais às metas de sustentabilidade para a mobilidade urbana de forma estável e previsível.

O mercado doméstico de ônibus elétricos e híbridos com baterias apresenta importantes oportunidades e desafios. No que se refere às baterias, principal componente desses veículos, a indústria nacional atualmente se concentra na montagem de *battery packs* a partir de células

importadas. Embora haja iniciativas, como o projeto pré-industrial liderado pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) para produção doméstica de células de íon de lítio (Neves, 2024), não há previsão de domínio integral desse processo no curto prazo. O Brasil, no entanto, conta com uma diversidade geológica que o posiciona como um ator na produção de minerais para baterias. Para aproveitar essas oportunidades, é fundamental aumentar a cooperação entre agentes de mercado, identificar barreiras para investimentos e desenvolver políticas que reduzam desigualdades regulatórias e de acesso a capital. Os esforços governamentais que financiam a inovação e transição climática podem impulsionar ainda mais esses avanços (Dias; Silva, 2025).

Nesse sentido, o Serviço Geológico do Brasil (SGB) realiza estudos para atrair investimentos em minerais estratégicos (Brasil..., 2024). O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a Vale S.A., em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME), também estruturaram o Fundo de Investimento em Participações (FIP) Minerais Estratégicos para fomentar a produção de insumos essenciais, como lítio, terras raras, níquel e grafite¹⁰ (BNDES e Vale..., 2024). Adicionalmente, o BNDES flexibilizou sua política de conteúdo nacional para produtos vinculados à descarbonização, como ônibus eletrificados, baterias de íon de lítio e unidades de recarga, adotando índices menores de nacionalização, mas com metas crescentes para fortalecer as cadeias locais. Nesse contexto, constam atualmente cadastrados para serem adquiridos, por meio de financiamento do BNDES, 18 modelos de ônibus elétricos, envolvendo seis fabricantes instalados no Brasil.¹¹

¹⁰ O fundo reserva até R\$ 1 bilhão para investimentos em até vinte empresas de pequeno e médio porte que atuem na cadeia produtiva de minerais estratégicos. Desse montante, BNDES e Vale deverão aportar até R\$ 250 milhões cada, sendo o restante proveniente de investidores nacionais e internacionais.

¹¹ Consulta ao menu “Credenciamento FINAME” da página do Portal do Cliente do BNDES. Disponível em: https://web.bnDES.net/cfi_spa/item-financavel-busca. Acesso em: 8 jul. 2025.

A introdução de ônibus urbanos movidos a células de combustível de hidrogênio, por sua vez, representa uma oportunidade industrial, apesar dos desafios tecnológicos e da dependência de incentivos. O desenvolvimento de uma demanda local consistente por hidrogênio verde poderia reposicionar o Brasil como fornecedor relevante e impulsionar a criação de infraestrutura de abastecimento. Destaca-se o potencial da região Nordeste, que reúne condições favoráveis como ampla geração de energia renovável e polos industriais e logísticos preparados (BNDES, 2022).

Contudo, soluções tecnológicas disruptivas nem sempre são as mais adequadas isoladamente, conforme já visto. Tecnologias consolidadas, ou até mesmo aquelas em desuso, podem inspirar adaptações mais eficientes para o contexto local. O projeto do BRT-ABC, apoiado pelo BNDES com recursos do Fundo Clima, é um bom exemplo disso, além de ilustrar a capacidade da indústria nacional de responder a investimentos em mobilidade urbana sustentável.

Os biocombustíveis também seguem como importante vetor de descarbonização. A adoção de metas graduais de aumento da participação de combustíveis renováveis no *diesel* é uma estratégia compatível com os meios atualmente utilizados. Em razão do seu custo mais elevado em relação ao *biodiesel*, bem como da limitação técnica do uso deste último na mistura com o *diesel* fóssil, o avanço do uso do HVO no Brasil parece ainda depender da adoção de percentuais mais expressivos de combustíveis renováveis no *diesel* comercial do que os atuais. Esse cenário demandaria o desenvolvimento de uma cadeia de produção e distribuição de HVO, bem como a instituição de política pública para avaliar os impactos econômicos e sociais dessas transições. Tal como a indústria de *biodiesel*, o HVO pode fortalecer a indústria nacional, aproveitando tanto a capacidade brasileira de produzir matérias-primas,

como óleos vegetais e resíduos agrícolas, quanto a disponibilidade diferenciada de energia renovável.

A indústria automotiva nacional dispõe de grandes empresas com capacidade de investimento e exportação, boa gestão financeira, elevado faturamento, além de práticas modernas de produção (Plattek; Villarim; Cavalcanti, 2025). Está, portanto, preparada para acompanhar essas metas, com capacidade de produção de chassis e carrocerias eficientes, com plataformas elétricas, híbridas ou em conformidade com o padrão Euro VI, e já adaptadas para biometano e biocombustíveis líquidos.

Considerações finais

A transição para um transporte público de baixa emissão requer uma abordagem pragmática aliada a uma visão estratégica. Entre as várias rotas tecnológicas analisadas, os OEBs despontam como a solução com maior potencial de se consolidar, no longo prazo, como padrão dominante. Essa expectativa é reforçada pelo movimento da própria indústria automotiva, que tem direcionado crescentemente seus investimentos e inovações para a eletromobilidade.

Entretanto, tecnologias baseadas em biocombustíveis, como etanol, HVO e biometano, embora mais limitadas em seu potencial de transformação estrutural, podem desempenhar papel imediato, horizontal e, sobretudo, em nichos regionais ou como soluções de transição em locais onde a eletrificação completa seja inviável no curto prazo. Da mesma forma, veículos híbridos com fontes renováveis oferecem flexibilidade operacional e podem acelerar a substituição de frotas mais antigas.

Nesse cenário, é razoável que o país desenvolva e persiga uma estratégia nacional clara para a descarbonização do transporte público, assentada em aspectos como a sua posição destacada na produção de ônibus, a sua competência agrícola e de produção de insumos energéticos de base biológica e a sua matriz de geração elétrica relativamente limpa. Essa estratégia pode reconhecer a centralidade dos OEBs como principal agente de descarbonização no longo prazo, mas também identificar onde, como e quando outras tecnologias devem ser preferencialmente aplicadas.

A indústria brasileira, apoiada em sua tradição nos setores energético, agrícola e automotivo, tem capacidade para liderar a descarbonização do transporte público em qualquer das plataformas tecnológicas. O país detém riqueza mineral estratégica para fabricação de baterias e componentes elétricos, além de potencial para produção de biocombustíveis como *biodiesel* e HVO. Com políticas públicas de incentivo e financiamento, a indústria pode expandir a produção, inovar e ganhar competitividade global. O desenvolvimento de tecnologias emergentes, como hidrogênio verde, oferece oportunidades adicionais para diversificar e fortalecer a cadeia produtiva.

A adoção planejada e integrada das múltiplas soluções de descarbonização acelera a transição energética no transporte público urbano brasileiro, respeitando as especificidades locais. Além disso, conforme defendido pela NIB, essa abordagem também gera oportunidades para o desenvolvimento de competências tecnológicas diversificadas e para o adensamento de múltiplas cadeias produtivas, impulsionando a reindustrialização verde no país.

Referências

A HISTÓRIA de Werner von Siemens e suas principais invenções. *Blog com Ciência – Museu WEG de Ciência e Tecnologia*, Santa Catarina, 13 dez. 2020. Disponível em: <https://museuweg.net/blog/a-historia-de-werner-von-siemens-e-suas-principais-invencoes/>. Acesso em: 22 mai. 2025.

ALLAN, M.; TURNER, S.; EISENBERG, T. *De Santiago a Shenzhen: como os ônibus elétricos estão movendo as cidades*. Nova York: ITDP, 2022. Disponível em: https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2022/05/De-Santiago-a-Shenzhen-como-os-onibus-eletricos-estao-movendo-as-cidades_Completo.pdf. Acesso em: 21 mai. 2025.

ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Anuário Anfavea 2025: Indústria Automobilística Brasileira*. Brasília, DF: Anfavea, 2025. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/anuarios/>. Acesso em: 21 mai. 2025.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Nota Técnica 43/2018/SBQ/RJ. Alteração da Resolução ANP nº 30, de 23 de junho de 2016 [...]*. Rio de Janeiro: ANP, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cp-2-2018/nota_tec-43_2018-consol_sugest.pdf. Acesso em: 21 mai. 2025.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Informações sobre o levantamento de preços de combustíveis*. Rio de Janeiro: ANP, 21 out. 2020. Atualizado em: fev. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/informacoes-levantamento-de-precos-de-combustiveis>. Acesso em: 21 mai. 2025.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2024*. Rio de Janeiro: ANP, 30 jul. 2024. Seção 4: biocombustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/anuario/anuario-estatistico-2024-dados-abertos#Secao4>. Acesso em: 6 jun. 2025.

ÅSLUND, V.; PETTERSSON-LÖFSTEDT, F. Rationales for transitioning to electric buses in Swedish public transport. *Research in Transportation Economics*, Berlin, v. 100, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0739885923000483?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mai. 2025.

BAZANI, A. Trólebus completa 75 anos no Brasil com risco de acabar na capital paulista, mas com estimativas no ABC. *Diário do Transporte*, 21 abr. 2024. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2024/04/21/trolebus-completa-75-anos-nobrasil-com-risco-de-acabar-na-capital-paulista-mas-com-estimativas-no-abc/>. Acesso em: 21 mai. 2025.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Gás para o desenvolvimento*. Rio de Janeiro: BNDES, 2020. Disponível em: <http://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/19681>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa*. Rio de Janeiro: BNDES, 2022. Disponível em: https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22665/1/PRLiv_Hidrog%C3%A3Anio%20de%20baixo%20carbono_215712.pdf. Acesso em: 31 jul. 2025.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (coord.). *Bioethanol: fast track to mobility decarbonization: summary for policy makers*. Rio de Janeiro: BNDES, 2024. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/25507>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BNDES E VALE anunciam vencedor que vai gerir o fundo de minerais estratégicos. *Agência BNDES de Notícias*, Rio de Janeiro, 2 out. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.bnDES.gov.br/detalhe/noticia/BNDES-e-Vale-anunciam-vencedor-que-vai-gerir-o-fundo-de-minerais-estrategicos/>. Acesso em: 22 mai. 2025.

BNEF – BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. *Electric Vehicle Outlook 2024*. New York: BNEF, 2024.

BRASIL tem potencial para ampliar produção de lítio e 2% para 25%. *Agência Gov*, Rio de Janeiro, 4 jul. 2024. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202407/brasil-tem-potencial-para-ampliar-producao-de-litio-de-2-para-25-sgb>. Acesso em: 22 mai. 2025.

CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. *Panorama do biogás 2024*. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2024. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2025/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-2024.pdf>. Acesso em: 21 set. 2025.

CONTEMORI, L. Stellantis validates Factorial Energy solid-state battery cells. *Reuters*, London, 24 abr. 2025. Disponível em: <https://www.reuters.com/markets/commodities/stellantis-validates-factorial-energy-solid-state-battery-cells-2025-04-24/>. Acesso em: 27 mai. 2025.

COSTA, R. C.; BACELLAR, R. M. H. Descarbonização da matriz energética da Amazônia: análise de barreiras e oportunidades para biogás e biodiesel. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, v. 29, n. 58, p. 359-422, 2022. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/23088>. Acesso em: 31 jul. 2025.

COTTA, E. Com aumento da mistura no diesel, mais soja no tanque e menos nos navios em 2024. *AgFeed*, 28 dez. 2023. Disponível em: <https://agfeed.com.br/caminhos-do-agro/com-aumento-da-mistura-no-diesel-mais-soja-no-tanque-e-menos-nos-navios-em-2024>. Acesso em: 21 mai. 2025.

CHO, A.; KIM, H.; PARK, S. Resurgence of the hydrogen energy in South Korea's government strategies from 2005 to 2019. *International Journal of Hydrogen Energy*, Oxford, v. 65, p. 844-854, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319924013053?via%3Dihub>. Acesso em: 31 jul. 2025.

DE NEGRI, J. A. O custo de bem-estar do regime automotivo brasileiro. *Pesquisa e Planejamento Económico*, Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, p. 215-242, 1999. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/5032>. Acesso em: 31 jul. 2025.

DIAS, P. P.; SILVA, J. P. C. Oportunidades na cadeia de materiais minerais para baterias de veículos elétricos. In: MIGUEZ, T. (coord.). *Descarbonização dos transportes: perspectivas diante da transição energética*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2025. p. 69-91.

E-BUS RADAR. Ônibus elétricos América Latina. *E-bus Radar*, c2025. Disponível em: <https://www.ebusradar.org/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

ENTENDENDO o conceito “do Poço à Roda” no setor automotivo. *ABGI – Empresa do Grupo SNEF*, 17 jul. 2023. Disponível em: <https://abgi-brasil.com/o-conceito-do-poco-a-roda-e-a-importancia-na-nova-etapa-do-rota-2030/>. Acesso em: 14 mai. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional*: Relatório Síntese 2024. Brasília, DF: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_Síntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Resíduos rurais e o consumo de combustíveis: quanto é possível substituir de forma competitiva? Rio de Janeiro: EPE, jun. 2025a. (Fact Sheet SIEnergy – Biometano). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-372/topico-679/SEE_2025_FactSheet_SIEnergy_Biometano.pdf. Acesso em: 1 set. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Intensidade de carbono no transporte rodoviário*. Rio de Janeiro: EPE, jun. 2025b. Nota Técnica EPE-DPG-SDB-2025/03. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/topico-770/NT-EPE-DPG-SDB-2025-03_Intensidade_de_Carbono_Transporte_Rodoviário.pdf. Acesso em: 30 jun. 2025.

ESPECIALISTAS debatem o uso do biometano como alternativa ao diesel no transporte público. *Portal da Prefeitura de São Paulo*, São Paulo, 25 mar. 2025. Disponível em: <https://capital.sp.gov.br/w/especialistas-debatem-o-uso-do-biometano-como-alternativa-ao-diesel-no-transporte-público>. Acesso em: 9 jun. 2025.

FENABRAVE – FEDERAÇÃO NACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Anuário 2024 Fenabrade: o desempenho da distribuição automotiva no Brasil*. São Paulo: Fenabrade, 2024. Disponível em: <https://www.fenabrade.org.br/anuarios/Anuário2024.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2025.

GAMA, M. USP testa hidrogênio de etanol em ônibus e carros. *Poder360*, Brasília, DF, 10 mar. 2025. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/opiniao/usp-testa-hidrogenio-de-etanol-em-onibus-e-carros/>. Acesso em: 22 mai. 2025.

GOVERNMENT OF KOREA. *Hydrogen Economy Roadmap*. Seoul: Government of Korea, 2019. Disponível em: https://h2council.com.au/wp-content/uploads/2022/10/KOR-Hydrogen-Economy-Roadmap-of-Korea_REV-Jan19.pdf. Acesso em: 20 mai. 2025.

HVO custa mais de R\$ 9 por litro. *Fecomcombustíveis – Federação Nacional do Comércio de Combustíveis e de Lubrificantes*, Rio de Janeiro, 29 jul. 2021. Disponível em: <https://www.fecomcombustiveis.org.br/noticia/hvo-custa-mais-de-r-9-por-litro/247175>. Acesso em: 21 mai. 2025.

HYNES, M.; LEMONS, K. *Zeroing in on Zero-Emission Buses: The U.S. Advanced Technology Transit Bus Index*. Pasadena: CALSTART, 2025. Disponível em: https://calstart.org/wp-content/uploads/2025/03/20250305-ZIO-ZEB-March-2025_Final.pdf. Acesso em: 21 mai. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2025: Trends and developments in electric vehicle markets*. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0aa4762f-c1cb-4495-987a-25945d6de5e8/GlobalEVOOutlook2025.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

JEFFERS, M. et al. Comprehensive Review of California's Innovative Clean Transit Regulation: Phase I Summary Report. *National Renewable Energy Laboratory*, Golden, 2022. Disponível em: <https://research-hub.nrel.gov/en/publications/comprehensive-review-of-californiaaposs-innovative-clean-transit->. Acesso em: 21 mai. 2025.

KLACKENBERG, L. *Biomethane in Sweden – Market overview and policies*. Stockholm: Energigas Sverige, 2024. Disponível em: <https://www.energigas.se/Media/1ernoznh/biomethane-in-sweden-240327.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2025.

LASCALA, T. L. S. *Externalidades da substituição do diesel pelo etanol no transporte público urbano da Região Metropolitana de São Paulo*. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10082011-113457/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LEMOS, G. L.; CARDOSO, M. F. O.; COSTA, H. K. M. Biogás e biometano no Brasil: panorama e perspectivas. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, Curitiba, v. 63, p. 464-485, jan./jun. 2024. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2025/03/andriguettofilhoLemos_PT_RAEI.pdf>. Acesso em: 1 set. 2025.

LIU, X. et al. Life cycle greenhouse gas emissions of Brazilian sugar cane ethanol evaluated with the GREET model using data submitted to RenovaBio. *Environmental Science & Technology*, Washington, DC, v. 57, n. 32, p. 11814-11822, 2023. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10433513/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

MISSÃO 5 da Nova Indústria Brasil destina R\$ 468,38 bi, entre recursos públicos e privados, para bioeconomia e descarbonização. *Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços*, Brasília, DF, 12 dez. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/dezembro/missao-5-da-nova-industria-brasil-destina-r-468-38-bi-entre-recursos-publicos-e-privados-para-bioeconomia-e-descarbonizacao/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

MELLONI, E. O etanol ganha status global para a mobilidade elétrica net zero. *Brasil Energia*, Rio de Janeiro, 26 fev. 2025. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br/brasilenergia/acoes-em-transicao-energetica/o-etanol-ganha-status-global-para-a-mobilidade-eletrica-net-zero>. Acesso em: 22 mai. 2025.

MILANEZ, A. Y. et al. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-275, mar. 2018. Disponível em: <http://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15384>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MILANEZ, A. Y. et al. Biocombustíveis de aviação no Brasil: uma agenda de sustentabilidade. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 361-398, dez. 2021. Disponível em: https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/22048?&locale=pt_BR. Acesso em: 31 jul. 2025.

MILANEZ, A. Y. et al. Biodiesel e diesel verde no Brasil: panorama recente e perspectivas. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 41-71, set. 2022. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/22585>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MOVER: Programa de Mobilidade Verde é lançado. *Casa Civil*, Brasília, DF, 30 dez. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/12/mover-novo-programa-amplia-acoes-para-mobilidade-verde-e-descarbonizacao>. Acesso em: 14 mai. 2025.

NEVES, L. Fabricação de baterias de lítio no Brasil pode ser incentivada com nova política. *pv magazine*, 23 fev. 2024. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2024/02/23/fabricacao-de-baterias-de-litio-no-brasil-pode-ser-incentivada-com-nova-politica/>. Acesso em: 21 mai. 2025.

NTU – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. *Anuário NTU 2023-2024*. Brasília, DF: NTU, 2024. Disponível em: <https://ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638573500081945042.pdf>.

NYLUND, N. et al. *Optimized usage of NExBTL renewable diesel fuel OPTIBIO*. Espoo: VTT Tiedotteita, 2011. Disponível em: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2011/T2604.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2025

NYLUND, N. et al. On route to clean bus services. In: TRANSPORT RESEARCH ARENA (TRA2020), 8, 2020. *Proceedings [...]*. Helsinki: Liikenne-ja viestintävirasto Traficom, 2020. Disponível em: https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/33906793/On_route_to_clean.pdf. Acesso em: 31 jul. 2025.

OGNISSANTO, F.; JONES, M. *Low Emission Bus Scheme Monitoring Programme*: Final report. London: TRL, 2023. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/646f304c24315700136f4228/lebs-monitoring-report.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ONSTAD, E. Battery maker Blue Solutions plans 2-billion-euro gigafactory in France. *Reuters*, London, 28 mai. 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/battery-maker-blue-solutions-plans-2-billion-euro-gigafactory-france-2024-05-28/>. Acesso em: 27 mai. 2025.

OTTOSSON, M.; DANELL, J. Categorization, identification, and analysis of barriers to market growth in biogas solutions – The case of Sweden. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 476, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624032086?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mai. 2025.

PARK, J.; KIM, C. Current challenges to achieving mass-market hydrogen mobility from the perspective of early adopters in South Korea. *Sustainability*, Basel, v. 17, n. 6, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/3221914>. Acesso em: 31 jul. 2025.

PLATTEK, B.; VILLARIM, P. R.; CAVALCANTI, C. E. S. A descarbonização do setor automotivo como uma oportunidade para a engenharia automotiva brasileira. In: MIGUEZ, T. (coord.). *Descarbonização dos transportes: perspectivas diante da transição energética*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2025. p. 41-68. Disponível em: <http://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/27347>. Acesso em: 31 jul. 2025

PRESIDENTE sanciona lei do Programa Mover. *Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços*, Brasília, DF, 27 jun. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/junho/presidente-sanciona-lei-do-programa-mover>. Acesso em: 14 mai. 2025.

PRODUÇÃO brasileira superou marca dos 9 milhões de m³ em 2024. *BiodieselBR*, 28 jan. 2025. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/producao/producao-brasileira-superou-marcas-dos-9-milhoes-de-m3-em-2024-280125>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SANTOS, C. A. L. Baterias de íons lítio para veículos elétricos. *Revista IPT: Tecnologia e Inovação*, São Paulo, v. 5, n. 17, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/71/81>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. SEEG, c2025. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em 2 set. 2025.

SOLEIMANI, A. et al. Progress in hydrogen fuel cell vehicles and up-and-coming technologies for eco-friendly transportation: an international assessment. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, v. 7, p. 3153-3172, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41939-024-00482-8>. Acesso em: 1 jul. 2025.

VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 41, p. 295-344, mar. 2015. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4284>. Acesso em: 31 jul. 2025.

VILLEN, F. B. et al. Impulso à adoção de ônibus elétricos no Brasil. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 30, n. 58, p. 57-96, set. 2024. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/26107>. Acesso em: 31 jul. 2025.

VOURLIOTAKIS, G.; PLATSAKIS, O. *Greenhouse gas intensities of transport fuels in the EU in 2021*. Copenhagen: European Environment Agency, 2023. ETC-CM Report 2023/03. Disponível em: https://www.eionet.europa.eu/etc5/etc-cm/products/greenhouse-gas-intensities-of-transport-fuels-in-the-eu-in-2021/%40%40download/file/2023-03_3.pdf. Acesso em: 11 jun. 2025.

COMPUTATIONAL INFRASTRUCTURE FOR THE AI ERA: CHALLENGES, POLICIES, AND OPPORTUNITIES IN DATA CENTERS IN BRAZIL

*Marconi Edson Ferreira Viana
Otávio Frederico da Costa Roma Scheidegger**

Keywords: data centers; artificial intelligence; industrial policy; energy efficiency; connectivity; backhaul; Fust.

* Respectively, manager and systems analyst of the Information Technology, Telecommunications, and Creative Economy Industries Department of the BNDES's Productive Development and Innovation Division.

Resumo

O artigo analisa o papel estratégico dos *data centers* na transformação digital e na política industrial brasileira. A difusão da inteligência artificial generativa elevou de forma acelerada os requisitos de computação e energia no mundo. A matriz elétrica majoritariamente renovável posiciona o Brasil de forma favorável, mas a expansão ainda é limitada por gargalos de conectividade de longa distância e escassez de mão de obra especializada. O texto caracteriza o cenário doméstico com base em capacidade instalada, projetos em desenvolvimento, modelos operacionais e níveis de disponibilidade, destacando determinantes de despesas de capital (Capex) e despesas operacionais (Opex) e a dependência de importações. São discutidos os entraves técnicos, os instrumentos públicos de indução, os incentivos subnacionais e a governança ambiental baseada em métricas de eficiência. Essas medidas são apresentadas como essenciais para consolidar o Brasil como *hub* regional de infraestrutura computacional de baixo carbono.

Abstract

This article looks at the key role of data centers in Brazil's digital growth and industrial policy. The fast spread of generative artificial intelligence has boosted global needs for computing power and energy. Brazil's largely renewable electricity system offers a comparative advantage; however, expansion is challenged by long-distance connectivity constraints and a limited pool of qualified professionals. The study presents the domestic context in terms of installed capacity, ongoing projects, operational models, and availability categories, emphasizing factors related to capital expenditures (CAPEX), operational expenditures (OPEX), and import reliance. It evaluates technical challenges, public policy instruments, regional incentives, and environmental governance rooted in efficiency standards. These approaches are positioned as central to establishing Brazil as a regional leader in low-carbon computing infrastructure.

Introdução

A transformação digital da indústria é um dos pilares centrais da política industrial brasileira para a década de 2020. Inserida na Missão 4 da Nova Indústria Brasil (NIB), essa agenda mobiliza instrumentos públicos e privados para modernizar processos produtivos, promover a integração de tecnologias emergentes e impulsionar a competitividade sistêmica do setor industrial nacional (Brasil, 2024).

Nesse contexto, a crescente adoção de inteligência artificial (IA) se apresenta como um novo vetor estratégico de inovação, reorganizando cadeias produtivas, modos de gestão e relações de trabalho. O avanço da IA, sobretudo com a popularização de modelos fundacionais de grande escala, como os modelos generativos de linguagem, tem gerado uma demanda cada vez mais expressiva por infraestrutura computacional de alta *performance*, com impactos significativos sobre toda a cadeia produtiva do país. No plano federal, essa agenda conecta-se às diretrizes do Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (PBIA), publicado em 2025 pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), que define metas e arranjos de governança para o uso ético, seguro e sustentável da IA no Brasil (Brasil, 2025). Diante desse cenário, segundo estimativas da International Energy Agency (IEA), o consumo energético associado a *data centers* e redes de IA em 2026 deverá ser o dobro do observado em 2022, impulsionado principalmente pelo crescimento exponencial de aplicações baseadas em IA generativa (IEA, 2024).

No Brasil, esse fenômeno assume contornos específicos. Por um lado, o país conta com uma matriz elétrica majoritariamente renovável, composta por mais de 80% de fontes como hidrelétrica, eólica, solar

e biomassa (EPE, 2025), o que caracteriza o território nacional como um ambiente promissor para a instalação de *data centers* sustentáveis, em consonância com as metas globais de descarbonização. Por outro lado, ainda há desafios relevantes para a expansão dessa infraestrutura, como a concentração geográfica da conectividade de alta capacidade, a escassez de mão de obra especializada e a ausência de um marco regulatório específico para o setor.

Parte-se da hipótese de que os *data centers* especializados em cargas de trabalho em IA se tornarão elementos centrais da infraestrutura industrial do século XXI, ao mesmo tempo que os *data centers* voltados a cargas de trabalho tradicionais (*general-purpose workloads*, responsáveis pelo armazenamento e processamento generalista de dados) serão pressionados por uma demanda crescente, ambos desempenhando papel estratégico na transição digital e energética do Brasil. O objetivo deste estudo é compreender como essa infraestrutura crítica pode ser expandida de forma sustentável e integrada aos objetivos de política industrial da NIB, destacando tanto os fatores tecnológicos e econômicos envolvidos quanto os instrumentos públicos de apoio e regulação.

Para isso, este artigo está organizado da seguinte forma: após esta introdução, a segunda seção apresenta os principais vetores da demanda computacional e energética gerada pela IA; a terceira descreve o panorama atual da infraestrutura de *data centers* no Brasil, incluindo capacidades instaladas e tendências de expansão; a quarta discute os desafios estruturais enfrentados pelo setor; a quinta trata das políticas públicas, marcos regulatórios e aspectos de sustentabilidade; e a última seção oferece considerações finais com propostas de ação para o fortalecimento da infraestrutura computacional nacional.

A demanda computacional e energética da IA

O lançamento do ChatGPT, no fim de 2022, marcou o início de uma nova fase da IA generativa, popularizando modelos fundacionais treinados com bilhões de parâmetros e grandes volumes de dados. Em menos de dois anos, arquiteturas multimodais capazes de processar texto, imagem, áudio e vídeo – como o Gemini e o Claude, além do próprio ChatGPT – consolidaram um novo patamar de capacidade computacional ao alcance do público. Cada salto de geração vem acompanhado de aumentos significativos nos requisitos de *hardware*: clusters de treinamento reúnem dezenas de milhares de *graphics processing unit* (GPU)¹ ou aceleradores específicos, interligados por redes de alta velocidade, para sustentar volumes de dados que ultrapassam a casa dos *petabytes*.

Esse avanço estimulou diferentes países a desenvolverem modelos fundacionais em língua nativa, buscando reduzir a dependência de tecnologias externas, além de atender a especificidades culturais, setoriais e/ou regulatórias. No Brasil, iniciativas como o modelo Sabiá, desenvolvido pela empresa Maritaca AI e treinado integralmente em português brasileiro, e o projeto Gaia, que reúne grandes conjuntos de textos de diferentes países lusófonos, ilustram a popularização do desenvolvimento de IA local e reforçam a tendência à descentralização da pesquisa.

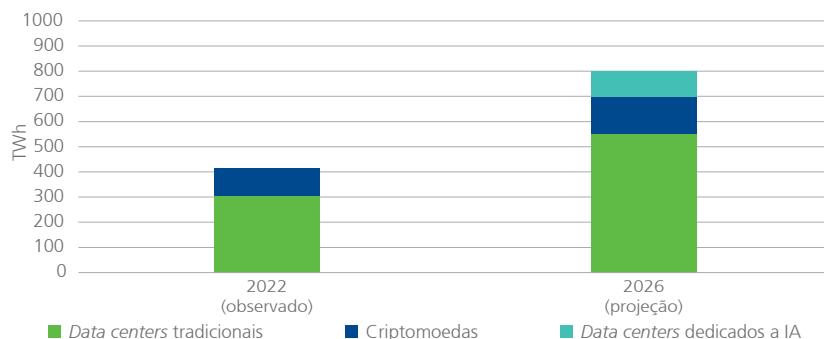
A expansão e a popularização desses sistemas elevam a demanda por poder computacional em três frentes principais: treinamento, inferência e armazenamento. O treinamento inicial demanda o trabalho simultâneo

¹ Processador originalmente projetado para operações gráficas, mas que se tornou essencial para cargas de trabalho de IA devido à sua capacidade de realizar cálculos paralelos em grande escala.

de grandes quantidades de processadores gráficos, enquanto a inferência, fase de uso do modelo, precisa responder quase instantaneamente a milhões de consultas diárias. O armazenamento, por sua vez, refere-se ao arquivamento de volumes imensos de dados, além de versões e registros que garantem integridade e conformidade. Cada estágio impõe diferentes perfis de carga aos *data centers* e pressiona tanto a capacidade de processamento quanto a infraestrutura de resfriamento e energia (IEA, 2025).

Nesse contexto, os investimentos globais em *data centers* quase dobraram desde 2022, ano de lançamento do ChatGPT, alcançando cerca de US\$ 455 bilhões em 2024 (Data..., 2025), quando essas instalações consumiram aproximadamente 415 TWh de eletricidade (1,5% da demanda mundial), com forte concentração nos Estados Unidos da América (EUA) (45%), China (25%) e Europa (15%). Desde 2017, esse consumo cresce em torno de 12% ao ano, ritmo mais de quatro vezes superior ao aumento do uso global de eletricidade (IEA, 2025). A IEA projeta que em 2026 o consumo total subirá para 820 TWh, impulsionado pelo avanço do consumo dos centros tradicionais para 570 TWh, da mineração de criptomoedas para 150 TWh e pela entrada de cerca de 100 TWh provenientes de *data centers* dedicados exclusivamente a aplicações de IA (IEA, 2024), conforme Gráfico 1.

Gráfico 1 | Demanda global de eletricidade de *data centers*

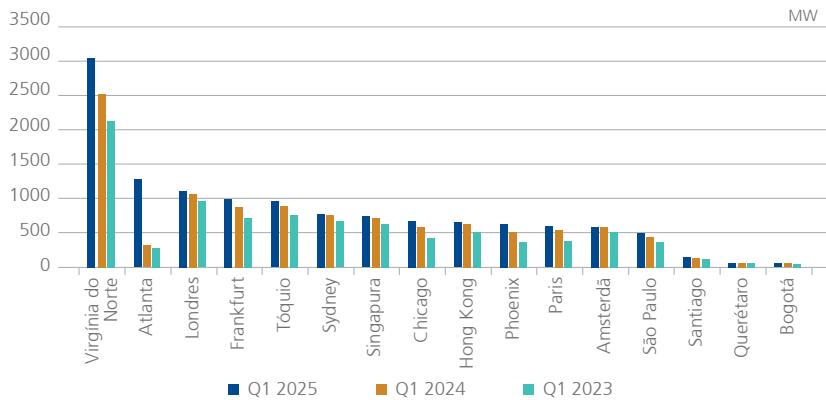


Fonte: Adaptado de IEA (2024).

A IEA projeta que, impulsionada sobretudo por cargas de IA, a demanda dos *data centers* por eletricidade mais que dobrará até 2030, atingindo cerca de 945 TWh, cifra ligeiramente superior ao consumo total atual do Japão. Somente nos EUA, o setor responderá por quase metade da expansão da demanda elétrica até o fim da década, passando a consumir mais do que a soma das indústrias de alumínio, aço, cimento, químicos e demais segmentos intensivos em energia (IEA, 2025).

Diante desse cenário, algumas análises de mercado já identificam o Brasil como um dos destinos mais promissores para *data centers* de alta densidade. O relatório *Global Data Center Trends 2025*, da Coldwell Banker Richard Ellis (CBRE), indica que a expansão do inventário latino-americano foi puxada principalmente por novos projetos em território brasileiro, contribuindo para um crescimento regional de 15% em 2024 (Global..., 2025). São Paulo é, de longe, o maior mercado da região, com 493 MW de capacidade instalada, seguido por Santiago, com 148 MW. Todavia, a América Latina não figura entre os dez maiores mercados mundiais em termos de oferta, estando aquém de centros globais como Tóquio (949 MW), Frankfurt (994 MW) e Londres (1104 MW), além dos grandes polos estadunidenses de Atlanta (1.279 MW) e Virgínia do Norte (3.046 MW). Ainda assim, São Paulo apresenta uma oferta comparável à de importantes centros europeus, como Paris (581 MW) e Amsterdã (569 MW), consolidando-se como o principal mercado da América Latina (Gráfico 2).

Gráfico 2 | Inventário de *data centers* por mercado



Fonte: Adaptado de Global... (2025).

Panorama da infraestrutura de *data centers* no Brasil

Antes de abordar o panorama da infraestrutura de *data centers* no Brasil, faz-se necessário esclarecer algumas distinções fundamentais entre os diferentes modelos e classificações desse tipo de instalação.

Do ponto de vista operacional, os *data centers* podem ser organizados em três formatos principais. No modelo *on-premise*, a própria empresa usuária é responsável pela instalação e operação da infraestrutura, geralmente em escala reduzida e voltada a necessidades internas. Já os *data centers* de *colocation* oferecem espaço, energia, refrigeração e conectividade para que diferentes clientes aloquem seus equipamentos em ambiente compartilhado e gerenciado por um operador especializado. Por fim, os *data centers hyperscale* são grandes instalações dedicadas a empresas de tecnologia que prestam serviços em nuvem

e plataformas digitais com alta demanda de processamento, como Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure e Google Cloud. Esses modelos atendem a perfis distintos de usuários e coexistem no ecossistema digital nacional e internacional.

Outro critério relevante para qualificar a infraestrutura diz respeito à classificação de disponibilidade de um *data center*, estabelecida pelo Uptime Institute por meio da escala Tier. O Tier I representa o nível mais simples, com infraestrutura básica e sem redundância significativa. O Tier II acrescenta alguma redundância em componentes críticos, enquanto o Tier III permite manutenção simultânea de sistemas essenciais sem interrupção dos serviços. O Tier IV, por sua vez, oferece o mais alto grau de resiliência, com redundância completa e a mais baixa tolerância a falhas. Segundo relatório da Mordor Intelligence (2024), os Tier III são os *data centers* mais comuns no Brasil, e o número de novas certificações Tier IV segue limitado, consolidando o Tier III como a principal referência técnica de alta disponibilidade no mercado brasileiro.

Segundo estudo da Brasscom (2024), a construção de um *data center* Tier III de 5 MW no Brasil exigia, em 2021, investimento estimado em R\$ 266 milhões, dos quais 62% eram destinados exclusivamente à aquisição de equipamentos de tecnologia da informação (TI), como servidores e sistemas de armazenamento (Gráfico 3). Como apontam a própria Associação das Empresas de Tecnologia da Informação e Comunicação e de Tecnologias Digitais (Brasscom, 2024) e a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2023), esses equipamentos são em sua maioria de origem estrangeira, equivalendo a algo em torno de 85% do desembolso total vinculado a bens ou serviços importados, o que torna os projetos altamente vulneráveis à variação cambial, aos encargos de importação e aos prazos aduaneiros, além de limitar o acesso a mecanismos públicos de financiamento que priorizam conteúdo nacional.

Gráfico 3 | Capex aproximado de um *data center* Tier III de 5 MW no Brasil



Fonte: Adaptado de Brasscom (2024).

Outros custos relevantes concentram-se em energia e refrigeração (17%) e na edificação e obras civis (15%), enquanto telecomunicações respondem por apenas 6% das despesas de capital (Capex).

No âmbito operacional, o mesmo estudo estima despesas operacionais (Opex) de cerca de R\$ 3,7 milhões por mês, dos quais entre 40% e 60% correspondem à conta de energia elétrica, evidenciando que, além do custo inicial elevado, a sustentabilidade financeira dos empreendimentos depende diretamente da confiabilidade do fornecimento de energia e de práticas avançadas de eficiência energética (Brasscom, 2024).

Em 2025, a infraestrutura de *data centers* no país atingiu cerca de 700 MW de capacidade instalada, distribuída por aproximadamente 80 instalações comerciais, com previsão de acrescentar ao menos 1.800 MW até 2029 graças a projetos já anunciados em Paulínia, Rio de Janeiro, Fortaleza, Porto Alegre e São Paulo (Research and Markets, 2025), que concentra o maior volume (493 MW) e segue como *hub* dominante para cargas *hyperscale* na região (Global..., 2025), conforme Figura 1.

Figura 1 | Distribuição de *data centers* pelo território brasileiro

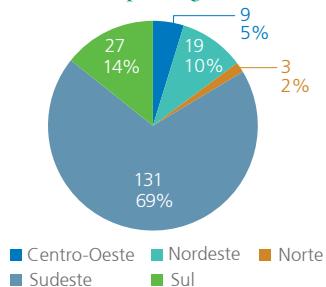


Fonte: Adaptado de Data Center Map. Disponível em: <https://www.datacentermap.com/brazil/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

Nota: O Data Center Map lista *data centers* destinados a serviços de *cocreation* e/ou nuvem. Incluem também mineradores de criptomoedas e operadores de *hyperscale* (incluindo as *big techs*). Não são incluídos *data centers* corporativos, nem *data centers* governamentais. Os números dentro dos círculos indicam a quantidade de *data centers* na região. O tamanho de cada círculo é proporcional ao número.

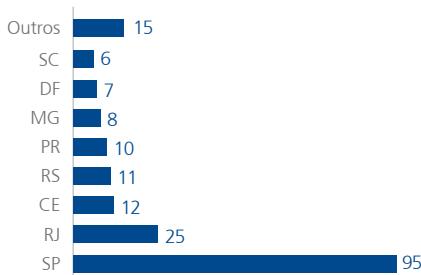
Ao concentrar a maior parte dessa infraestrutura, o estado oferece ganhos de escala e interconexão para atender à expansão de cargas em nuvem e aplicações de IA. Porém, tais vantagens são contrabalançadas por limitações na oferta de energia e pelos altos custos imobiliários decorrentes da escassez relativa de terrenos adequados em municípios como Barueri e Osasco, fatores que dificultam novos empreendimentos de grande porte (Global..., 2025), conforme gráficos 4a e 4b.

Gráfico 4a | Concentração de data centers por região



Fonte: Adaptado de Moody's Local Brasil (2025).

Gráfico 4b | Concentração de data centers por estado



Fonte: Adaptado de Moody's Local Brasil (2025).

O elevado investimento de capital e a necessidade de proximidade dos grandes centros consumidores explicam a concentração de *data centers* no Sudeste: construir um empreendimento desse tipo no Brasil requer, em média, investimento de R\$ 53,2 milhões por megawatt, bem acima dos custos estimados para Chile (R\$ 39 milhões/MW) e Argentina (R\$ 25 milhões/MW), o que favorece estados com maior oferta de financiamento e serviços financeiros (ABDI, 2023). Além disso, a maior parte da demanda corporativa nacional por banda larga e serviços de nuvem concentra-se no eixo Rio-São Paulo. Essa região também apresenta a maior concentração de infraestrutura de *backbone*,² bem como pontos de troca de tráfego (PTT)³ com maior número de provedores conectados, proporcionando alta disponibilidade dos principais provedores de nuvem, fatores que reduzem latência,⁴ custos de interconexão e reforçam a dinâmica de aglomeração nessa área.

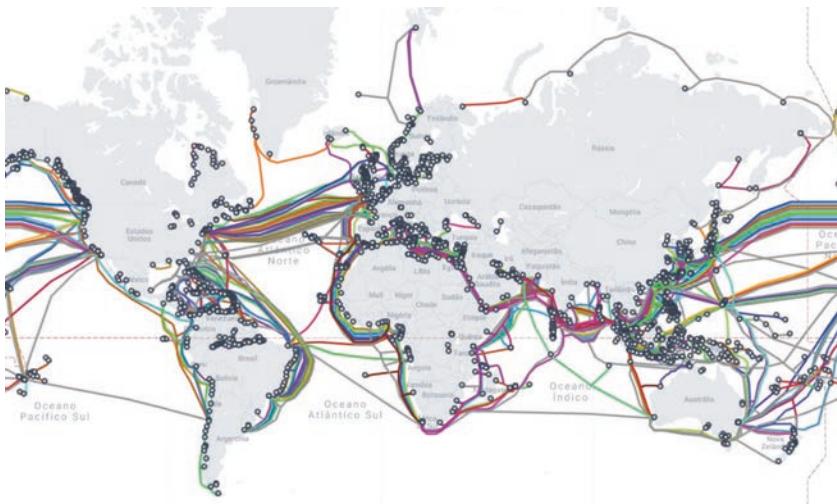
2 É o núcleo de uma rede de telecomunicações que frequentemente utiliza roteadores e *switches* de alta capacidade de transmissão, provendo conectividade em alta velocidade e transporte de dados dentro de uma rede ou entre redes.

3 PTTs são instalações privadas onde há grandes provedores que podem se conectar entre si, dividindo os custos envolvidos entre todos os usuários, encurtando o caminho até um determinado destino e aumentando a resiliência da rede como um todo.

4 Latência se refere ao tempo de resposta entre o envio de um pacote de dados e o recebimento de sua confirmação no destino.

Outras capitais também vêm ganhando relevância nesse ecossistema. Brasília destaca-se pela presença de *data centers* de *colocation* voltados a atender órgãos governamentais e a demanda por baixa latência em aplicações críticas. Já Fortaleza consolidou-se como *hub* estratégico de conectividade internacional, uma vez que concentra a principal chegada de cabos submarinos do país, o que a torna um ponto de interconexão privilegiado para o tráfego global de dados. A localização dos cabos submarinos, nesse contexto, configura-se um diferencial geopolítico significativo na alocação de investimentos em *data centers*, representando uma vantagem competitiva para determinadas regiões em virtude da infraestrutura instalada. A Figura 2 apresenta a malha de cabos submarinos atual.

Figura 2 | Malha de cabos submarinos



Fonte: Submarine Cable Map. Disponível em: <https://www.submarinecablemap.com>. Acesso em: 22 jul. 2025.

No recorte por tipo de instalação, a maior parte do novo *pipeline* brasileiro está associada a *data centers* de *colocation*, operados por empresas como Equinix, Odata e Ascenty, que atendem desde clientes corporativos até grandes provedores globais de nuvem. Nesse cenário,

os chamados *hyperscales* correspondem sobretudo à demanda contratada pelas *big techs* (AWS, Google, Microsoft), que podem tanto utilizar infraestrutura de terceiros quanto desenvolver instalações próprias. Já a computação de borda (*edge computing*) avança por meio de módulos menores implantados próximos a torres de telecomunicações, voltados à redução da latência em serviços críticos.

Nesse contexto, a computação de borda se apresenta como uma solução para descentralizar o processamento e aproximar a capacidade computacional dos pontos de geração de dados, e começa a atender casos de uso fora dos grandes centros: no agronegócio, sensores e câmeras em fazendas transmitem dados para micro *data centers* instalados em silos ou torres de comunicação, reduzindo a latência de análises de solo e climatologia; na saúde, hospitais em cidades de médio porte utilizam inferência local para exames de imagem; e programas-piloto de cidades inteligentes em Curitiba e Salvador testam processamento distribuído para controle de tráfego e iluminação pública.

Desafios estruturais para o crescimento do setor: conectividade e *backhaul* nacional

Antes de discutir os entraves específicos à expansão da infraestrutura de *data centers* no Brasil, é importante considerar os fatores estruturais que condicionam o funcionamento e a localização desses empreendimentos. A operação eficiente de um *data center* depende de um conjunto de variáveis técnicas e estratégicas que envolvem, entre outros aspectos, a proximidade com as redes de fibra óptica de alta capacidade e pontos

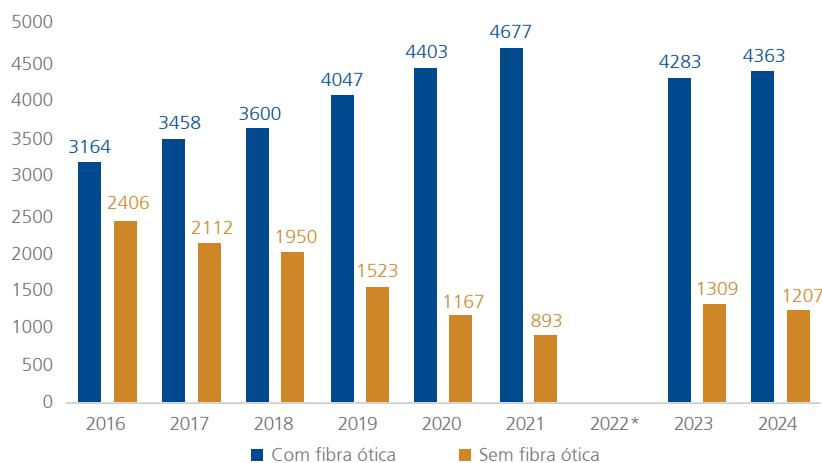
de interconexão, elementos que garantem elevada disponibilidade de dados. Em paralelo, a latência das conexões assume papel decisivo: telemedicina, jogos *on-line*, *streaming* interativo, sistemas de IA baseados em nuvem e aplicações que demandem replicação síncrona de dados exigem proximidade física entre o *data center* e o usuário final para assegurar tempo de resposta mínimo e qualidade de serviço.

Além dessas exigências técnicas, outros critérios estruturais influenciam a viabilidade dos projetos. A disponibilidade de infraestrutura elétrica e hídrica confiável é indispensável, com destaque para a crescente valorização de fontes de energia renovável diante da alta demanda energética desses ativos. A gestão de riscos também orienta decisões de localização, sendo preferíveis regiões de baixa incidência de desastres naturais que possam comprometer a continuidade operacional. Por fim, marcos regulatórios estáveis e incentivos fiscais consistentes são fatores de atração para investidores, considerando os altos custos fixos e a baixa mobilidade desses empreendimentos após instalados (Moody's Local Brasil, 2025).

O ritmo de expansão dos *data centers* no Brasil passa por um conjunto de restrições que vão além do investimento em capacidade bruta. A primeira delas é a conectividade de longa distância: embora os novos cabos submarinos que aportam em Fortaleza garantam ligação direta com os EUA, Europa e África, grande parte do tráfego nacional ainda percorre rotas terrestres concentradas no eixo Sudeste-Nordeste, gerando assimetrias relevantes de latência e custo. Fora desse corredor, as redes de fibra óptica de alta capacidade se tornam menos acessíveis, sobretudo no Centro-Oeste e no Norte, elevando o preço de trânsito de dados para plataformas de vídeo, aplicações em nuvem e soluções de IA que exigem resposta em tempo real (Brasscom, 2024).

A escassez de rotas redundantes e *backbones* regionais de alta capacidade compromete não apenas a resiliência dos serviços, mas também a expansão de modelos distribuídos de computação, como a inferência local de modelos de IA e a computação de borda. Segundo dados do Plano Estrutural de Redes de Telecomunicações (PERT), publicado pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) em 2025, cerca de 27% dos municípios brasileiros ainda não estão conectados a redes de transporte de alta capacidade, enquanto 43% contam com apenas um provedor de *backhaul* óptico⁵ – um indicador preocupante para a expansão de serviços que exigem baixa latência e alta disponibilidade (Anatel, 2025), como mostra o Gráfico 5.

Gráfico 5 | Evolução dos municípios brasileiros atendidos com *backhaul* com fibra óptica



Fonte: Adaptado de Plano... (2025).

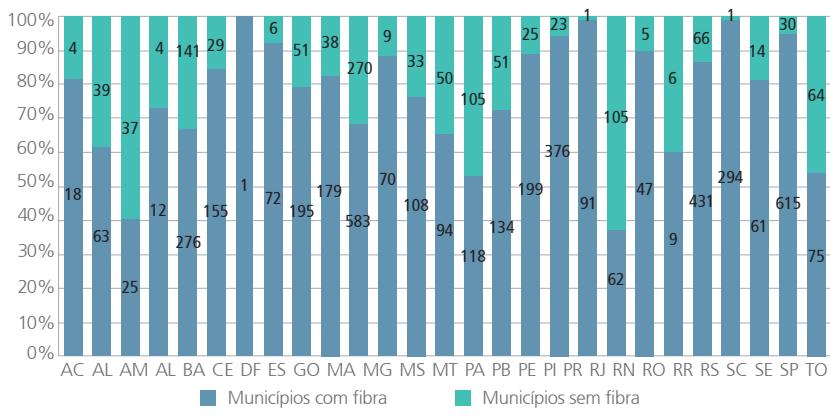
* Não houve coleta de dados em 2022.

⁵ *Backhaul* é parte da infraestrutura de telecomunicações responsável por conectar redes de acesso (como antenas de celular, redes wi-fi, ou pequenas redes locais) ao núcleo da rede (*core network*). Nesse caso, é referido como óptico porque a conexão é feita por meio de fibras ópticas.

A interiorização da infraestrutura de telecomunicações depende, em grande medida, de políticas públicas e instrumentos de financiamento que viabilizem o investimento em áreas menos atrativas do ponto de vista comercial. A fragmentação do *backbone* nacional é agravada pela baixa interoperabilidade entre redes de transporte regionais, pela ausência de PTTs em regiões estratégicas e pela concentração das principais rotas em eixos saturados.

O PERT revela que, apesar da ampla cobertura nacional de *backhaul* em fibra óptica, persistem desigualdades regionais significativas. Em 2024, a infraestrutura de *backhaul* em fibra óptica alcançava 76,5% dos municípios brasileiros, abrangendo 94,3% da população residente e sustentando 98,2% dos acessos ativos de Serviço de Comunicação Multimídia (SCM) (Anatel, 2025). Contudo, a desagregação por unidade da Federação (UF), conforme observado no Gráfico 6, revela que os estados das regiões Norte e Nordeste concentram a maior proporção de municípios ainda não contemplados por essa infraestrutura. Tal disparidade configura um vetor persistente da desigualdade digital, uma vez que a presença de fibra óptica no *backhaul* é determinante para a qualidade do serviço, refletindo-se em maior velocidade média de conexão e densidade superior de acessos nas localidades atendidas.

Gráfico 6 | Distribuição dos municípios atendidos com *backhaul* de fibra óptica por UF



Fonte: Adaptado de Anatel (2025).

Mesmo nos estados com maior densidade de fibra óptica, como São Paulo, a competição entre provedores e a existência de redes neutras de alta capacidade ainda são limitadas a áreas urbanas densas, o que se reflete na baixa resiliência de aplicações empresariais críticas, que demandam redundância de rotas, múltiplos fornecedores e integração direta com pontos de interconexão globais. Essa limitação impacta diretamente o custo operacional de *data centers* em regiões periféricas, reduzindo sua atratividade e capacidade de evoluir para aplicações mais intensivas em dados, como os modelos de IA generativa.

Nesse contexto, o Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações (Fust) desempenha papel estratégico. Criado pela Lei 9.998, de 17 de agosto de 2000, o fundo tem como objetivo financeiar a expansão, o uso e a melhoria dos serviços de telecomunicações em áreas e populações não atendidas ou atendidas de forma precária. Historicamente subutilizado, o fundo teve seu escopo de atuação ampliado a partir da Lei 14.109, de 16 de dezembro de 2020, que autorizou o uso de recursos para projetos em regime privado, o que abriu caminho para

maior participação do setor produtivo e mais agilidade na execução de investimentos.

Atualmente, o Fust tem sido orientado por uma lógica de indução ao investimento em infraestrutura em regiões com menor atratividade econômica, com foco na redução das desigualdades regionais de conectividade. Entre as prioridades definidas pelo conselho gestor do fundo estão a ampliação do *backhaul* em municípios sem atendimento adequado, a conectividade em escolas públicas e a inclusão digital de populações vulneráveis – elementos relacionados aos desafios enfrentados pela expansão da infraestrutura de *data centers* e redes de alta capacidade fora dos grandes centros urbanos (Brasil, 2025).

Desde sua operacionalização, em agosto de 2023, até outubro de 2025, o Fust aprovou mais de R\$ 2,5 bilhões em projetos financiados com recursos do fundo, incluindo ações voltadas à implantação de redes ópticas em áreas remotas e à ativação de pontos de troca de tráfego regionais. Essas medidas buscam não apenas garantir acesso à internet em localidades isoladas, mas também criar as condições técnicas mínimas para a operação de serviços avançados, como os necessários ao funcionamento de aplicações de IA baseadas em nuvem (BNDES, [2025]).

Com a aceleração do uso industrial de IA, essas limitações tornam-se ainda mais evidentes. A capacidade de distribuir a carga computacional por múltiplos nós – reduzindo latência e otimizando uso energético – depende de uma malha de conectividade nacional robusta, confiável e aberta à interconexão. A superação desse desafio exige coordenação entre entes públicos e privados, planejamento integrado de redes de telecomunicações e uso estratégico de instrumentos como o Fust para fomentar a interiorização da infraestrutura digital e garantir capilaridade ao ecossistema de *data centers* emergente no país.

Políticas públicas, regulação e sustentabilidade

O arcabouço regulatório que disciplina a instalação e a operação de *data centers* no Brasil ainda é fragmentado, composto por um conjunto de normas gerais aplicáveis a diferentes aspectos da cadeia digital. A Lei Geral de Telecomunicações (Lei 9.472, de 16 de julho de 1997) estabelece prerrogativas de interconexão e compartilhamento de infraestrutura; o Marco Civil da Internet (Lei 12.965, de 23 de abril de 2014) define direitos e deveres sobre armazenamento de dados, privacidade e neutralidade de rede; e a Lei Geral de Proteção de Dados (Lei 13.709, de 14 de agosto de 2018) impõe padrões de governança da informação e segurança cibernética que já integram a *due diligence* de operadores globais.

No eixo da sustentabilidade, o Brasil parte de uma vantagem estrutural: mais de 80% da geração elétrica provém de fontes renováveis, com destaque para fontes hidrelétricas, eólicas e solares (EPE, 2025). Essa característica transforma o país em uma alternativa promissora para a instalação de infraestruturas digitais sustentáveis, em contraste com centros de dados situados em países cuja matriz energética é intensiva em carbono. Grandes operadoras têm explorado esse diferencial, abastecendo seus *data centers* instalados em território nacional com energia de fonte renovável certificada, por meio de contratos de longo prazo (*power purchase agreements* – PPA) com usinas hídricas, eólicas e solares (ABDI, 2023; Moody's Local Brasil, 2025). Ainda assim, o custo da eletricidade no Brasil segue pressionado por encargos setoriais. Segundo estudo do Grupo de Estudos do Setor Elétrico da Universidade Federal do Rio de Janeiro (GESEL-UFRJ), a incidência

de componentes como a conta de desenvolvimento energético (CDE), as bandeiras tarifárias e os encargos de segurança do sistema (ESS) pode adicionar até 35% à tarifa-base, reduzindo parte da vantagem comparativa do insumo renovável (Arbache, 2024).

Nesse cenário, a busca por eficiência energética e hídrica tornou-se imperativa. Indicadores padronizados vêm sendo utilizados para mensurar e comparar o desempenho ambiental de *data centers*, orientando tanto decisões de engenharia quanto políticas públicas. Os três principais indicadores internacionais são o *power usage effectiveness* (PUE), o *water usage effectiveness* (WUE) e o *carbon usage effectiveness* (CUE), definidos pelo consórcio The Green Grid e amplamente adotados por certificações como Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) e ISO/IEC 30134 (Quadro 1).

Quadro 1 | Indicadores internacionais de eficiência energética e hídrica

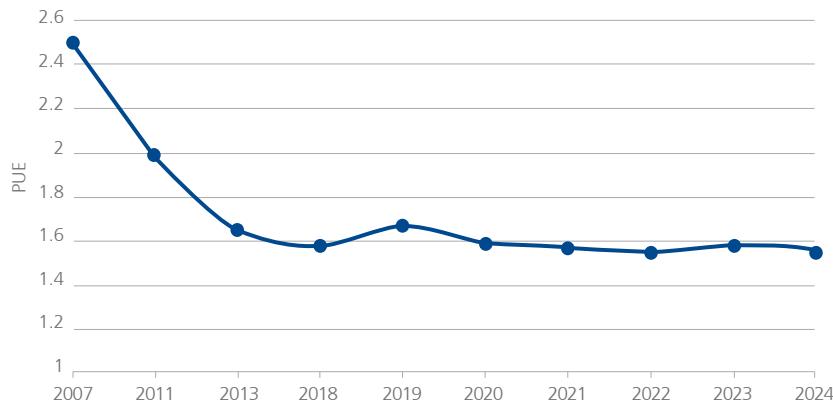
Indicador	Fórmula	Objetivo	Intervalos típicos
PUE	Energia total consumida ÷ Energia dos servidores	Medir a eficiência energética global do <i>data center</i>	1,1 a 2,5
WUE	Água consumida (litros) ÷ Energia dos servidores (kWh)	Avaliar o consumo hídrico associado à refrigeração	0,2 a 2 L/kWh
CUE	Emissão de CO ₂ (kg) ÷ Energia dos servidores (kWh)	Quantificar a intensidade de carbono da operação energética	0,1 a 1,5 kg/kWh

Fonte: Elaboração própria com base em The Green Grid (2023) e Uptime Institute (2024).

Sob essa perspectiva, observa-se no Gráfico 7 a seguir, que o PUE global teve forte queda entre 2007 e 2013, mas logo em seguida o indicador se manteve relativamente estável ao longo dos anos. O período de queda considerável se deve, principalmente, ao aumento

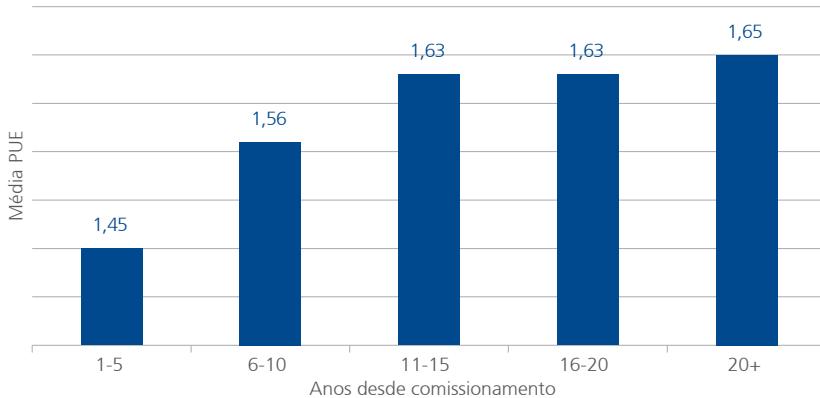
da eficiência dos equipamentos de TI e dos sistemas de controle, monitoramento e refrigeração dos *data centers*.

Gráfico 7 | Evolução do PUE médio anual global de operadores de *data center*



Fonte: Adaptado de Moody's Local Brasil (2025).

A estabilização subsequente é fruto de alguns fatores combinados: o primeiro é o fato de as primeiras medições de PUE global terem se concentrado nos EUA e na Europa, onde o clima, em geral, é mais frio (o que reduz significativamente a necessidade de refrigeração artificial) e a infraestrutura é mais eficiente. Com a coleta de dados nos mais variados continentes, incluindo Ásia, África e América Latina, o número naturalmente se estabilizou. Como exemplo, o survey de 2018 do Uptime Institute contou com dois terços das respostas oriundas de EUA e Europa, proporção que em 2023 caiu para menos da metade. Ademais, é consenso que, de forma geral, *data centers* mais novos tendem a ser mais eficientes, conforme se percebe no levantamento feito com *data centers* de 1 MW ou mais (Gráfico 8).

Gráfico 8 | PUE médio por idade dos *facilities* (para *data centers* a partir de 1 MW)

Fonte: Adaptado de Bizo (2023).

Outra questão relevante é o tamanho da capacidade instalada. *Data centers* menores são mais propensos a utilizar sistemas de climatização com tecnologias menos eficientes, como expansão direta e resfriamento a ar. Nos *data centers* mais modernos instalados no Brasil, esses índices vêm apresentando desempenho acima da média mundial. Segundo o estudo Global Data Center Trends 2025, os projetos mais recentes no país registram PUE entre 1,30 e 1,40, abaixo da média global de 1,56, conforme dados do Uptime Institute (Global..., 2025; Uptime Institute, 2024). Esses resultados são alcançados por meio de técnicas como resfriamento líquido direto em racks de alta densidade (100 kW), uso de corredores confinados e reaproveitamento de água por meio de sistemas fechados. Ainda assim, a maior parte do setor carece de padronização na divulgação desses indicadores, o que dificulta a comparação entre operadores e a formulação de políticas públicas baseadas em desempenho ambiental comprovado.

Os indicadores WUE e CUE têm adquirido relevância nos últimos anos graças ao crescimento da agenda ASG (ambiental, social e governança). O primeiro, relacionado à eficiência do consumo de água em um *data center*,

tornou-se fundamental após o aumento das tecnologias intensivas em modelos de IA. Isso se deve ao fato de que a energia térmica gerada por uma GPU é significativamente maior do que a dos servidores convencionais que utilizam apenas unidades centrais de processamento (CPU). Segundo Patel *et al.* (2024), GPUs respondem, em média, por metade do consumo de energia de um servidor, apesar da eficiência energética variar amplamente entre diferentes tipos de cargas de trabalho. *Data centers* que utilizam apenas resfriamento a ar apresentam WUE próximos de zero, enquanto os que dependem exclusivamente de resfriamento evaporativo podem atingir até 2,5 de WUE (Higgins, 2024).

Apesar de relevante, alguns pontos do WUE são passíveis de aperfeiçoamento, principalmente as medições, que em geral são feitas a partir de um único ponto de entrada de água. Mesmo sendo menos trabalhoso do ponto de vista operacional, o WUE dificulta a realização de ajustes pontuais no ambiente. Adicionalmente, o indicador desconsidera o consumo de água para a geração de energia, o que no Brasil, país cuja matriz energética é mais limpa, poderia ser um diferencial de mercado. O WUE também desconsidera a fonte hídrica, o que faz com que dois *data centers* com o mesmo consumo nominal de água, mas que utilizam fontes diferentes – água captada da chuva *versus* água potável, por exemplo –, sejam avaliados sob a mesma perspectiva.

Em um *data center*, a maior parte das emissões de carbono é oriunda da matriz energética, ou seja, da pegada de carbono advinda da geração de energia. Geradores a diesel são utilizados como fonte redundante em caso de falha no fornecimento da concessionária de energia e devem ser considerados no cálculo das emissões de carbono. Quanto mais próximo de zero, melhor é o CUE. Tendo em vista que o CUE é fortemente dependente da fonte de energia, sua diminuição significativa pode ser inviável, a depender

do local em que o *data center* esteja localizado. O Brasil, com sua matriz predominantemente hidrelétrica, tem um grande diferencial competitivo.

No plano subnacional, observa-se a disseminação de políticas fiscais e regulatórias voltadas à atração de investimentos em infraestrutura digital, com destaque para *data centers* de grande porte. O estado do Ceará, por exemplo, tem adotado uma estratégia integrada que articula incentivos fiscais, infraestrutura energética renovável e acesso internacional à conectividade, aproveitando a baixa latência proporcionada pelo *hub* de cabos submarinos de Fortaleza. Projetos instalados na Zona de Processamento de Exportação (ZPE) do Pecém, como o megacomplexo anunciado pela Casa dos Ventos em parceria com o grupo ByteDance, contam com suspensão de tributos como Imposto de Importação (II), Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), Programa de Integração Social e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (PIS-Cofins) e Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) por até vinte anos, além de diferimento de ICMS na importação de equipamentos para o ativo fixo (ZPE Ceará [2025]; Goethe, 2025).

Medidas similares foram implementadas pelo Estado do Rio de Janeiro, que aprovou a Lei 10.431, de 21 de junho de 2024, instituindo até 2032 um regime especial de tributação para empresas do setor de *data centers*, com isenção e diferimento do ICMS na aquisição de servidores, equipamentos ópticos e sistemas de resfriamento utilizados na construção, ampliação ou modernização desses empreendimentos (Rio de Janeiro, 2024). A mesma agenda de atração de infraestrutura digital foi complementada pela Prefeitura do Rio de Janeiro, que anunciou, em 2025, o projeto Rio AI City, um *campus* de *data centers* localizado no Parque Olímpico, concebido em parceria com a Elea Data Centers. Prevista para operar com capacidade inicial entre 1,5 GW e 1,8 GW de energia renovável até 2027 – podendo alcançar até 3,2 GW em fases futuras –,

a iniciativa integrará infraestrutura de supercomputação, ambientes de pesquisa e ecossistema de IA, contando com fornecimento dedicado de água e energia limpa, além de conexão direta ao Porto Maravilha e ao *hub* de cabos submarinos (Elea..., 2025; Rio..., 2025).

No plano federal, foi recentemente lançado o regime especial de tributação para serviços de *data center* no Brasil (Redata), que prevê a isenção de tributos federais na importação de equipamentos de TI, condicionada ao cumprimento de critérios de sustentabilidade e à destinação de parte da capacidade computacional ao mercado nacional, com potencial de atrair até R\$ 2 trilhões em investimentos na próxima década (MP..., 2025). Essas medidas refletem uma disputa federativa por empreendimentos intensivos em infraestrutura digital e energética, ainda que faltem mecanismos nacionais de coordenação e padronização que assegurem critérios técnicos mínimos, como desempenho energético e hídrico, para concessão de benefícios.

A União Europeia (UE) tem avançado significativamente na regulação ambiental de *data centers*, especialmente diante do aumento do consumo energético e hídrico desses empreendimentos. A Diretiva 2023/1791 do Parlamento Europeu e do Conselho da UE, de 13 de setembro de 2023, determina que, a partir de 2026, todos os *data centers* com carga superior a 500 kW deverão reportar anualmente indicadores de consumo de energia, água e calor residual, cujos dados serão integrados a um repositório pan-europeu de transparência climática (UE, 2023). Além disso, regulamentos complementares estabelecem metas progressivas de reaproveitamento do calor residual, incentivando sua integração a redes de aquecimento urbano. Com isso, a UE se consolida como referência na formulação de políticas que promovem a eficiência energética e a governança ambiental no setor de infraestrutura digital.

Nos EUA, o incentivo à instalação de *data centers* ocorre principalmente por meio de regimes fiscais estaduais voltados à atração de investimentos, com ênfase em isenções tributárias sobre equipamentos e infraestrutura. Estados como Virgínia e Arizona concedem isenção total do imposto sobre vendas (*sales tax*) para centros de dados que atendam a determinados critérios de investimento e geração de empregos. Na Virgínia, segundo relatório da Joint Legislative Audit and Review Commission (JLARC, 2024), os benefícios fiscais não estão atualmente vinculados à adoção de práticas ambientais ou energéticas avançadas, embora o órgão recomende que o legislativo estadual avalie a inclusão de contrapartidas de sustentabilidade nas próximas revisões do programa. Já no Arizona, o Computer Data Center Program oferece benefícios semelhantes, podendo estender o prazo de isenção para empreendimentos certificados por padrões de construção sustentável, como Energy Star ou Green Globes (Computer..., [2024]). Essas políticas têm estimulado a atração de investimentos bilionários em infraestrutura computacional, ao mesmo tempo que buscam contrapartidas que favorecem a mitigação de impactos ambientais. Há, no entanto, um debate crescente sobre a necessidade de rever esses benefícios em função da pressão sobre recursos naturais e do aumento da demanda energética projetada para a próxima década.

Na Ásia, países como Malásia, Tailândia e Índia vêm se destacando por políticas voltadas à atração de *data centers* ancoradas a critérios de sustentabilidade. A Malásia, por exemplo, permitiu que grandes centros de dados comprassem energia renovável diretamente dos produtores por meio de seu Corporate Green Power Programme, ao mesmo tempo que adotou uma nova estrutura tarifária de energia (incluindo sobretaxas para grandes consumidores) com o objetivo de incentivar o uso de fontes limpas. Projeta-se que a capacidade instalada em Johor alcance cerca de 1,6 GW até 2035 (Ghosal; Thian, 2025). Já a Tailândia tem promovido zonas econômicas especiais com infraestrutura energética dedicada,

além de oferecer mecanismos de fornecimento de energia limpa que facilitam contratos diretos entre produtores de renováveis e operadores de centros de dados (Azhar, 2024). A Índia, por sua vez, ampliou seu marco regulatório por meio de iniciativas que combinam eficiência energética e uso de tecnologias avançadas de resfriamento, alinhadas ao *Energy Efficiency Guidelines*, do Bureau of Energy Efficiency (BEE, 2023), e conta com parcerias público-privadas que promovem certificações verdes e compartilhamento de boas práticas (Ganguly; Parial, 2025; Kaladharan; Kidambi, 2025). Essas experiências asiáticas mostram como a combinação entre incentivos econômicos e exigências ambientais pode impulsionar a infraestrutura digital de maneira sustentável em regiões cuja demanda por serviços de dados é crescente.

A China consolidou-se como um dos principais polos globais de *data centers*, graças a um planejamento estatal de longo prazo e a metas rigorosas de eficiência energética. Em 2022, o governo central lançou a iniciativa Eastern Data, Western Computing, com o objetivo de descentralizar a capacidade computacional e reduzir a pressão nas regiões litorâneas por meio da construção de oito *hubs* nacionais e dez *clusters* regionais incentivados tecnicamente a operar com energia renovável e resfriamento natural (Ye, 2025). As diretrizes incluem padrões progressivos de PUE, uso obrigatório de fontes limpas e sistemas de reaproveitamento de calor, refletindo o papel articulador do estado na integração entre transformação digital e transição energética.

Esses exemplos demonstram que políticas bem-sucedidas dependem de uma articulação robusta entre estímulos regulatórios, exigências técnicas e metas ambientais – uma base essencial para que o Brasil possa avançar com seu próprio modelo regulatório, envolvendo esforços federativos, sustentabilidade e competitividade digital.

Considerações finais

A infraestrutura de *data centers* ocupa posição central na nova geopolítica da transformação digital. Sua capilaridade territorial, eficiência energética e capacidade de interconexão passaram a ser ativos estratégicos para a atração de investimentos, o avanço da IA e a ampliação da soberania tecnológica dos países. No Brasil, essa infraestrutura encontra terreno propício para se desenvolver tendo em vista a matriz elétrica majoritariamente renovável, um mercado digital em expansão e localização geográfica privilegiada. No entanto, essas condições vantajosas precisam ser acompanhadas de planejamento coordenado, marcos regulatórios robustos e instrumentos de financiamento capazes de direcionar os investimentos para projetos sustentáveis e distribuídos territorialmente.

A expansão dessa infraestrutura exige mais do que a construção de grandes centros de dados em polos tradicionais. É necessário articular uma política nacional que considere as assimetrias regionais, incentive a interiorização da conectividade e promova uma nova geração de empreendimentos com maior densidade computacional, menor consumo de recursos e alto desempenho ambiental. Essa transição passa pela valorização de métricas universais de eficiência energética e hídrica, como PUE, WUE e CUE, bem como pela integração entre redes de telecomunicações, centros de supercomputação e zonas industriais com potencial para reaproveitamento de calor residual e uso racional da água.

A universalização da infraestrutura digital depende da expansão das redes de telecomunicações, especialmente do *backbone* óptico nacional. A instalação de novos *data centers* em regiões fora do eixo Sudeste-Sul só será viável com o aumento da capilaridade de redes de alta capacidade,

rotas redundantes e pontos de troca de tráfego regionais. O investimento em redes ópticas de alta velocidade é condição para a interiorização da capacidade computacional e para a redução da latência em aplicações críticas, como inferência de IA, telemedicina e automação industrial. Fundos públicos como o Fust, combinados a linhas de crédito com prazos compatíveis com a maturação dessas redes, devem desempenhar papel central nesse processo, viabilizando a presença de infraestrutura digital em territórios hoje negligenciados pelas lógicas de mercado.

No campo regulatório, a harmonização entre normas federais, estaduais e municipais é condição indispensável para destravar o licenciamento e criar um ambiente de previsibilidade jurídica. A ausência de um marco nacional específico para *data centers*, que contemple aspectos construtivos, operacionais e ambientais, gera insegurança e dificulta o planejamento de longo prazo por parte dos investidores. A definição de parâmetros técnicos mínimos, a padronização de exigências e a inclusão de critérios de sustentabilidade nas políticas de incentivos são passos fundamentais para alinhar o setor aos referenciais internacionais.

Também é urgente estruturar um plano nacional de formação de mão de obra técnica especializada. A operação de *data centers* modernos demanda competências específicas em gestão de infraestrutura crítica, climatização líquida, proteção de dados e automação de processos energéticos. Sem profissionais qualificados, mesmo projetos com acesso a financiamento e energia limpa enfrentarão gargalos operacionais. A articulação entre setor privado, redes de educação técnica e programas de bolsas públicas voltados à pesquisa aplicada pode reduzir esse descompasso e fortalecer o ecossistema nacional de inovação em hardware, eficiência e segurança cibernética.

A adoção de medidas similares no Brasil – como a obrigatoriedade de reportar PUE, WUE e CUE relativos a *data centers* acima de determinado

porte, combinada a incentivos tarifários e fiscais atrelados ao desempenho ambiental – poderia catalisar o alinhamento do setor brasileiro aos referenciais globais. Essa agenda requer articulação federativa, envolvimento das agências reguladoras, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e a Anatel, e coordenação com as políticas industriais e de inovação voltadas à infraestrutura digital.

O alinhamento entre regras claras, metas ambientais mensuráveis e instrumentos de financiamento direcionados constitui, assim, o pilar fundamental para transformar a atual vantagem potencial do Brasil em *hub* de *data centers* de baixo carbono em uma vantagem efetiva e estratégica. Essa consolidação do ambiente regulatório e financeiro será decisiva para atrair a próxima geração de investimentos em cargas intensivas de IA, que exigem não apenas conectividade e energia, mas sustentabilidade comprovada por métricas universais.

Cumpre ainda destacar que a elevada dependência externa, que responde por cerca de 85% do Capex do setor, não deve ser interpretada apenas como uma fragilidade a ser sanada pela internalização integral da cadeia de bens de capital. A dinâmica da indústria de *data centers*, fortemente globalizada e sujeita a rápidas inovações tecnológicas, torna economicamente complexa a reprodução doméstica de toda a base de equipamentos e insumos. Contudo, isso não elimina a importância de estimular o desenvolvimento interno de fornecedores em áreas onde haja vantagens comparativas, potencial de inovação e capacidade de geração de valor agregado, de modo a reduzir vulnerabilidades críticas e ampliar a autonomia tecnológica do país. Assim, a estratégia deve, de forma complementar, articular o fortalecimento da cadeia nacional de bens e serviços com ações que garantam a inserção competitiva do Brasil no ecossistema global – por

meio da atração de investimentos externos, do reforço da capacidade nacional em elos estratégicos (como *software*, integração de sistemas, operação e manutenção) e da articulação com políticas industriais horizontais já existentes.

Além de sua relevância como infraestrutura crítica, os *data centers* exercem um efeito multiplicador sobre a economia nacional, ao estimular tanto a cadeia de máquinas e equipamentos pela elevada demanda por *hardware*, sistemas de armazenamento e tecnologias de refrigeração, quanto a cadeia de serviços especializados, que envolve operação, manutenção, integração de sistemas e segurança digital. Esse caráter dinâmico reforça o potencial do setor de contribuir não apenas para a transformação digital, mas também para a dinamização industrial e tecnológica do país.

Ao reunir políticas de inovação, sustentabilidade e soberania digital em uma mesma agenda estratégica, o Brasil tem a oportunidade de ocupar um papel de liderança regional na nova economia intensiva em dados. Isso requer visão de longo prazo, governança integrada e capacidade de execução articulada entre Governo Federal, estados, municípios, empresas e universidades. A infraestrutura computacional precisa deixar de ser um ativo invisível para se tornar vetor explícito de desenvolvimento econômico e social, com impacto sobre produtividade, geração de empregos qualificados e inserção competitiva nas cadeias globais.

Referências

- ABDI – AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. *Estratégia para a implementação de política pública para atração de data centers*. Brasília, DF: ABDI, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/comercio-e-servicos/comercio/estudo_completo_datacenters_jun2023.pdf/view. Acesso em: 29 set. 2025.
- ANATEL – AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. *Plano Estrutural de Redes de Telecomunicações – PERT 2025-2029*. Brasília, DF: Anatel, 2025. (Edição 02/2025). Acesso em: 9 jul. 2019. Disponível em: https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?8-74Kn1tDR89f1Q7RjX8EYU46IzCFD26Q9Xx5QNDbqbtlCCLfdG-ywH0SwsCKU9iX7BTWJde-Q7Vp4niu1EefU20NNGY1BqHWvcfpXWTW0uxGoMPOlNVHXqeLGDq7Tvi. Acesso em: 29 set. 2025.
- ARBACHE, J. Os custos e benefícios dos data centers. Rio de Janeiro: Gesel-UFRJ, 2024. (Texto de Discussão do Setor Elétrico, n. 128). Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2024/11/Sobre-os-beneficios-dos-data-centers-Jorge-Arbache_VF.pdf. Acesso em: 29 set. 2025.
- AZHAR, A. Big tech will scour the globe in its search for cheap energy. *Wired*, 16 dez. 2024. Disponível em: <https://www.wired.com/story/big-tech-data-centers-cheap-energy/>. Acesso em: 20 ago. 2025.
- BEE – BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY. *Energy efficiency guidelines and best practices in Indian datacenter: a sourcebook for Indian datacenter industry*. New Delhi: BEE, 2023. Disponível em: <https://beeindia.gov.in/sites/default/files/datacenterbook.pdf>. Acesso em: 10 set. 2025.
- BIZO, D. Global PUEs – are they going anywhere? *Uptime Institute*, 4 dez. 2023. Disponível em: <https://journal.uptimeinstitute.com/global-pues-are-they-going-anywhere/>. Acesso em: 10 ago. 2025.
- BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Fust – Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações*. Rio de Janeiro: BNDES, [2025]. Disponível em: <https://www.bnDES.gov.br/wps/portal/site/home/transparencia/fundos-governamentais/fust/>. Acesso em: 29 set. 2025.

BRASIL. Ministério das Comunicações. *Agentes financeiros*. Brasília, DF: MCom, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcom/pt-br/assuntos/fust/agentes-financeiros>. Acesso em: 29 set. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Nova Indústria Brasil: uma política para o novo ciclo de transformação produtiva*. Brasília, DF: MDIC, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica/programas-em-destaque/nova-industria-brasil>. Acesso em: 29 set. 2025.

BRASSCOM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO E DE TECNOLOGIAS DIGITAIS. *Atração de investimentos em data centers no Brasil: Plano Brasil Digital 2030+*. Brasília, DF: Brasscom, 2024. Disponível em: <https://brasscom.org.br/wp-content/uploads/2024/09/Brasscom-Investimentos-em-Data-Center.pdf>. Acesso em: 29 set. 2025.

COMPUTER Data Center Program. *Arizona Commerce Authority*, Phoenix, [2024]. Disponível em: <https://www.azcommerce.com/incentives/computer-data-center-program/>. Acesso em: 29 set. 2025.

DATA Center Capex Surged 51 Percent to \$455 Billion in 2024, According to Dell’Oro Group. *Dell’Oro Group*, Redwood City, 19 mar. 2025. Disponível em: <https://www.delloro.com/news/data-center-capex-surged-51-percent-to-455-billion-in-2024/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

ELEA anuncia a Rio AI City: projeto de campus de data centers com capacidade de até 3,2 GW. *Datacenter Dynamics*, São Paulo, 8 mai. 2025. Disponível em: <https://www.datacenterdynamics.com/br/noticias/elea-anuncia-a-rio-ai-city-projeto-de-campus-de-data-centers-com-capacidade-de-ate-32-gw/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional*. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN>. Acesso em: 10 set. 2025.

GANGULY, S.; PARIAL, A. Decarbonisation: ensuring efficiency in India's data centres. *Turner & Townsend*, 17 mar. 2025. Disponível em: <https://www.turnerandtownsend.com/insights/decarbonisation-ensuring-efficiency-in-indias-data-centres/>. Acesso em: 10 set. 2025.

GHOSAL, A.; THIAN, V. Malaysia is betting on data centers to boost its economy. But experts warn they come at a price. *AP News*, 19 fev. 2025. Disponível em: <https://apnews.com/article/malaysia-johor-data-centers-energy-electricity-power-cfb087f755d3e203a347463af229e88d>. Acesso em: 10 set. 2025.

GLOBAL Data Center Trends 2025. *CBRE*, Dallas, 24 jun. 2025. Disponível em: <https://www.cbre.com/insights/reports/global-data-center-trends-2025>. Acesso em: 10 set. 2025.

GOETHE, P. Investimentos chineses no NE chegam a 58 projetos e R\$ 13bi, diz CEBC. *Movimento Económico*, 5 set. 2025. Disponível em: <https://movimentoeconomico.com.br/geral/redacao/2025/09/05/investimentos-chineses-no-ne-chegam-a-58-projetos-e-r-13-bi-diz-cebc/>. Acesso em: 29 set. 2025.

HIGGINS, A. What is Water Usage Effectiveness (WUE) in data centers?. *Interconnections – The Equinix Blog*, 13 nov. 2024. Disponível em: <https://blog.equinix.com/blog/2024/11/13/what-is-water-usage-effectiveness-wue-in-data-centers/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026*. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>. Acesso em: 10 set. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Energy and AI*. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>. Acesso em: 10 set. 2025.

JLARC – JOINT LEGISLATIVE AUDIT AND REVIEW COMMISSION. *Data Centers in Virginia 2024: Report to the Governor and the General Assembly of Virginia*. Richmond: JLARC, 2024. Report 598. Disponível em: <https://www.coopercenter.org/research/jlarc-report-data-centers-virginia>. Acesso em: 29 set. 2025.

KALADHARAN, M.; KIDAMBI, A. Scaling up India's data centre industry sustainably. *India Business Law Journal*, 25 abr. 2025. Disponível em: <https://law.asia/green-data-centres/>. Acesso em: 8 set. 2025.

MÁXIMO, W. Haddad anuncia que pretende acelerar desoneração de data centers. *Agência Brasil*, Brasília, DF, 5 mai. 2025. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2025-05/haddad-anuncia-que-pretende-acelerar-desoneracao-de-data-centers>. Acesso em: 10 set. 2025.

MOODY'S LOCAL BRASIL. *Setor de data centers no Brasil: fundamentos, perspectivas e tendências*. São Paulo: Moody's Local Brasil, 2025. Disponível em: https://moodysllocal.com.br/wp-content/uploads/2025/04/3.1_MLBR_Research_DataCenters_01042025_v3-Final.pdf. Acesso em: 29 set. 2025.

MORDOR INTELLIGENCE. *Brazil Data Center Market - Growth, Trends, and Forecasts (2024-2029)*. Hyderabad: Mordor Intelligence, 2025. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/brazil-data-center-market>. Acesso em: 10 set. 2025.

MP cria o Redata, que estimula *data centers* e impulsiona economia digital no Brasil. *Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços*, Brasília, DF, 17 set. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2025/setembro/mp-cria-o-redata-que-estimula-datacenters-e-impulsiona-economia-digital-no-brasil>. Acesso em: 29 set. 2025.

PATEL, P. et al. Characterizing power management opportunities for LLMs in the cloud. In: ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARCHITECTURAL SUPPORT FOR PROGRAMMING LANGUAGES AND OPERATING SYSTEMS, 29., San Diego, v. 3, 27 abr.-1º mai. 2024. *Anais [...]*. New York: Association for Computing Machinery, 2024.

RESEARCH AND MARKETS. *Brazil Existing & Upcoming Data Center Portfolio 2025*. Dublin: Research and Markets, 2025. Disponível em: <https://www.researchandmarkets.com/r/1eo96e>. Acesso em: 10 set. 2025.

RIO anuncia o projeto Rio AI City: o maior hub de data centers da América Latina e um dos dez maiores do mundo. *Prefeitura do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, 15 abr. 2025. Disponível em: <https://prefeitura.rio/noticias/rio-anuncia-o-projeto-rio-ai-city-o-maior-hub-de-data-centers-da-america-latina-e-um-dos-dez-maiores-do-mundo/>. Acesso em: 10 set. 2025.

RIO DE JANEIRO (Estado). Lei 10.431, de 21 de junho de 2024. Institui regime diferenciado de tributação para empresas prestadoras de serviços de data center no Estado do Rio de Janeiro. *Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro*: Rio de Janeiro, 24 jun. 2024. Disponível em: <https://legislacao.fazenda.rj.gov.br/lei-no-10-431-de-21-de-junho-de-2024>. Acesso em: 8 set. 2025.

UE – UNIÃO EUROPEIA. Diretiva (EU) 2023/1791 [...]. *Jornal Oficial da União Europeia*, 20 set. 2023. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L1791>. Acesso em: 10 set. 2025.

UPTIME INSTITUTE. *Global Data Center Survey 2024*. Seattle: Uptime Institute Intelligence, 2024. Disponível em: <https://datacenter.uptimeinstitute.com/rs/711-RIA-145/images/2024.GlobalDataCenterSurvey.Report.pdf>. Acesso em: 08 set. 2025.

YE, Y. Explainer: How China is managing the rising energy demand from data centres. *CarbonBrief*, 16 abr. 2025. Disponível em: <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-china-is-managing-the-rising-energy-demand-from-data-centres/>. Acesso em: 10 set. 2025.

ZPE CEARÁ. Benefícios gerais. *ZPE Ceará*, São Gonçalo do Amarante, [2025]. Disponível em: <https://zpeceara.com.br/beneficios/>. Acesso em: 29 set. 2025.

DECARBONIZATION IN THE STEEL INDUSTRY: AN OPPORTUNITY TO ADD VALUE AND INCREASE COMPETITIVENESS

Patrícia Dias Fernandes

Pedro Paulo Dias Mesquita

Adriano dos Reis Miranda Laureno Oliveira

Rodrigo José Márcio Mendes

Amynthas Gallo

*Bruno Hirth de Lira**

Keywords: steel industry; steel; competitiveness; decarbonization; green hydrogen.

* Respectively, managers, economists, administrator, and intern of the Basic and Extractive Industries Department of the BNDES's Productive Development and Innovation Division.

Resumo

A indústria siderúrgica é estratégica para a transição rumo a uma economia de baixo carbono. Por um lado, o setor é o maior emissor de carbono da indústria pesada. Por outro lado, produz insumos essenciais às tecnologias renováveis. As rotas de transformação da siderurgia para uma atividade de baixo carbono ressaltam vantagens comparativas do Brasil, que poderá assumir posição de destaque na oferta de materiais metálicos para descarbonização. A competitividade mineral do país e o acesso diferenciado a recursos energéticos de baixo carbono, como biocombustíveis e hidrogênio, devem impulsionar relevantes investimentos para o desenvolvimento de novas capacidades produtivas. Este estudo apresenta a dinâmica do mercado siderúrgico nacional e do comércio internacional, analisa os fatores e as perspectivas para a competitividade das plantas siderúrgicas brasileiras, além de discutir as oportunidades que poderão surgir a partir de mudanças regulatórias nos países desenvolvidos.

Abstract

The steel industry plays a strategic role in the transition toward a low-carbon economy. On the one hand, the sector emits the most carbon in heavy industry. On the other hand, it supplies essential inputs for renewable technologies. Transformation pathways for steelmaking to a low-carbon activity highlight Brazil's comparative advantages, positioning the country to assume a prominent role in supplying metallic materials for decarbonization. Brazil's mineral competitiveness and its differentiated access to low-carbon energy resources, such as biofuels and hydrogen, drive significant investments in developing new productive capabilities. This study analyzes the dynamics of the domestic steel market and international trade, the factors and outlook driving the competitiveness of Brazilian steel plants, and outlines the opportunities that regulatory changes in developed countries may generate.

Introdução

O aço é um insumo básico para diversos setores industriais e para a construção civil, valorizado por sua alta resistência, adaptabilidade, durabilidade e capacidade de reciclagem. Suas aplicações abrangem desde produtos metálicos, eletrodomésticos e equipamentos, até meios de transporte – como carros, caminhões, navios e ferrovias – e infraestrutura. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2020a), outros materiais oferecem alternativas ao aço em várias aplicações, mas a facilidade de uso na fabricação e seu custo relativamente baixo tornam improvável sua substituição completa no futuro próximo.

Durante as fases de industrialização e urbanização de uma economia, o consumo de aço cresce rapidamente, impulsionado pelo aumento da demanda por bens duráveis e pela expansão do setor de construção. Para garantirem um fluxo contínuo e confiável desse insumo estratégico ao desenvolvimento econômico e à soberania nacional, muitos países priorizaram o estabelecimento de indústrias siderúrgicas. Esse foi o caso do Brasil, com o financiamento obtido por Getúlio Vargas junto aos Estados Unidos da América (EUA) para a construção da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em 1941.

Desde a década de 1980, o consumo mundial de aço *per capita* aumentou 67%, liderado pelos países em desenvolvimento, com exceção do Brasil, que, em virtude de sua baixa taxa de investimento e desindustrialização recente, manteve seu consumo relativamente estável. Esse foi um movimento comum no Norte global, em que a transição dos países desenvolvidos para economias predominantemente orientadas ao setor de serviços gerou uma redução natural na intensidade de uso do aço. Ainda assim, a contínua necessidade de substituir o estoque

de aço que chega ao fim de sua vida útil e o crescimento da economia global deverão elevar o consumo do aço em 20%, até 2050 (World Steel Association, c2025a). A Tabela 1 apresenta os dados do consumo *per capita* de produtos de aço.

Tabela 1 | Consumo *per capita* de produtos de aço (kg por habitante)

País	1980	2000	2024
China	32	96,9	601,1
Coreia do Sul	134,4	808,3	923,5
Japão	605,2	596,7	419
EUA	377,4	425,6	260,6
Alemanha	369,3	473,6	312,7
Espanha	200,5	425,4	283,9
Brasil	100,6	92,6	120
Índia	12,7	26,3	102,6
Chile	52,5	96	116,4
México	115	136,4	213,5
Mundo	128,3	122	214,3

Fonte: Adaptado de IABr ([2025a]).

O caráter estratégico da produção de aço é reforçado pelo ambiente geopolítico instável e pelo papel central que essa indústria terá no esforço de descarbonização global, representado nas metas do Acordo de Paris. Atualmente, cerca de 8% das emissões globais de CO₂ são geradas pela indústria do aço e mais de 98% da produção global desse produto é realizada em países que já têm metas de neutralidade de carbono (World Steel Association, c2025a).

O custo da transição verde na cadeia produtiva do aço é estimado entre US\$ 3,5 trilhões e US\$ 5,5 trilhões, sendo US\$ 1,2 trilhão diretamente na sua produção (World Steel Association, c2025a). Tais cifras

atraem investidores a países com firmas globalmente competitivas na cadeia do aço, com reservas abundantes de minério de ferro de alta qualidade e matriz energética predominantemente renovável, que viabilizem a produção de aço “verde”.¹

Para o Brasil, é a oportunidade de se posicionar na liderança de um mercado com maior valor agregado, alinhando-se, desde já, às exigências regulatórias que os países ricos, que também são os maiores importadores líquidos de aço, irão impor gradativamente para proteger seus mercados internos em um contexto de crescentes disputas geopolíticas. O desafio será garantir recursos financeiros e incentivos para que a competitiva indústria siderúrgica nacional lidere o estabelecimento de novas tecnologias, enquanto o mercado nacional enfrenta um forte aumento das importações de origem chinesa.

Mercado siderúrgico brasileiro

Estrutura da indústria siderúrgica

Os produtos siderúrgicos são classificados em aços planos e longos.² Os planos, que incluem chapas e bobinas, são amplamente usados nos setores automotivo, de bens de capital e na construção civil. Sua produção é dominada pela rota integrada, também chamada de produção primária de aço. Esse processo utiliza, sobretudo, minério de ferro, ainda que a sucata geralmente se situe entre 15% e 25% do insumo metálico empregado. Nessa etapa, o carvão metalúrgico

1 Ainda não há uma definição consensual de aço “verde”. Em termos gerais, trata-se de aço produzido com baixa emissão de carbono. Os parâmetros de referência usados neste artigo são detalhados na seção “Produção de baixo ou zero carbono”.

2 Para mais detalhes sobre a classificação dos produtos siderúrgicos, ver Fernandes *et al.* (2024).

atua como principal fonte de energia e agente redutor, com o alto-forno sendo o equipamento-chave utilizado para a transformação do minério em ferro.

Já os aços longos, como barras, perfis e vergalhões, são essenciais em construções estruturais, como edifícios e pontes. Em geral, tais aços são fabricados via rota semi-integrada, caracterizada pelo uso de fornos elétricos a arco (*electric arc furnace – EAF*). Esse processo, conhecido como produção secundária, utiliza a sucata metálica³ como principal matéria-prima e consome cerca de um oitavo da energia da produção primária. Além disso, emprega a eletricidade como principal fonte de energia, em vez de carvão.

A siderurgia brasileira é composta por 31 usinas (15 integradas e 16 semi-integradas), distribuídas por dez estados brasileiros, e com capacidade instalada de 51 milhões de toneladas de aço bruto por ano. Essas unidades são administradas por 11 grupos empresariais, entre os quais se destacam ArcelorMittal, CSN, Gerdau e Ternium (Tabela 2).

Tabela 2 | Produção de aço bruto por empresa (mil toneladas)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Aço Verde do Brasil	338	321	345	388	386	498
Aperam	688	696	754	691	726	575
ArcelorMittal Aços Longos e ArcelorMittal Sul Fluminense	3.590	3.744	4.072	4.053	3.740	3.945

(Continua)

³ O EAF usa principalmente sucata metálica, mas também pode empregar ferro-gusa, ferro-esponja (*direct reduced iron – DRI*) ou minério de ferro previamente beneficiado. Como o EAF não realiza a redução do minério, esse só é utilizado após pré-processamento.

(Continuação)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
ArcelorMittal Pecém	2.866	2.743	2.811	2.794	3.045	3.036
ArcelorMittal Tubarão	6.268	4.973	7.089	6.641	6.604	6.936
CSN	3.043	3.810	4.260	3.773	3.062	3.349
Gerdau	6.301	6.220	6.974	6.496	5.843	6.139
SIMEC	671	988	848	873	911	965
Sinobras	345	330	367	392	475	504
Ternium Brasil	4.379	4.138	4.529	4.424	4.372	3.973
Usiminas	3.264	2.760	3.178	2.655	2.069	3.186
Vallourec	705	588	710	776	684	664
Villares Metals	111	104	134	133	113	110
Total	32.569	31.415	36.071	34.089	32.030	33.880

Fonte: Adaptado de IABr (2025b).

Conforme se pode observar na Figura 1, há uma predominância de usinas na região Sudeste, devido à localização das minas do quadrilátero ferrífero no centro-sul de Minas Gerais, principal região produtora de minério de ferro na época de construção dessas unidades. As usinas de aços planos, que seguem a rota integrada, estão posicionadas para ter fácil acesso às principais matérias-primas, aos maiores mercados consumidores e à infraestrutura integrada (mina-ferrovia-porto), fatores essenciais para competir no mercado internacional.

Figura 1 | Parque siderúrgico brasileiro 2024



Fonte: Elaboração própria com base em IABr (2024).

Também se nota uma concentração de usinas na costa, voltadas ao atendimento do mercado internacional por meio de exportações. Além disso, o crescimento da produção de minério de ferro na região de Carajás estimulou o surgimento de novas usinas nas regiões Norte e Nordeste.

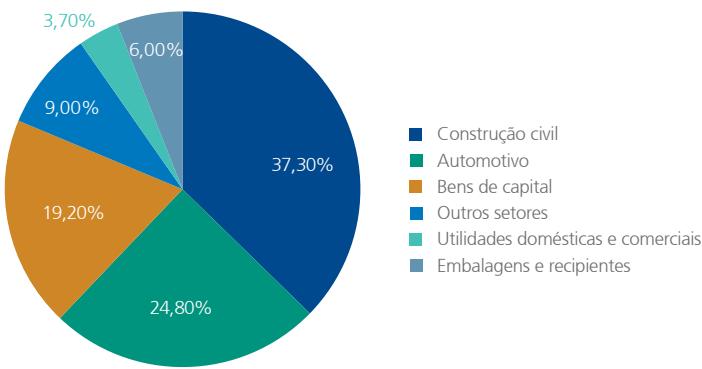
Já as usinas de aços longos, que utilizam a rota semi-integrada, tendem a se localizar mais próximas ao mercado consumidor e a pontos de abastecimento de sucata, o que reduz custos logísticos e proporciona mais agilidade no atendimento às demandas locais.

Em 2024, o Brasil produziu 33,7 milhões de toneladas de aço bruto, ocupando a nona posição no *ranking* mundial. Mesmo mantendo sua posição entre os maiores produtores globais, a participação brasileira diminuiu de 2,3% em 2010 para 1,8%⁴ da produção mundial de aço bruto, que alcançou 1,9 bilhão de toneladas em 2024.

Desempenho do mercado interno: consumo e produção

No Brasil, os principais consumidores de produtos siderúrgicos são os setores de construção civil, automotivo e de bens de capital. Juntos, representaram 81,3% do consumo de aço em 2024. Embora tenha perdido 1,6 ponto percentual de participação no consumo aparente⁵ em relação a 2023, a liderança segue com a construção civil, com 37,3% (Gráfico 1).

Gráfico 1 | Participação dos consumidores finais de produtos siderúrgicos 2024



Fonte: Adaptado de IABr ([2025a]).

4 Ainda assim, no mesmo ano, a indústria siderúrgica brasileira representou 76,2% da produção sul-americana, consolidando-se como a maior produtora de aço bruto da região, segundo a World Steel Association (c2025b).

5 O consumo aparente é a soma das vendas internas com as importações de distribuidores e consumidores.

Tabela 3 | Capacidade, produção, vendas, importações, consumo e capacidade instalada de aço do Brasil (mil toneladas)

Produção	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Aço bruto	33.897	33.258	31.642	34.778	35.407	32.569	31.415	36.071	34.089	32.030	33.880
Semicabados para venda	7.876	9.829	10.698	11.639	11.971	10.900	9.101	10.575	10.502	11.393	10.671
Laminados planos	14.229	13.388	12.273	13.687	14.257	13.246	12.355	15.150	13.665	12.640	13.683
Laminados longos	10.677	9.283	8.848	9.003	9.439	9.242	9.452	10.605	9.801	9.255	10.111
Vendas internas	21.709	18.173	16.828	17.247	18.920	18.799	19.462	22.303	20.326	19.537	21.279
Vendas externas (exportação*)	9.781	13.726	13.432	15.351	13.945	12.805	10.538	10.975	11.941	11.714	9.571
Importações	3.978	3.210	1.879	2.329	2.407	2.365	2.037	4.974	3.350	5.024	5.958
Consumo aparente	25.606	21.295	18.520	19.523	21.207	20.977	21.449	26.337	23.534	23.980	26.108
Importações/consumo (%)	15,54%	15,07%	10,15%	11,93%	11,35%	11,27%	9,50%	18,89%	14,23%	20,95%	22,82%
Capacidade instalada de aço bruto	47.412	47.457	51.450	51.450	51.450	50.950	50.950	50.950	50.950	50.950	50.950

Fonte: Adaptado de IABt (2025b).

* Proxy das exportações considera vendas faturadas pelas usinas.

O volume da produção, do consumo aparente e das vendas internas de aço encontra-se atualmente em um patamar semelhante ao de dez anos atrás (Tabela 3). Já as importações subiram significativamente, passando a representar 22,8% do consumo, ante 15,6% em 2014. Considerando a queda de 3,9% na produção de laminados planos e de 5,3% nos laminados longos nesse decênio, o avanço das importações contribuiu, até certo ponto, para o equilíbrio do mercado, na medida em que ajudou a conter a alta dos preços do aço em momentos de pico. Por outro lado, o aumento de produtos chineses no mercado limitou a rentabilidade dos produtores nacionais.

A produção de semiacabados, por sua vez, seguiu tendência oposta à dos laminados, em função da implantação das usinas Companhia Siderúrgica do Atlântico (CSA), em 2010, e da Companhia Siderúrgica de Pecém (CSP), em 2016, ambas destinadas à produção de placas⁶ de aço (semiacabados) voltadas para exportação. Esses investimentos foram fundamentais para o aumento de 35,5% da produção de semiacabados nos últimos dez anos, mitigando a contração da produção nacional de aço.

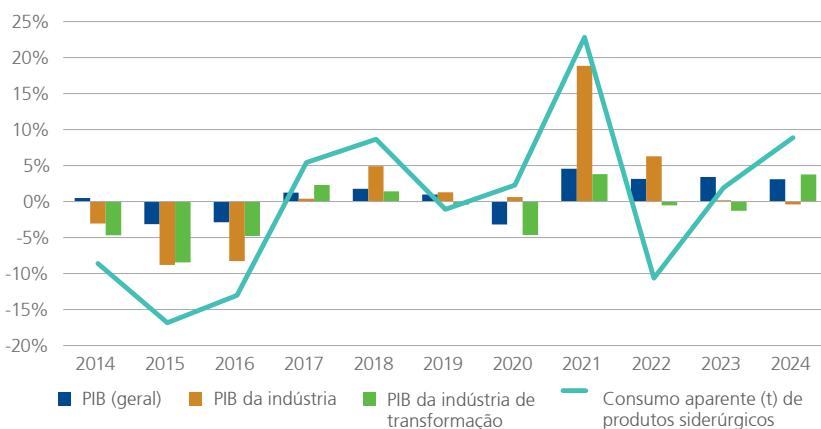
O movimento da demanda por aço refletiu a forte correlação do setor siderúrgico com o produto interno bruto (PIB), que, entre crises e retomadas, ultrapassou o nível alcançado em 2014 apenas em 2022.⁷ A correlação é ainda mais estreita para a taxa de variação do PIB da indústria de transformação, com coeficientes acima de 0,80 na comparação com a taxa de variação do consumo aparente e

6 A placa é considerada um produto siderúrgico semiacabado, utilizado, basicamente, como matéria-prima para a laminação de produtos planos. A CSA e a CSP possuem, respectivamente, 5 milhões e 3 milhões de t/ano de capacidade produtiva instalada. Hoje, as usinas se chamam Ternium Brasil e ArcelorMittal Pecém.

7 Conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) disponíveis em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9300-contas-nacionais-trimestrais.html?=&t=resultados>. Acesso em: 30 set. 2025.

para as vendas internas de produtos siderúrgicos, entre 2014 e 2024, conforme se observa no Gráfico 2.

Gráfico 2 | Taxas de variação real anual do PIB geral, da indústria e da indústria de transformação comparadas à taxa de variação real anual do consumo aparente de produtos siderúrgicos



Fonte: Elaboração própria com base em dados do IABr (2024), IBGE e IPEA Data. Estes últimos disponíveis, respectivamente, em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9300-contas-nacionais-trimestrais.html?=&t=resultados;> e <https://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em: 30 set. 2025.

Formação de preços

O custo do minério de ferro, como principal insumo siderúrgico e *commodity* internacional, é destaque na formação dos preços do aço, ao lado do carvão e da sucata. No período de 2011 a 2024, a correlação entre o preço do minério de ferro (62%) e o preço de bobinas e vergalhões foi de cerca de 72%. Quando somamos o preço do minério ao do carvão metalúrgico no período de 2018 a 2024, a correlação alcança 80%. Detalhes da correlação entre os preços dos insumos siderúrgicos e dos produtos são apresentados no Gráfico 3.

Cenário macroeconômico recente e seus reflexos na indústria siderúrgica

A economia brasileira vem enfrentando diversos desafios na última década. O período de 2014 a 2020 inicia-se com a crise econômica do segundo governo Dilma e se encerra com a crise global provocada pela pandemia de Covid-19.

Após essa fase, caracterizada por recessão e baixo crescimento econômico, a economia passou a apresentar melhor desempenho. A forte recuperação observada em 2021 foi seguida por anos de crescimento econômico moderado. Dessa forma, o PIB fechou o período 2013-2023 com crescimento médio de 0,5% ao ano.

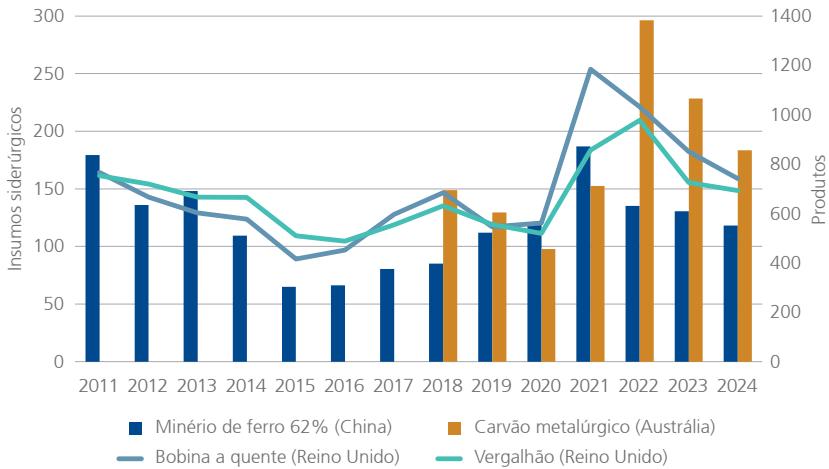
Apesar do desempenho de 2023 ter sido acima dessa média (2,9%), impulsionado, sobretudo, pelos setores agropecuário e de serviços, a indústria de transformação, que impacta mais diretamente o setor de aço, apresentou queda de 1,3% em relação a 2022. Sua recuperação veio apenas no segundo semestre de 2024, com auge de 4% de crescimento anual, registrado no primeiro trimestre de 2025.

Tal aceleração acompanhou o bom resultado do PIB de 2024 (3,4%), mas já mostra sinais de moderação. A manutenção de taxas de juros reais acima de 9%, derivadas de uma taxa de inflação acima da meta, é um obstáculo significativo.

Cabe destacar que a aceleração da inflação a partir de 2021 foi um fenômeno global. A pandemia de Covid-19 gerou interrupção na cadeia de suprimentos, com desequilíbrios de oferta e demanda, além da necessidade de estímulos fiscais e monetários para ampliar a demanda agregada e enfrentar a forte crise econômica.

A crise energética, que elevou os preços de combustíveis; a guerra na Ucrânia, que impactou a oferta global de alimentos e energia; e eventos climáticos extremos, que prejudicaram a produção agrícola, compuseram o atual quadro inflacionário.

Gráfico 3 | Preços dos insumos siderúrgicos e dos produtos (US\$/tonelada)



Fonte: Elaboração própria com base em CRU (2025).

São as condições do mercado doméstico, no entanto, que determinam a capacidade do setor em repassar aumentos de custo e, quando possível, incrementar as margens. Isso porque a demanda por aço é relativamente inelástica,⁸ em função da baixa flexibilidade de projetos em andamento de infraestrutura, construção e manufatura para substituir o aço ou reduzir seu uso, independentemente das oscilações conjunturais nos preços. Por outro lado, a rentabilidade das siderúrgicas é limitada por desacelerações na economia ou por mudanças bruscas na demanda.

⁸ A associação entre preço e demanda (consumo aparente) é dada pela correlação entre essas variáveis. Já a elasticidade-preço da demanda indica a sensibilidade da demanda à variação do preço, ou seja, o quanto o vendedor consegue absorver ou repassar aumentos de custos.

Comércio internacional de aço

A parcela de produtos acabados e semiacabados de aço exportada no mundo foi de 25,5% do total produzido em 2024 (World Steel Association, c2025b). A China liderou as exportações líquidas, com 108,4 milhões de toneladas em 2024, volume suficiente para abastecer os 18 maiores importadores líquidos globais somados. O Brasil ocupou a sétima posição nas exportações líquidas, com 3,9 milhões de toneladas, e a 12^a nas exportações totais, com 10,3 milhões (Tabela 4).

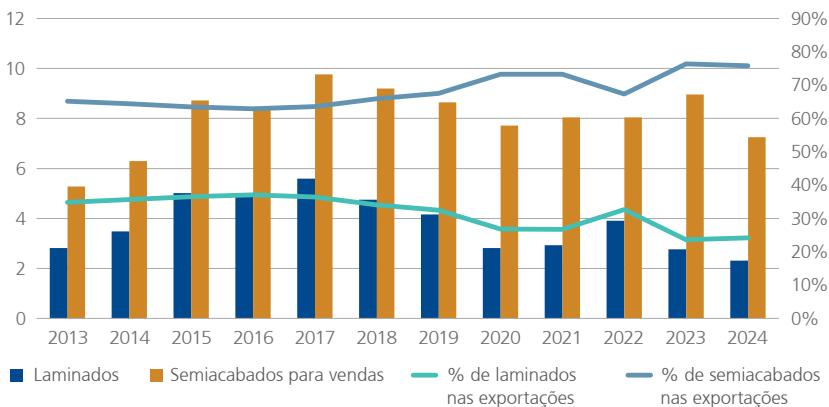
Tabela 4 | Maiores exportadores de aço 2024 (milhões de toneladas)

Ranking	País	Exportações totais
1	China	117,1
2	Japão	31,2
3	Coreia do Sul	28
4	Alemanha	22,6
5	Turquia	17
6	Bélgica	15,4
7	Itália	15
8	Vietnã	13,4
9	Rússia	12,3
10	Indonésia	11,4
11	Irã	10,8
12	Brasil	10,3
13	França	9,8
14	Índia	9,7
15	Malásia	9,4

Fonte: Adaptado de World Steel Association (c2025b).

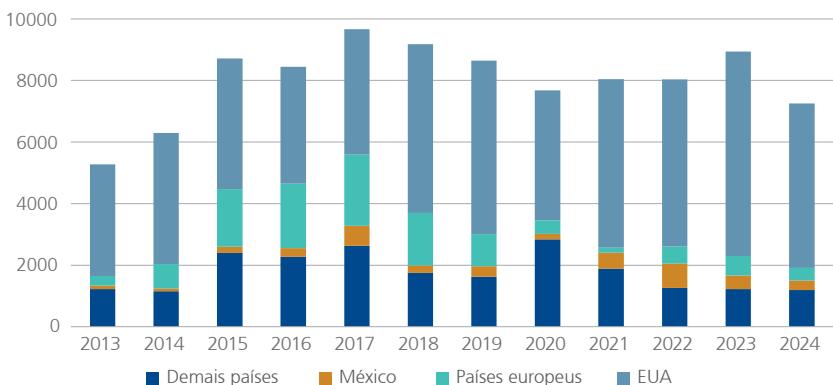
O perfil das exportações brasileiras de aço mudou na última década. Conforme indicado na seção “Desempenho do mercado interno: consumo e produção”, a instalação das plantas da CSA e da CSP expandiu a exportação de produtos semiacabados, que passaram a representar 76% do total das exportações de produtos siderúrgicos. Contudo, o ano de 2024 foi desfavorável tanto para os semiacabados quanto para os laminados, registrando o pior resultado para o volume total exportado desde 2013 e queda de 18,8% comparado a 2023 (Gráfico 4).

Gráfico 4 | Exportações brasileiras de produtos siderúrgicos (milhões de toneladas)



Fonte: Adaptado de IABr (2025b).

Ao observarmos o destino das exportações brasileiras de semiacabados (Gráfico 5), vemos que as principais perdas estão no mercado europeu. Entre 2015 e 2024, o volume de exportações para a Europa caiu 88,5%, e a participação desse mercado no total das exportações brasileiras recuou mais de 15 pontos percentuais. A maior parte desse movimento é explicada pela venda da CSA para a Ternium, que transferiu as vendas de cerca de 40% da produção da companhia da Europa para o mercado estadunidense. Outro fator negativo é que o volume de vendas para o restante do mundo também caiu 42% no período.

Gráfico 5 | Exportações brasileiras de semiacabados (mil toneladas)

Fonte: Adaptado de IABr (2025b).

Esse aumento da exposição dos exportadores de aço semiacabado aos EUA, que alcançou 73,6% das exportações em 2024, tornou-se motivo de apreensão a partir de 2018. Ainda que diferentes governos estadunidenses aplicassem, desde os anos 1990, tarifas *antidumping* a produtos específicos de aço brasileiro, como tubos, chapas de aço carbono cortadas e aço laminado a frio, foi o governo Trump, em 2018, que utilizou a Seção 232 do Ato de Expansão do Comércio⁹ para elevar as tarifas sobre o aço importado a 25%. Graças a um acordo firmado pelo Brasil no mesmo ano, que garantiu cotas de exportação isentas de tarifas, os impactos foram mitigados.

Como observado no Gráfico 4, no entanto, houve queda de 58,6% nas exportações de laminados no período 2017-2024. A preocupação com esse movimento aumentou em fevereiro de 2025, quando o novo governo Trump anunciou tarifas de 25% sobre as importações de aço – inclusive as provenientes do Brasil. Em junho, tais tarifas foram majoradas a

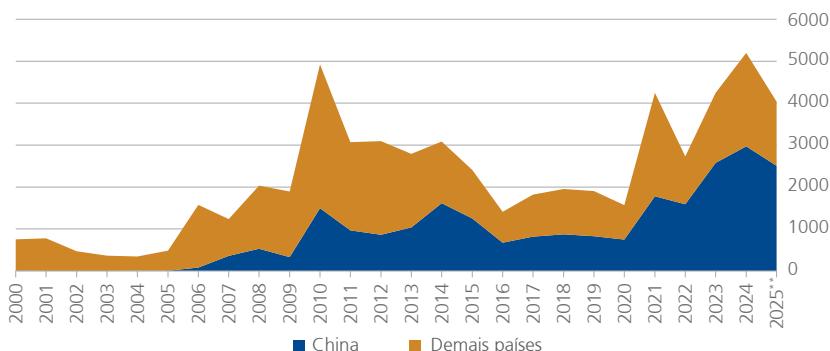
⁹ A Seção 232 do Ato de Expansão do Comércio de 1962 dos EUA autoriza a restrição de importações para a proteção da segurança nacional. Exemplo da incidência da norma é a elevação das tarifas de importação de aço e alumínio em 2018, reiteradas em 2020, pelo Departamento de Comércio (DOC, na sigla em inglês) dos EUA.

50% e, em agosto, outros quatrocentos produtos, como vagões de trem e equipamentos de construção, foram incluídos nessa lista.

As dificuldades enfrentadas pelos produtores nacionais no comércio internacional se somam aos desafios domésticos. Por um lado, observa-se a estagnação da demanda no Brasil, conforme mencionado na seção “Desempenho do mercado interno: consumo e produção”. Por outro lado, há o avanço das importações de origem chinesa.

Analizando o Gráfico 6, podemos dividir a participação chinesa no mercado brasileiro de aço em quatro períodos: de 2000-2006, quando era praticamente irrelevante; de 2007-2013, quando passou a representar cerca de um terço do mercado; a partir de 2014, quando o patamar subiu para metade das importações; e a partir de 2023, quando o nível subiu para cerca de 60%. Vale notar ainda que, entre 2018 e 2024, o aumento no volume importado pelo Brasil teve 64,5% de origem chinesa.

Gráfico 6 | Participação chinesa nas importações de aço planos e longos do Brasil (mil toneladas)*



Fonte: Elaboração própria com base nos dados de exportação e importação divulgados pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) por meio do Comex Stat. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 24 set. 2025.

* Foram considerados os produtos de aço mais representativos (códigos SH4 7207, 7208, 7209, 7210, 7219, 7225, 7213, 7217, 7228, 7216, 7214 e 7222).

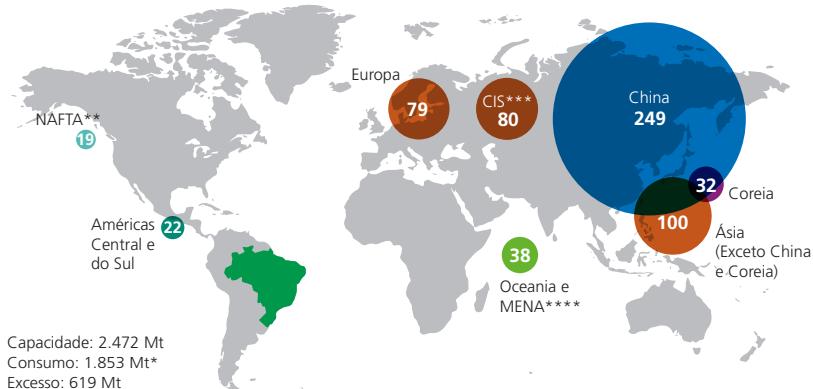
**Dados até agosto de 2025.

Para mitigar os impactos desse movimento sobre a indústria siderúrgica nacional, que chegou a ficar abaixo dos 63% de utilização da capacidade na produção de aço bruto em 2023 (IABr, 2025b), o Comitê Executivo de Gestão da Câmara de Comércio Exterior (Gecex-Camex) instituiu cotas de importação, acima das quais passou a incidir tarifa de 25%, em 11 categorias de mercadorias classificadas pela Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM) ligadas ao aço, em abril de 2024. Visando preservar empregos e impulsionar investimentos, o número de NCMs subiu para 23, e a alíquota foi renovada por mais 12 meses, em maio de 2025.

A tarifa de 25% dialoga com os valores obtidos ao segregar por país os preços de importação dos laminados planos:¹⁰ os produtos chineses tendem a custar 30% menos em relação a outros grandes *players*. Isso não impressiona, considerando o excesso de capacidade de produção e as margens de retorno frequentemente próximas de zero praticadas pela siderurgia chinesa. Como resultado, surgem alegações de práticas de comércio desleal. A China foi responsável por 27% das medidas *antidumping* e de direitos compensatórios que alcançaram decisões finais afirmativas entre 2019 e 2023 (Carvalho; Pazos, 2024).

10 Conforme dados da plataforma Comex Stat para o período de 2018-2023. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 25 set. 2025.

Figura 2 | Excesso de capacidade na indústria siderúrgica por país/região (em milhões de toneladas)



Fonte: Adaptado de IABr ([2025a]).

*Consumo de aço bruto equivalente.

** Acordo de Livre Comércio da América do Norte (NAFTA, na sigla em inglês): tratado comercial cujos signatários foram Canadá, EUA e México. Vigorou de 1994 a 2020 e foi substituído em 2020 pelo United States-Mexico-Canada Agreement (USMCA).

*** Comunidade dos Estados Independentes (CIS, na sigla em inglês): organização regional formada por antigas repúblicas soviéticas após a dissolução da União Soviética em 1991.

**** Oriente Médio e Norte da África (MENA, na sigla em inglês): região que inclui países do Oriente Médio e do Norte da África.

Análise de competitividade entre países

Fatores para a competitividade do Brasil

O Brasil é um polo competitivo da siderurgia mundial, com a maior parte de sua produção situada no primeiro e no segundo quartis de custos na produção de aço bruto. Com matérias-primas que incluem minério de ferro, redutores e ligas, o custo brasileiro na rota integrada está em US\$ 383/t, diante de US\$ 411,7/t na média mundial. Segundo o grupo de consultoria CRU (2024c), os destaques de custos nacionais são

a usina de Monlevade e as plantas mais recentes, Arcelormittal Pecém¹¹ e Ternium Brasil (antiga CSA).

Além do bom posicionamento nos custos,¹² a produção nacional apresenta as seguintes vantagens competitivas:

- grande ocorrência de minério de ferro de alto teor e reduzido índice de impurezas, em território nacional;
- integração da infraestrutura e eficiência logística entre produção e comercialização de aço (sistemas mina-ferrovia-porto);
- disponibilidade e, em muitos casos, autogeração de energia elétrica. Na rota integrada, o custo da energia está em US\$ 28,6/t, diante de US\$ 51,7/t na média global;
- disponibilidade de recursos humanos qualificados;
- processo produtivo atualizado em termos tecnológicos e com grande abrangência do conjunto de produtos; e
- boa escala de produção, decorrente do tamanho do mercado interno e da possibilidade de acessar outros mercados por meio da estrutura portuária.

11 Em março de 2023, a Arcelormittal concluiu a aquisição da CSP, renomeada Arcelormittal Pecém, por um valor empresarial em torno de US\$ 2,2 bilhões. A CSP é uma operação de classe mundial, produzindo placas de alta qualidade a um custo globalmente competitivo. A planta, inaugurada em 2016, opera um alto-forno com capacidade de 3 milhões de toneladas e tem acesso, por meio de correias transportadoras, ao porto do Pecém, com águas profundas de grande escala, localizado a dez quilômetros. A aquisição oferece sinergias e traz o potencial para futuras expansões, como a opção de adicionar capacidade de produção primária de aço (incluindo ferro de redução direta) e capacidade de laminatura e acabamento. A CSP também pode se tornar um polo de aço de baixo carbono, aproveitando a ambição do Ceará de desenvolver um polo de hidrogênio verde de baixo custo em Pecém.

12 A vantagem de custo era maior no começo dos anos 2000, quando as empresas brasileiras tinham operações de siderurgia e mineração integradas, possibilitando que o preço do minério de ferro praticado *intercompany* fosse inferior ao preço de mercado, favorecendo o resultado da siderurgia.

Como desvantagens estão a dependência de importação de carvão mineral, a tributação alta e complexa,¹³ o baixo crescimento do mercado doméstico e os custos de transporte marítimo do aço para outras regiões do mundo. Este último fator protege o mercado interno, mas exerce pressão sobre os preços de exportação.

Perspectivas para a competitividade

Para 2035, o CRU (2024a) projeta que o custo do aço bruto produzido no Brasil estará no primeiro quartil global. Ou seja, há expectativa de que as vantagens comparativas da produção nacional se mantenham, com o custo do aço bruto produzido permanecendo entre os 25% mais baratos do mundo. O destaque seria a redução relativa nos custos de matéria-prima, com o Brasil subindo da quarta para a segunda posição mundial. Isso porque o México deverá passar pela reabertura de um produtor inativo de alto custo, e a Rússia deverá ser afetada pela intensidade de uso do processo que combina o método de redução direta de ferro (*direct reduced iron – DRI*), também conhecido como ferro esponja, ao método EAF, que verá aumento nos prêmios das pelotas de redução direta (*direct reduction – DR*) usadas como matéria-prima. O Gráfico 7 apresenta a composição do custo estimado para a produção de aço bruto por país.

13 A reforma tributária dos impostos indiretos (Emenda Constitucional 132, de 20 de dezembro de 2023) reduzirá essa complexidade, ao unificar, até 2033, o Programa de Integração Social (PIS), a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (Cofins), o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), o Imposto sobre Serviços de Qualquer Natureza (ISS) e o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI).

Índia e Rússia: concorrentes siderúrgicos de baixo custo

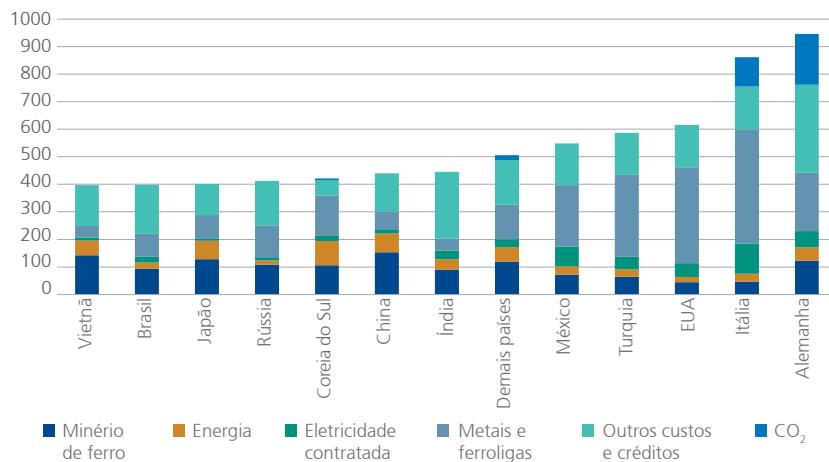
A indústria siderúrgica Indiana teve crescimento notável nos últimos vinte anos, passando de 27 milhões de toneladas em 2000 para 136 milhões de toneladas de aço bruto em 2023, consolidando-se como a segunda maior indústria siderúrgica do mundo, atrás apenas da China. Sua vantagem competitiva no cenário global é atribuída à ampla disponibilidade de mão de obra de baixo custo e à presença de abundantes reservas de minério de ferro – a Índia possui a quinta maior reserva de minério de ferro mundial (IBEF, 2025).

Esses fatores, aliados ao forte crescimento do mercado doméstico e a políticas governamentais favoráveis, como a National Steel Policy, que visa promover a autossuficiência do país em aço até 2030 (300 Mt), reforçam a competitividade da Índia na indústria siderúrgica global nos próximos anos.

A produção siderúrgica russa foi de 75 milhões de toneladas de aço bruto por ano em 2023, e sua capacidade atual é de 88 milhões de toneladas por ano. É uma indústria competitiva devido ao baixo custo e à abundância de carvão metalúrgico e de minério de ferro no mercado doméstico. A Rússia é o quinto maior produtor de minério de ferro do mundo, com 107 milhões de toneladas produzidas em 2021. Além disso, o país é o segundo maior exportador de carvão metalúrgico e o terceiro maior exportador de carvão térmico, com uma participação global de 16% e 17%, respectivamente, em 2021 (CRU, 2022).

Com vastas reservas e proximidade das minas às siderúrgicas, a Rússia consegue alcançar baixos custos de produção, aumentando a eficiência e a competitividade global de seus produtos de aço.

Gráfico 7 | Composição do custo estimado para a produção de aço bruto por país 2035 (US\$/mt)



Fonte: Elaboração própria com base em CRU (2024a).

O ganho de competitividade do Brasil se estende às primeiras etapas de produção do aço, a partir da redução dos custos das matérias-primas. Assim, a “parte quente” da produção siderúrgica brasileira, fundamental na atração de investimentos para a produção de placas de aço para exportação, nos anos 2010, seguirá competitivamente robusta.

Produção de baixo ou zero carbono

A produção de ferro-gusa, aço e ferro-ligas foi responsável por 6,2% do total de energia consumida no Brasil em 2024, e 19,7% do consumido pela indústria (EPE, 2025). No mundo, o percentual consumido pelo setor de ferro e aço é ainda maior, de 8% (IEA, 2020a). Há, no entanto, importância fundamental dessa indústria para a própria transição energética, ao fornecer aços leves e resistentes para tecnologias de energia renovável, veículos

elétricos, construções eficientes e ligas de aço que reduzem emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo das cadeias produtivas.

Conforme mencionado na seção “Estrutura da indústria siderúrgica”, o aço é produzido por meio das rotas integrada ou semi-integrada. Os produtores de usinas integradas operam as três principais etapas do processo siderúrgico: redução, refino e laminação. Isso significa que, na rota integrada, o aço é produzido a partir da redução do minério de ferro, principal fonte de insumo metálico nos altos-fornos (*blast furnace – BF*), tendo o carvão (mineral ou vegetal) como agente redutor. O resultado da redução é o ferro-gusa, que segue para refino em um conversor a oxigênio (*basic oxygen furnace – BOF*) para posterior laminação. Cabe ressaltar que o carvão vegetal só é usado em altos-fornos de menor capacidade.

Os produtores de usinas semi-integradas operam apenas duas etapas do processo siderúrgico: refino e laminação. Nessa rota, não há a redução, etapa na qual o minério de ferro é transformado em ferro-gusa. Na rota semi-integrada, os insumos metálicos são a sucata de aço, o ferro-gusa ou o DRI, usados para alimentar as aciarias elétricas, instalação industrial em que o EAF é o equipamento principal.

Cerca de 70% do aço bruto mundial (IEA, 2020a) é produzido¹⁴ a partir do minério de ferro na rota integrada (BF-BOF), sendo que cerca de 80% das emissões de GEEs da siderurgia são provenientes da etapa de redução do minério de ferro no alto-forno. Logo, a produção via rota semi-integrada, por não ter a etapa de redução, é menos emissora de GEE.

Os aços produzidos a partir da rota integrada tradicional ou da rota semi-integrada com DRI a carvão mineral como carga metálica têm nível de emissões superior a 1,4 tCO₂e/t aço bruto. Já o aço produzido a partir

14 Sendo o percentual restante produzido pela rota semi-integrada.

da rota semi-integrada tem nível de emissões entre 0,2 e 1,4 tCO₂e/t aço bruto, dependendo da carga metálica utilizada (como sucata e/ou DRI a gás natural). No Brasil, o Instituto Aço Brasil estima que suas associadas tenham nível de emissões de CO₂e (tCO₂e/t aço bruto) de 2,2 para as integradas a coque, de 0,7 para as integradas a carvão vegetal e de 0,4 para as semi-integradas (Fernandes *et al.*, 2024).

Tabela 5 | Categorias de aço de acordo com as emissões de CO₂ (tCO₂e/t aço bruto)

	Aço com nível de emissões padrão	Aço com nível de emissões reduzidas	Aço com nível de emissões baixas	Aço “verde”
Emissões de escopo 1	>1,4	0,6-1,4	0,2-0,6	<0,2
Emissões de escopo 1-3	>1,7	0,8-1,7	0,4-0,8	<0,4
	BF-BOF	BF-BOF com CCUS*	H2 BF-BOF	H2 DRI-EAF
	DRI (a carvão mineral) EAF	H2 DRI BF-BOF	BF-BOF a carvão vegetal	H2 DRI-SAF-BOF
Rotas tecnológicas	DRI (a gás natural) BF-BOF	DRI (a gás natural) EAF EAF	DRI (a gás natural) EAF DRI (a gás natural) SAF-BOF	
				Todos + CCUS*

Fonte: Elaboração própria com base em dados do CRU (2024b).

* Sigla em inglês para captura, utilização e armazenamento de carbono (*carbon capture, utilization and storage*).

Para cumprir as metas de aquecimento global do Acordo de Paris, a produção global de aço precisaria se enquadrar na categoria de aço “verde”.¹⁵ Segundo o CRU (2024b), cerca de 75% da atual produção global de aço está na categoria de emissões-padrão, e apenas 2% é classificada como aço “verde”. O desafio é complexo, considerando que as rotas

¹⁵ Hoje não há uma definição legalmente aceita de aço “verde” ou “de baixo carbono”, mas o produto provavelmente estará associado a emissões abaixo de 200 kg CO₂/t de aço bruto para o escopo 1 e abaixo de 400 kg CO₂/t de aço bruto para os escopos 1-3. O escopo 1 engloba emissões diretas de fontes controladas pelas empresas, como o processo industrial em si. O escopo 2 abrange emissões indiretas da energia adquirida. Já o escopo 3 inclui as demais emissões indiretas da cadeia de valor, como matérias-primas e descarte de resíduos.

tecnológicas adequadas para redução de emissões serão específicas, a depender dos custos regionais de matérias-primas, e a adoção de tecnologias disruptivas dependerá das escolhas sobre a tributação do carbono.

Projetos de expansão da produção

A longa vida útil dos equipamentos siderúrgicos torna sua substituição um desafio complexo e custoso. Como esses ativos geralmente duram décadas e representam grandes investimentos, a tendência é de que, no curto e médio prazos, a adoção de novas rotas tecnológicas ocorra em projetos *greenfield* de adição de capacidade, e não na substituição direta de equipamentos existentes.

Essa perspectiva encontra respaldo nas previsões do CRU (2025) para o período de 2025 a 2029, segundo as quais as adições de capacidade se darão cada vez mais via rota semi-integrada, em detrimento da rota integrada, caracterizando o movimento de transição climática na siderurgia. Conforme ilustrado pelo Gráfico 8, está prevista a adição de 41,5 milhões de toneladas até 2029.

Gráfico 8 | Variação na capacidade de produção de aço por tecnologia 2025-2029 (milhões de toneladas)



Fonte: Elaboração própria com base em dados do CRU (2025).

A exceção deverá se ater aos países do Sul e do Sudeste Asiático. Com mercados internos crescentes e pouco expostos à tributação sobre o carbono das nações ocidentais, países como a Índia deverão priorizar os custos reduzidos de capital (Capex) e operação (Opex) da rota integrada. As novas plantas semi-integradas de DR, por sua vez, deverão ser instaladas em maior diversidade de locais, com destaque a países com oferta abundante de gás natural, como os do Oriente Médio e o México, ou com metas rígidas de redução de emissões, como os da Europa e do Reino Unido.

Vale notar que, para o Brasil, essa é uma alternativa interessante de transição: usinas com processo de DR podem ter seu abastecimento alternado do gás natural para o hidrogênio verde sem necessidade de elevados investimentos. Com um gás competitivo, o qual já reduziria emissões, as usinas poderiam iniciar sua produção utilizando esse combustível e eventualmente migrar, a depender do prêmio oferecido pelo mercado ao aço “verde” e dos créditos de carbono. Por oportunidades como essa, e considerando uma maior disponibilidade futura de sucata no período até 2050, espera-se que a participação dos EAFs na produção global de aço bruto aumente até atingir 53%, em comparação com 28% em 2023 (Tabela 6). Esse crescimento será puxado pelas regiões desenvolvidas e pela China, onde haverá substituição da produção de aços longos via rota integrada (BF-BOF) pela rota semi-integrada baseada em sucata gerada pelo país asiático ao longo dos últimos 25 anos.

Tabela 6 | Proporção de EAF na produção de aço bruto mundial

País ou região	2024	2025	2030	2035	2040	2045	2050
América do Norte	68%	73%	75%	76%	80%	82%	84%
União Europeia e Reino Unido	42%	43%	54%	59%	71%	76%	82%
China	9%	9%	16%	26%	32%	36%	40%
Índia	51%	50%	47%	47%	46%	45%	44%
América Latina	47%	47%	49%	50%	50%	51%	51%
Mundo	28%	29%	36%	44%	49%	51%	53%

Fonte: Elaboração própria com base em dados do CRU (2024b).

As regiões desenvolvidas migrarão a produção de aços planos para a rota semi-integrada, já que a maior parte de sua produção de aços longos já utiliza a rota EAF. Tal expansão, baseada em DRI, será mais desafiadora dadas as limitações técnicas e de matérias-primas. Nesse caso, a rota DRI-melter-BOF¹⁶ poderá surgir como uma alternativa, com taxa composta de crescimento anual (CAGR) esperada de 16% entre 2030 e 2050.¹⁷ No entanto, essa participação na produção total será limitada, e o crescimento futuro dependerá de escalabilidade, desempenho técnico e viabilidade econômica.

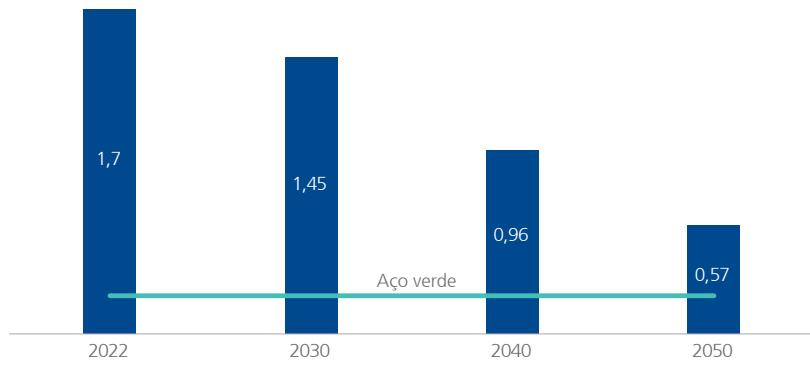
Projeções e metas de descarbonização

Conforme ilustrado no Gráfico 9, a combinação de tecnologias conhecidas e novas permitirá reduzir as emissões de escopo 1 da siderurgia em cerca de 67% até 2050, segundo dados do CRU (2024b), e de 54%, se considerarmos a análise da IEA (2020b).

¹⁶ Tecnologia que utiliza DRI de baixa qualidade e um forno elétrico de fusão para produzir metal líquido, substituindo o alto-forno convencional.

¹⁷ Em 2050, espera-se que a produção de aço utilizando DRI-melter-BOF totalize 144 milhões de toneladas, ou 14% da produção total de BOFs e cerca de 7% da produção global de aço bruto.

Gráfico 9 | Intensidade de emissões (tCO₂e/t de aço bruto – escopo 1)



Fonte: Adaptado do CRU (2024b).

Embora as estimativas atuais indiquem que as três principais rotas tecnológicas (BF-BOF, DRI-EAF e DRI-melter-SAF) dominarão a produção mundial, com o uso mais intensivo das últimas duas liderando a descarbonização, a evolução da indústria, entretanto, dependerá da disponibilidade de recursos e das políticas locais de apoio específico. No Brasil, assim como em outras regiões com abundância de energia de baixo carbono, é razoável apostar na implantação de tecnologias como a eletrólise da água e a redução com hidrogênio. Além disso, considerando a capacidade de produção de biomassa de baixo custo no país, avanços regulatórios podem impulsionar a adoção de soluções com biomassa sustentável, para substituir o carvão mineral em processos siderúrgicos específicos.¹⁸

No entanto, a aceleração da descarbonização da indústria siderúrgica enfrenta alguns fatores limitantes, entre os quais podem ser destacados:

- restrições de fornecimento de minério de ferro de alta pureza, que limitam o uso da rota DRI-EAF;

¹⁸ Para mais detalhes, ver Fernandes *et al.* (2024).

- prontidão tecnológica da rota DRI-melter-BOF, que permite o uso de minério de ferro de menor pureza, limita o aumento de sua participação e, portanto, de sua contribuição na redução de emissões de GEE; e
- limitações técnicas e de custo que limitam o uso e o alcance do CCUS.

Até o momento, os resultados dos esforços da indústria para resolver essas restrições não foram suficientes para gerar otimismo quanto ao cumprimento das metas definidas pelo Acordo de Paris para a indústria siderúrgica até 2050.

Exportações sob o mecanismo de ajuste de fronteira de carbono

A proximidade dos prazos do Acordo de Paris deverá pressionar por novos esforços de descarbonização, incluindo regulamentações ambientais mais rigorosas. É provável que esse esforço dialogue com medidas protecionistas para evitar a fuga de carbono¹⁹ e se traduza em novas políticas e sistemas de comércio de emissões (*emissions trading system –ETS*) semelhantes ao mecanismo europeu de ajuste de fronteira de carbono (*carbon border adjustment mechanism – CBAM*),²⁰ contribuindo para regionalizar o comércio siderúrgico.

Entre outubro de 2023 e o fim de 2025, vigora a fase introdutória do CBAM, em que importadores de cimento, ferro, aço, alumínio, fertilizante, eletricidade e hidrogênio relatam as emissões incorporadas

¹⁹ A fuga de carbono se dá quando medidas adotadas para reduzir as emissões de carbono em uma região incentivam o aumento das emissões em outra, seja pela migração de indústrias intensivas em carbono para locais em que as regulamentações são mais brandas, seja pelo aumento das importações.

²⁰ O CBAM é um mecanismo aduaneiro de taxação de carbono para produtos exportados à União Europeia, cujo objetivo é igualar o preço do carbono das importações ao que pagariam no regime de comércio de licenças de emissão caso fossem produzidos em território europeu.

em seus produtos, sem implicações financeiras, para aprimorar a metodologia. As compras de certificado, que implicarão cobrança pelas emissões de carbono nas exportações à Europa em valor equivalente aos preços do ETS, começarão em 2026 e deverão se tornar mais caras e abrangentes setorialmente até a plena implementação, em 2034.

Isso encarecerá gradativamente a importação de produtos de aço de países com perfil de emissões mais alto na indústria siderúrgica, como Índia, Rússia e China.

A longo prazo, um maior comércio intrarregional e um fornecimento mais cativo se tornarão propostas de valor atraentes para os importadores europeus de aço semiacabado. Mesmo assim, uma vez que os investimentos previstos não indicam que a participação das importações no consumo total europeu será alterada até 2050, a região deverá continuar sendo uma importadora líquida de produtos semiacabados. Se isso se confirmar, o fornecimento será transferido para novas fontes ou se tornará mais caro.

Segundo estimativas do CRU (2024a), entre 2026 e 2035 o custo das emissões tende a aumentar, com o fim das alocações gratuitas. Como a União Europeia continuará sendo um importador líquido, projeta-se que os preços de importação impactem o mercado internacional.

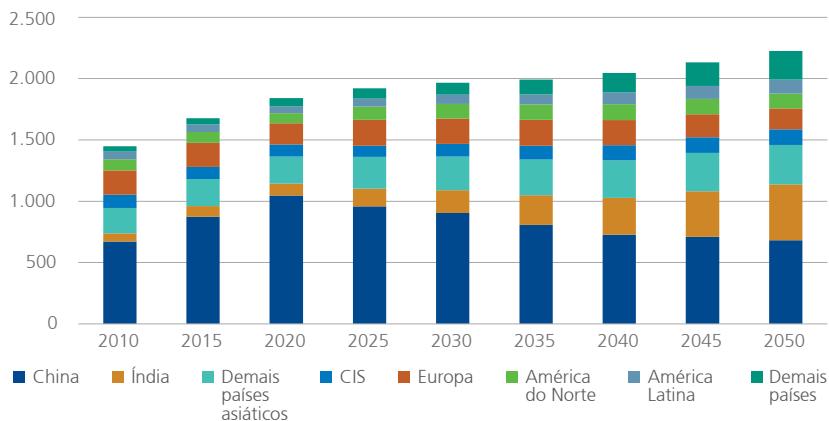
Tendências para a siderurgia mundial

Espera-se que as mudanças climáticas impactem negativamente o crescimento econômico global, especialmente nas regiões emergentes mais afetadas, como Índia e Oriente Médio. No entanto, a produção industrial deverá ser menos afetada do que o PIB, já que a necessidade

de adaptação a eventos climáticos extremos e ao aumento do nível do mar impulsionará investimentos e construções.

Nesse cenário, a produção global de aço bruto deverá atingir cerca de 2,2 bilhões de toneladas em 2050, ao passo que se reverterá a tendência dos últimos 25 anos, marcada pelo crescimento liderado pela China. A produção chinesa deverá sofrer uma queda, enquanto países em desenvolvimento, como a Índia, terão crescimento significativo (Gráfico 10).

Gráfico 10 | Produção de aço bruto (milhões de toneladas)*

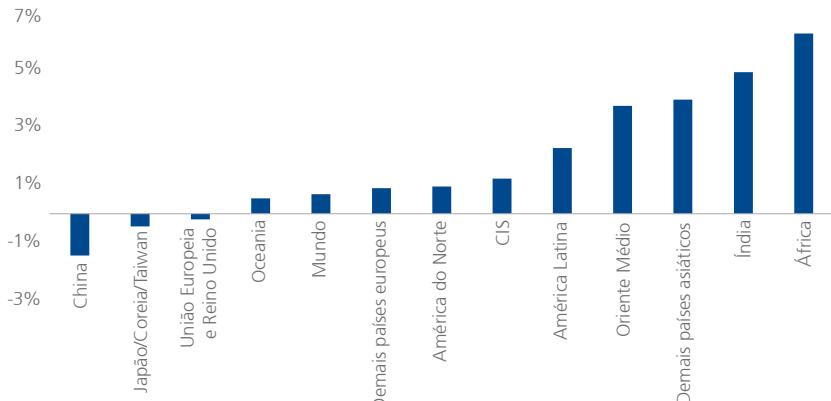


Fonte: Elaboração própria com base em dados do CRU (2024b).

*Valores para 2025 a 2050 foram estimados.

Como resultado, estima-se que a participação da China na produção global de aço bruto diminuirá de 50%, em 2025, para 31%, em 2050. Já a participação somada da Índia, da América Latina e da África terá crescimento de 12% para 30%, puxado por uma demanda dos países em desenvolvimento típica de movimentos de industrialização e expansão da infraestrutura (CRU, 2024b).

**Gráfico 11 | Crescimento da demanda por produtos semiacabados de aço
2022-2050 (CAGR %)**



Fonte: Elaboração própria com base em dados do CRU (2024b).

Apesar do crescimento da demanda por aço, conforme observado no Gráfico 11, a taxa de crescimento da produção de aço global tende a desacelerar, tendo em vista o impacto da queda esperada na produção chinesa – ainda muito representativa e que continuará como a maior produtora mundial de aço.

Nas regiões desenvolvidas, a produção de aço alcançou seu ápice em 2007. Desde então, passou por oscilações conforme o ciclo econômico global, mas nunca retornou aos níveis anteriores à crise financeira. A expectativa é de que esses patamares fiquem no passado, mas ainda assim a produção de aço bruto nessas áreas poderá apresentar crescimento entre 2025 e 2040, impulsionado pela demanda adicional do setor energético. A transição para energias renováveis e hidrogênio, intensivas no uso do aço, pode estimular o aumento da demanda na América do Norte, na União Europeia e no Reino Unido.

Com metas mais rigorosas de descarbonização e com ferramentas de mercado para garantir seu cumprimento, a produção siderúrgica nos

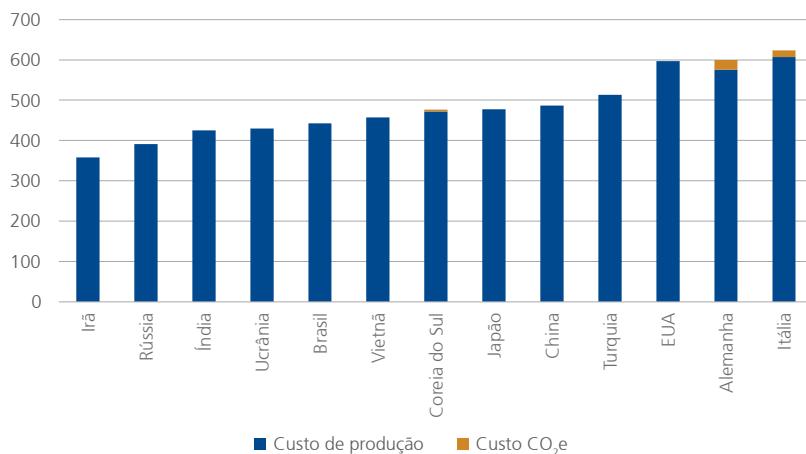
países desenvolvidos deverá enfrentar custos de produção mais altos, passando por substanciais investimentos relacionados à adoção de novas tecnologias descarbonizantes.

Para contrapor esse desafio, movimentos protecionistas podem aumentar. Governos como os do Reino Unido, da Sérvia, da Turquia, da Austrália e da China já começaram a desenvolver esquemas domésticos de precificação e comércio de carbono para garantir condições de concorrência equitativas e proteger seus produtores nacionais. O comércio global do aço também poderá sofrer com a perspectiva de expansão da capacidade produtiva em regiões como a Ásia, o Oriente Médio e a América do Norte, conforme buscam atender ao crescimento de suas demandas internas e diminuem sua necessidade de importações.

Rússia, Comunidade dos Estados Independentes (CIS, na sigla em inglês),²¹ Índia e Oriente Médio devem aumentar suas participações nas exportações globais, sendo fornecedores de menor custo, conforme se observa nos gráficos 12 e 13. O perfil dessas exportações, no entanto, poderá diferir entre casos em que o aço de baixa emissão de carbono será uma alternativa competitiva, como no Oriente Médio, e outros em que a competição de preço pelos produtos tradicionais deve predominar, como na CEI, que expandirá sua posição de exportadora líquida de aço, sem perspectivas de que haja ambição política ou prêmios suficientes pagos pelos produtos de baixa emissão nos mercados desenvolvidos, para tornar atrativa a readequação de suas plantas.

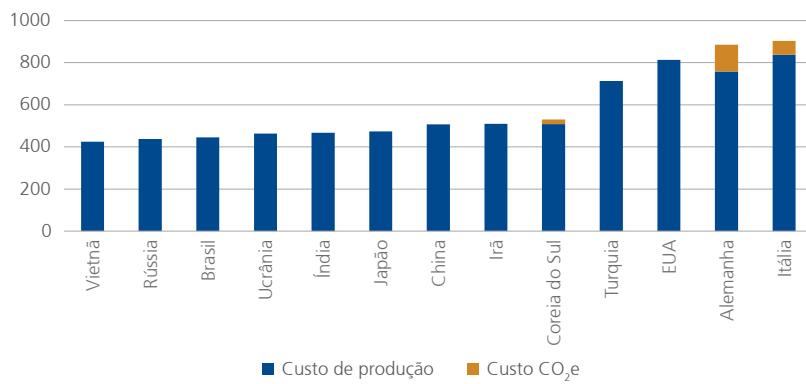
21 Os Estados-membros da CIS incluem: Rússia, Armênia, Azerbaijão, Bielorrússia, Cazaquistão, Quirguistão, Moldávia, Tadziquistão e Uzbequistão. Turcomenistão participa como membro associado.

Gráfico 12 | Custo médio de aço bruto por país 2024 (US\$/tonelada)



Fonte: Elaboração própria com base em dados do CRU (2024c).

Gráfico 13 | Custo médio de aço bruto por país 2035 (US\$/tonelada)



Fonte: Elaboração própria com base em dados do CRU (2024c).

As exportações chinesas, por outro lado, devem cair significativamente no longo prazo, à medida que o país transita de um modelo de crescimento liderado por investimentos para um modelo liderado por serviços e produtos de maior valor adicionado. A expectativa do

CRU (2024b) é de que as exportações chinesas atinjam 22% do total global de exportações líquidas em 2050, de um pico histórico de 57%.

Considerações finais: visão e oportunidades para a siderurgia brasileira

A indústria siderúrgica brasileira está bem posicionada em dois caminhos principais: fortalecimento do mercado doméstico, a partir da retomada do crescimento industrial e de grandes investimentos projetados em infraestrutura, com ampliação da oferta de produtos competitivos no mercado; e posicionamento estratégico como plataforma de soluções verdes para mercados internacionais que serão importadores líquidos na cadeia do aço, como deve ser o caso da União Europeia, diante das barreiras associadas às políticas de descarbonização.

Essas são perspectivas bem fundamentadas não apenas pela competitividade de custos, característica da siderurgia brasileira e que tende a ser ainda mais favorável nos próximos anos, mas também pelo potencial destacado do país para produzir ferro e aço de baixo carbono. Esse potencial decorre de fatores como: matriz energética predominantemente renovável, comprovada capacidade de produzir biomassa certificada de baixo custo em escala, abundantes reservas de minério de ferro de alta qualidade e vantagens competitivas para a produção de hidrogênio de baixo carbono, principalmente pela disponibilidade de oferta contínua de energia renovável de baixo custo em função do sistema elétrico integrado e da matriz energética diversificada com elevada presença de geração hídrica.

Fortalecimento do mercado doméstico

Nos próximos anos, o comércio global de aço deve seguir marcado por instabilidades. Compradores de metade do aço brasileiro, os EUA deverão seguir com uma postura protecionista oscilante e imprevisível. Na Europa, o monitoramento dos avanços regulatórios e a garantia de que as certificações ambientais brasileiras sejam aceitas cumprirão papel cada vez mais central no acesso ao principal mercado importador de aço do mundo. Enquanto isso, a China deverá seguir inundando os mercados globais com o aço excedente que produz – ainda que de forma decrescente.

Dante desse cenário, e após uma década de relativa estagnação no mercado interno que gerou ociosidade na indústria siderúrgica, o Brasil deve buscar fortalecer os canais de direcionamento da demanda nacional para o aço doméstico. Isso se manterá como fator primordial para garantir a saúde financeira das siderúrgicas instaladas em território nacional, impulsionando sua capacidade de investimento, bem como a das cadeias produtivas relacionadas, em um momento de transição tecnológica no setor.

A elevação para 25% do imposto de importação sobre categorias de mercadorias ligadas ao aço, a partir de abril de 2024, sobre o volume excedente às cotas de importação se insere nesse contexto. E a interlocução entre indústrias e agentes de governo deve fundamentar a busca por uma dinâmica de mercado que favoreça todo o setor industrial brasileiro, considerando os custos do protecionismo e visões de curto, médio e longo prazos.

Dessa interação, espera-se que as produtoras de aço ganhem previsibilidade sobre o cenário prospectivo e avancem em investimentos de expansão, modernização e melhoria de eficiência operacional,

contribuindo diretamente para a redução de emissões de GEE. Para isso, será importante que os investimentos públicos e privados sejam planejados e direcionados de forma a atender a uma agenda de desenvolvimento produtivo e descarbonização. Também será necessário manter o diálogo aberto com o setor produtivo sobre os possíveis impactos gerados pela edição de atos normativos que imponham custos adicionais aos investimentos em usinas de ferro e aço verdes, como é o caso da exigência de criação de novas fontes de energia renovável em projetos nas zonas de processamento de exportação (ZPE), prevista na recente Medida Provisória 1.307/2025.

Com metas definidas de redução de emissões e atribuição de custos associados à regulamentação de mercados de carbono, também aumentará a exigência de avançar em políticas e soluções de mercado que impulsionem a elevação da disponibilidade e uso de sucata, promovam uma maior inserção e sustentabilidade da biomassa e assegurem a disponibilidade de gás natural competitivo.

Plataforma para produtos siderúrgicos verdes

Diversas vantagens comparativas colocam o Brasil em boa posição para a oferta de soluções globais para descarbonização da siderurgia por meio da produção de ferro e aço verdes. Afinal, o país agrega um longo histórico de exportador líquido de ferro e aço aos novos fatores competitivos da indústria verde (Quadro 1), principalmente de placas semiacabadas, com base na competitividade de custo da produção nacional.

Quadro 1 | Fatores-chave, oportunidades e desafios para o Brasil produzir ferro e aço verdes

Fatores-chave	Oportunidade	Desafio
Matriz energética predominantemente renovável do Brasil	<ul style="list-style-type: none"> Energia de menor intensidade de emissão de carbono, proporcionando uma produção via EAF mais verde do que os pares consumidores de energia de origem fóssil. Uso de energia elétrica para a redução do minério de ferro por meio de um processo baseado em eletrólise. 	<ul style="list-style-type: none"> Geração limitada de sucata no país para aumento da produção via EAF. Comprovação de escala comercial do processo de eletrólise de ferro fundido.
Capacidade de produzir biomassa certificada em escala	<ul style="list-style-type: none"> Uso como insumo sustentável no processo produtivo advindo da captura biogênica das florestas plantadas com essa finalidade. 	<ul style="list-style-type: none"> Escassez de áreas disponíveis para o plantio de florestas dentro de um raio econômico viável. Limitação da capacidade de produção dos altos-fornos a carvão vegetal devido às características de friabilidade do carvão vegetal.
Reservas abundantes de minério de ferro de alta qualidade	<ul style="list-style-type: none"> Otimização da composição da carga metálica que alimenta o alto-forno na produção de ferrogusa pode resultar na redução do consumo de carvão como agente redutor. Matéria-prima essencial para a produção de ferro via DRI. 	<ul style="list-style-type: none"> Elevar a oferta atual diante de restrições relacionadas a licenciamento e viabilização econômico-financeira de projetos dependentes de novas infraestruturas.
Tecnologia de autorredução	<ul style="list-style-type: none"> Redução de consumo energético, uma vez que os aglomerados autorredutores são produzidos e curados a frio. Possibilidade de uso de biomassa como fonte energética. 	<ul style="list-style-type: none"> Escalabilidade.
Hidrogênio de baixo carbono	<ul style="list-style-type: none"> Substituição do carbono como fonte de calor e agente de redução por hidrogênio de carbono zero obtido pela eletrólise ou de baixo carbono derivado da reforma do metano a vapor. 	<ul style="list-style-type: none"> Redução de custos, escalabilidade, infraestrutura de distribuição.

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Fernandes et al. (2024).

A crescente demanda por produtos siderúrgicos semiacabados, atrelada a medidas de protecionismo ambiental, constitui uma oportunidade estratégica para a indústria siderúrgica brasileira se inserir na cadeia produtiva europeia, aproveitando sua vantagem competitiva nesse setor.

Outra oportunidade, ainda com bastante expressividade na Europa, mas que poderá atender ao mercado global de forma mais ampla, é a oferta de ferro primário verde. Para o Brasil, esse produto agrupa valor em relação ao cenário de exportações predominantemente concentradas no minério de ferro. É provável, ainda, que diversos países se esforcem para manter bases consistentes na indústria siderúrgica, mas não possuam condições favoráveis, em termos de reservas de minério e energia limpa, para serem autossuficientes no ferro verde.

Nesse sentido, a Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos e para a Transformação Ecológica (BIP)²² já contempla um projeto com Capex de US\$ 2,5 bilhões, da empresa Vale, e outro com Capex de US\$ 2,9 bilhões, da empresa Stegra, para construção de polos industriais para produção de hidrogênio verde e ferro briquetado a quente (HBI) para descarbonização da siderurgia. Esse tipo de iniciativa contribui para viabilizar a inserção internacional da indústria e ampliar suas condições de competição, ao fomentar a inovação e adaptar-se às crescentes demandas internacionais por sustentabilidade. Em um contexto mais específico, a instalação de usinas de grande porte para produção de ferro e aço verdes representará relevante contribuição para o desenvolvimento da cadeia de hidrogênio de baixo carbono no

22 Iniciativa conjunta do Ministério da Fazenda (MF), Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA), Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) e Ministério de Minas e Energia (MME), no âmbito do Novo Brasil – Plano de Transformação Ecológica, que busca mobilizar capitais público e privado para o financiamento de projetos que contribuam para a transição climática. Mais informações sobre a BIP estão disponíveis em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica/bip>.

Brasil, devido à maior eficiência da produção integrada de hidrogênio aplicado diretamente a produtos de baixo carbono.

A produção de ferro e aço verdes deve ser impulsionada pela implantação de um sistema de precificação de carbono no Brasil, incentivando a adoção de tecnologias necessárias para a descarbonização e adequando a produção nacional às exigências para obtenção de certificados de emissões embutidas. Ao comprovar o pagamento das emissões de carbono no país de origem, o CBAM permite que esse valor seja deduzido para o importador na União Europeia, evitando a dupla cobrança. Além disso, quando a transação pelo carbono emitido é realizada no país, a receita gerada permanece dentro das fronteiras nacionais.

Para facilitar o acesso a mercados internacionais, o governo brasileiro poderia promover a aproximação comercial com empresas europeias em busca de fontes externas de produtos siderúrgicos verdes, incentivando o intercâmbio de investimentos e tecnologias. Também deve estar na agenda a negociação de acordos bilaterais que reconheçam as siderúrgicas brasileiras como fornecedoras qualificadas de produtos siderúrgicos semiacabados verdes, simplificando o processo de importação pelos parceiros europeus.

Por outro lado, o atraso na implementação de um sistema nacional de precificação de carbono e a ausência de um mecanismo de ajuste de fronteira no Brasil podem deixar o país vulnerável ao aumento da importação de produtos siderúrgicos com maior intensidade de carbono. Esse cenário é agravado pelo excesso mundial de capacidade de produção de aço. Isso porque, ao enfrentarem dificuldades de comercialização em mercados com regulamentação ambiental mais rígida, produtos com alta intensidade carbônica e preços abaixo do custo de produção doméstica podem invadir o mercado de países menos regulados.

Um dos principais riscos desse cenário é que o aumento das importações reduza o mercado interno em um momento-chave de transição regulatória e tecnológica da siderurgia global, consolidando uma perda de escala da siderurgia brasileira e dificultando a manutenção de sua viabilidade operacional, antes de completar a transição para a neutralidade carbônica.

A prioridade da descarbonização está expressa na Missão 5 da política industrial brasileira, a Nova Indústria Brasil (NIB), e vem avançando com o apoio do BNDES. O Programa Fundo Clima, por exemplo, aplica a parcela de recursos reembolsáveis do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima para apoiar a aquisição de máquinas e equipamentos, a implantação de empreendimentos e o desenvolvimento tecnológico relacionados à redução de emissões de GEE e à adaptação às mudanças climáticas e aos seus efeitos. Outro exemplo é o BNDES Mais Inovação, que apoia investimentos e projetos voltados à inovação e à digitalização, com recursos do Fundo de Amparo ao Trabalhador (FAT) remunerados pela Taxa Referencial (TR).

Nesse contexto, garantir o estabelecimento do Brasil como plataforma de produção siderúrgica competitiva de baixo carbono é uma oportunidade não apenas de agregar valor ao minério de ferro exportado, como também de impulsionar a produção industrial no país. Alinhado às diretrizes da NIB e do Plano de Transformação Ecológica, o sucesso nesse objetivo gerará empregos de maior qualificação, nacionalizará a produção de conhecimento científico e terá impactos positivos na balança comercial. Será necessário, no entanto, estar atento aos obstáculos derivados do crescente protecionismo global.

Referências

CARVALHO, A.; PAZOS, R. *Global Forum on Steel Excess Capacity (GFSEC): Steel Exports, Trade Remedy Actions and Sources of Excess Capacity.* [S. l.]: GFSEC, 2024. Disponível em: www.steelforum.org/content/dam/steel-forum/en/publications/gfsec-steel-exports-trade-remedy-actions-and-sources-of-excess-capacity_0525.pdf. Acesso em: 4 set. 2025.

CRU – COMMODITIES RESEARCH UNIT GROUP. *Russian Invasion Means Big Global Supply Gaps.* London: CRU, 2022. Disponível em: <https://cruonline.crugroup.com/analysis/article/141687/russian-invasion-means-big-global-supply-gaps>. Acesso em: 30 set. 2024.

CRU – COMMODITIES RESEARCH UNIT GROUP. *Crude Steel Market Outlook Report: Emerging Asian Production Growth Will Be Driven by BF-BOF.* London: CRU, 2024a. Disponível em: <https://cruonline.crugroup.com/analysis>. Acesso em: 30 set. 2024.

CRU – COMMODITIES RESEARCH UNIT GROUP. *Steel Long Term Market Outlook Report: Steel Value Chain Prices Set to Rise with Green Transition.* London: CRU, 2024b. Disponível em: <https://cruonline.crugroup.com/analysis>. Acesso em: 30 set. 2024.

CRU – COMMODITIES RESEARCH UNIT GROUP. *Benchmarking – Compare Metrics.* London: CRU, 2024c. Disponível em: <https://assetplatform.crugroup.com/>. Acesso em: 30 out. 2024.

CRU – COMMODITIES RESEARCH UNIT GROUP. *Steel Long Term Market Outlook Report: Europe Starts Shifting Towards More EAF-Based Production in the Medium Term.* London: CRU, 2025. Disponível em: <https://cruonline.crugroup.com/analysis>. Acesso em: 30 set. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2025.* Brasília, DF: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 24 set. 2025.

FERNANDES, P. D. et al. *Descarbonização da indústria de base: sumário executivo*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2024. 39 p. Disponível em: <http://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/25327>. Acesso em: 24 set. 2025.

IBEF – INDIA BRAND EQUITY FOUNDATION. Indian Steel Industry Analysis. IBEF, New Delhi, 2025. Disponível em: ibef.org/industry/steel-presentation. Acesso em: 4 set. 2025.

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. *Mercado brasileiro de aço 2024*. Rio de Janeiro: IABr, 2024. Disponível: https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2024/08/MBA_Edicao-2024.pdf. Acesso em: 4 set. 2025.

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. *Aço e economia 2025*. Rio de Janeiro: IABr, [2025a]. Disponível em: https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2025/09/Folder_AcoBrasil_Ecnomia_2025.pdf. Acesso em: 4 set. 2025.

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. *Anuário Estatístico*. Rio de Janeiro: IABr, 2025b. Disponível em: https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2025/08/AcoBrasil_Anuario_2025-1.pdf. Acesso em: 4 set. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking*. Paris: IEA, 2020a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. Acesso em: 30 set. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Iron and Steel Sector Direct CO₂ Emission Reductions by Current Technology Maturity Category in the Sustainable Development Scenario, 2019-2050*. Paris: IEA, 2020b. Disponível em: iea.org/data-and-statistics/charts/iron-and-steel-sector-direct-co2-emission-reductions-by-current-technology-maturity-category-in-the-sustainable-development-scenario-2019-2050. Acesso em: 4 set. 2025.

WORLD STEEL ASSOCIATION. #steelFacts. *Worldsteel Association*, Brussels, c2025a. Disponível em: <https://worldsteel.org/about-steel/facts/steelfacts/>. Acesso em: 4 set. 2025.

WORLD STEEL ASSOCIATION. World Steel in Figures 2025. *Worldsteel Association*, Brussels, c2025b. Disponível em: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2025/>. Acesso em: 4 set. 2025.

THE NEW URBAN AIR MOBILITY MARKET: RECENT DEVELOPMENTS AND CHALLENGES FOR EVTOLS AND BNDES – PART 1

Sérgio Bittencourt Varella Gomes

Renato Baran

Marcos Henrique Figueiredo Vital

*Breno Cerqueira Araujo**

Keywords: advanced air mobility (AAM); urban air mobility (UAM); air taxis; electrical vertical take-off and landing (eVTOL); Eve Air Mobility; Embraer.

* Respectively, engineers, economist and intern of the Foreign Trade Department 1 of the BNDES's Foreign Trade Division.

Resumo

A mobilidade aérea urbana (UAM, na sigla em inglês) utiliza aeronaves particulares, militares, táxis aéreos e diversos outros tipos voltados a um leque de missões em que o transporte terrestre não é o mais adequado. A nascente mobilidade aérea avançada (AAM, na sigla em inglês) incorpora a nova UAM. As aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical (eVTOL, na sigla em inglês) são a grande promessa para a AAM e para a UAM no curto prazo. O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), em seu tradicional papel de apoio à indústria, incluindo os compromissos assumidos no âmbito da Nova Indústria Brasil (NIB), já iniciou seu apoio a esse segmento inédito de transportes. Este estudo será dividido em duas partes. A primeira parte, que integra esta edição, apresenta um panorama do que está em curso, incluindo o desenvolvimento dos eVTOLs, destacando desafios e avanços nas configurações, aplicações e tecnologias, como propulsão elétrica e controle de voo autônomo, bem como uma comparação com a tecnologia dos helicópteros. A segunda parte, a ser publicada, abordará projeções de mercado, desafios da certificação e a integração dos eVTOLs no espaço aéreo urbano, finalizando com algumas tendências futuras.

Abstract

Whenever ground transportation means fall short of requirements, urban air mobility resorts to air charter helicopters, private and/or military aircraft etc. in order to accomplish specific missions. The nascent advanced air mobility (AAM) encompasses urban air mobility (UAM). For this latter case, electrical vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft appear to be a great promise for the near future. Brazilian Development Bank (BNDES) is already supporting this novel transportation segment, given its traditional industrial commitments and the role played in connection with New Industry Brazil (NIB), the country's public policy for industry. This study has two parts. Part 1 presents an overview of recent eVTOL developments, highlighting challenges, and advancements regarding aircraft configurations, use cases and technologies such as electrical propulsion, flight autonomy etc., including a comparison with helicopters. Part 2, to be published later, will address market size projections, certification challenges, and the integration of eVTOLs into the urban airspace, concluding with some future trends.

Introdução

Embora seja pouco lembrada hoje em dia, foi a partir de uma proposta nascida de um grupo de trabalho da empresa de aplicativos Uber, denominada Elevate White Paper, que deflagrou um interesse maior e bilhões de dólares em investimento (Warwick, 2024) para o desenvolvimento de aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical (*electrical vertical take-off and landing aircraft* – eVTOL). Tendo isso em vista, nota-se que os desenvolvimentos mais substanciais, ocorridos nessa área em todo o mundo desde 2022, indicam o surgimento de uma nova aviação, com diferentes impactos na cadeia produtiva do setor.

A utilização de eVTOLs em centros urbanos como modalidade de transporte, por exemplo *shuttle services* entre centros financeiros e aeroportos ou propriedades rurais, por via aérea, deverá reduzir a pressão por serviços de transporte terrestre individual nas grandes cidades.¹ Portanto, avanços em mobilidade aérea urbana beneficiam a sociedade como um todo. Em geral, esses veículos pesam entre 500 kg e 2.000 kg, com velocidades de cruzeiro que podem variar de 100 km/h a 300 km/h. O alcance também pode variar entre 50 km e 300 km, dependendo da capacidade da bateria e da eficiência do *design*.

Nesse sentido, é essencial disseminar o entendimento correto de todas as estruturas e sistemas em desenvolvimento, além dos possíveis desdobramentos vislumbrados, de modo que seja possível entender quais necessidades regulatórias devem ser atendidas para tornar a operação de eVTOLs segura e confiável.

1 Para o transporte executivo, por exemplo, à semelhança dos já existentes táxis aéreos, assim como no deslocamento de executivos e empresários de agronegócios em meio rural. Cada eVTOL substitui, potencialmente, até quatro automóveis de transporte executivo individual. Não é, entretanto, solução para transporte urbano de massa.

No que tange ao apoio governamental aos projetos dessa natureza no Brasil, vale citar a política Nova Indústria Brasil (NIB). De acordo com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), estão previstos investimentos da ordem de R\$ 300 bilhões até 2026, que serão repassados por intermédio do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii). A partir disso, a NIB contempla os seguintes eixos: (i) mais produtividade, a fim de ampliar a capacidade industrial, com aquisição de máquinas e equipamentos; (ii) mais inovação e digitalização, como projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação; (iii) mais verde, com projetos de sustentabilidade da indústria; e (iv) mais exportação, por meio de incentivos para o acesso ao mercado internacional.

O apoio ao desenvolvimento de eVTOLs está diretamente relacionado a duas dessas frentes, a saber:

- Missão 5: Bioeconomia, descarbonização e transição e segurança energéticas para garantir os recursos para futuras gerações. Um dos objetivos para alcançar a transformação ecológica na indústria é o aumento do uso da biodiversidade pela indústria, bem como a redução de 30% da emissão de carbono da indústria nacional, com 107 milhões de toneladas de CO₂ por trilhão de dólares produzido; e
- Missão 6: Tecnologias de interesse para a soberania e defesa nacionais. A meta é conseguir autonomia na produção de 50% das tecnologias críticas para fortalecer a soberania nacional.

Ainda de acordo com o MDIC, serão priorizadas ações voltadas ao desenvolvimento de energia nuclear, sistemas de comunicação e sensoriamento, sistemas de propulsão e veículos autônomos e remotamente controlados (Brasil..., 2024).

Algumas dessas iniciativas já foram deslanchadas, como o Programa BNDES Mais Inovação, operado pelo BNDES e pela Finep. Com o programa, estão previstos investimentos totais de R\$ 66 bilhões, dos quais R\$ 40 bilhões em crédito a condições de Taxa Referencial (TR) + 2% a.a. Essa modalidade apresenta os menores juros já aplicados para financiar a inovação no país.

A decisão estratégica de desenvolver o seu próprio eVTOL foi tomada pela Embraer ainda em 2021. Nesse mesmo ano, a empresa solicitou apoio ao BNDES, o qual decidiu fomentar o desenvolvimento do projeto desde o início da engenharia até o financiamento dos primeiros protótipos. A primeira operação foi realizada, então, em novembro de 2022, no valor total de R\$ 490 milhões, em favor da Eve Soluções de Mobilidade Aérea Urbana Ltda., empresa controlada pela Embraer.

A decisão do BNDES em 2022 foi posta em prática por meio da utilização das linhas/programas Incentivada A/Inovação, assim como pelo programa Fundo Clima, subprograma Mobilidade Urbana. Dessa forma, o apoio ao desenvolvimento do eVTOL brasileiro se deu não só pelo aspecto de inovação (disruptiva) que comporta, mas também pelos aspectos ambientais envolvidos, que serão discutidos adiante.

Posteriormente, em 2024, foi aprovado o financiamento, no valor de R\$ 500 milhões para a implantação da fábrica de eVTOLs em Taubaté-SP, por meio do Programa BNDES Mais Inovação – Investimento em Inovação, sendo aprovados, ainda em dezembro de 2024, outros R\$ 200 milhões para o desenvolvimento dos primeiros protótipos do Eve-100.

O presente estudo tem sua publicação dividida em duas partes. Nesta primeira parte, o tema está segmentado em quatro seções, além desta introdução e das considerações finais. Na primeira delas, será apresentada uma visão geral sobre essa nova modalidade de transporte e, na segunda,

serão abordadas suas principais características, explicando os conceitos de engenharia aeronáutica envolvidos e as diferentes configurações dos eVTOLs. Em seguida, serão vistos alguns dos principais modelos em desenvolvimento, tanto no Brasil quanto no exterior. Na última seção, discute-se a relação entre os eVTOLs e os helicópteros, levantando a seguinte questão: se essas novas aeronaves serão substitutas diretas ou se atuarão como uma solução complementar no transporte aéreo urbano. Por fim, são apresentadas as conclusões, além de uma indicação dos temas a serem tratados na segunda parte do estudo a ser publicado em edição futura.

As novas modalidades de transporte: mobilidade aérea avançada e mobilidade aérea urbana

De acordo com a National Aeronautics and Space Administration (NASA), tem-se as seguintes definições de mobilidade aérea avançada (*advanced air mobility – AAM*) e mobilidade aérea urbana (*urban air mobility – UAM*):

AAM: aviação segura, sustentável, com modicidade tarifária e de fácil acesso para missões locais e intrarregionais de natureza transformacional. AAM inclui UAM e comporta diversas modalidades, incluindo variadas formas de transporte de passageiros, de carga, assim como outras missões aéreas. As missões podem ser desempenhadas com muitos tipos de aeronaves (tripuladas ou não; com pouso e decolagem convencionais – CTOL; com pouso e decolagem em pistas curtas – STOL; ou na vertical – VTOL), sobre ou entre diversas localidades (urbanas, rurais, suburbanas etc.) e de/para um número muito maior de origens/destinos do que são próprios da aviação comercial (por exemplo, futuros aeródromos UAM, aeroportos pequenos/regionais existentes, porém subutilizados etc.). Missões locais e intrarregionais atingiriam, típica e respectivamente, menos de 75 milhas náuticas (140 km) e menos de 300 milhas náuticas (550 km), muito embora esses alcances não representem limites superiores rígidos.

UAM: sistema de transporte aéreo seguro, eficiente, conveniente, com modicidade tarifária e de fácil acesso para passageiros e carga, o qual se propõe a revolucionar a mobilidade em áreas metropolitanas. Essa visão inclui um espectro amplo que vai desde *drones* para a entrega de pequenos pacotes até táxis aéreos de passageiros operando sobre áreas habitadas.²

Desse modo, o termo genérico que representaria a mudança “transformacional” ora em curso no mundo é representado pela sigla AAM, sendo a sigla UAM um caso particular, uma vez que compreende essencialmente áreas urbanas.

Observa-se que o universo AAM compreenderá, entre outras possibilidades de uso urbano:

- operações de pouso e decolagem verticais de eVTOLs, a partir de plataformas situadas no topo de edificações, já designadas como *vertiports*, isto é, adaptações feitas em imóveis já existentes ou edificações inteiramente novas e especializadas (Figura 1);
- atendimento de emergências médicas via operação direta no topo de hospitais, como ambulâncias aéreas (Figura 2);
- função de *air shuttle*, ou seja, conexão rápida entre o aeroporto tradicional e a área urbana por ele servida;
- transporte de passageiros em baixa altitude, em ambiente urbano ao longo de aerovias eletronicamente sinalizadas, via sistema de gestão de tráfego aéreo específico, atualmente em desenvolvimento;

2 Tradução livre de: “Advanced Air Mobility (AAM): Safe, sustainable, affordable, and accessible aviation for transformational local and intraregional missions. AAM includes UAM as well as many other missions, including different forms of passenger transport, cargo transport, and aerial work missions. These missions may be performed with many types of aircraft (e.g., manned or unmanned; conventional takeoff and landing (CTOL), short takeoff and landing (STOL), or VTOL), over/between many different locations (e.g., urban, rural, suburban), and to/from far more locations than typical commercial aviation (e.g., novel UAM aerodromes, existing underutilized small/regional airports). Local and intraregional missions are likely less than approximately 75 nautical miles and 300 nautical miles, respectively, though these ranges are not strict upper limits. [...] Urban Air Mobility (UAM): Our vision of UAM is a safe, efficient, affordable, and accessible air transportation system for passengers and cargo that revolutionizes mobility around metropolitan areas. This vision includes everything from small package delivery drones to passenger-carrying air taxis that operate above populated areas.” (NASA, 2020)

- movimentação de pessoas (VTOLs) e cargas/pacotes (*drones*), tanto no ambiente urbano como entre cidades próximas e/ou destinos rurais suburbanos; e
- usos alternativos como em missões de resgate, apoio humanitário e transporte de carga.

Figura 1 | Pousos e decolagens do topo de edifícios



Fonte: Acervo Eve Air Mobility.

Figura 2 | Emergências médicas

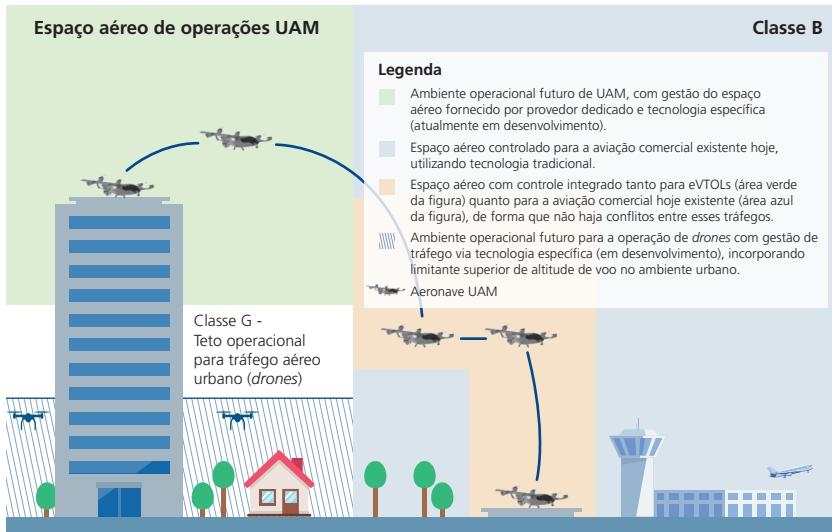


Fonte: Acervo Eve Air Mobility.

Com isso, constata-se preliminarmente que a mobilidade aérea avançada implica um novo “ecossistema” aeronáutico e uma nova cadeia produtiva com elos diferenciados. Ao contrário da aviação comercial precedida pela Segunda Guerra Mundial, quando já existia infraestrutura de sistemas de voo, o ambiente operacional para essa nova modalidade, o eVTOL, ainda não está implementado nem certificado pelas autoridades aeronáuticas.

O termo técnico da engenharia aeronáutica aplicável a essas situações é o *concept of operations* (ConOps), ou conceito das operações, o qual define as condições que irão nortear toda a operação dos novos veículos aéreos. Ou seja, para além das aeronaves propriamente ditas, há também a necessidade de que diversos outros sistemas, componentes e infraestruturas sejam implantados e devidamente certificados, temas que serão abordados na Parte 2.

Figura 3 | Visão de ConOps do ambiente operacional de UAM, com as diferentes modalidades de controle do espaço aéreo, assim como vários tipos de aeronaves, como drones,* eVTOLs e aeronaves comerciais



Fonte: Adaptado de NASA (2020).

* Os drones são aqui designados para operar no espaço aéreo gerenciado denominado UTM, sigla para UAS traffic management. UAS, por sua vez, é a sigla para unmanned aircraft system, denominação técnica dos drones.

Embora a implantação de um sistema completo, como mostrado na Figura 3, não seja realista no curto prazo, a implementação gradual, em fases discretas, parece ser uma abordagem viável. Além disso, é importante destacar que esse desenvolvimento paralelo de diversas tecnologias envolve riscos inerentes a toda e qualquer inovação, muitos dos quais estão fora do controle dos fabricantes de aeronaves.

Caracterização do produto eVTOL: concepções e principais configurações

Principais configurações

Existem três principais configurações de eVTOLs: multirrotores, *lift-and-cruise* e *tilt-X* (ou *tilt-rotor*) móveis.

Com o objetivo de saber a exata dimensão de como esses tipos de configuração têm influenciado os vários projetos conceituais de eVTOLs, a Vertical Flight Society³ dos Estados Unidos da América (EUA) contabilizou, até o início de 2025, mais de mil projetos propostos por cerca de 350 empresas e indivíduos (The Vertical Flight Society, 2025a). A maioria dos projetos é do tipo *tilt-X* (381), seguida dos tipos multirrotor (316) e *lift-and-cruise* (195). Além desses, figuram os conceitos mais simples de “bicicleta voadora” (111) e de eletrificação de (pequenos) helicópteros convencionais. Em termos práticos, estes dois últimos tipos não são considerados concorrentes diretos dos três primeiros.

³ Trata-se da antiga American Helicopter Society, instituição de grande prestígio na história da aviação e que teve seu nome alterado para se tornar mais universal e poder incorporar as mais variadas modalidades de voo vertical.

Como será visto a seguir, a configuração *tilt-X* é a mais complexa. É também a mais desafiadora em termos da engenharia do produto, porém, é a mais eficiente, pois seus rotores dianteiros são empregados em todas as fases do voo (basculando da horizontal para a vertical e vice-versa), atendendo a missões de maior distância; a multirroto é a mais simples, porém realiza apenas missões de curta distância; e a *lift-and-cruise* é intermediária entre as duas anteriores, tanto em termos de complexidade quanto de alcance da missão. Nesse sentido, cada projeto tem um mercado-alvo sendo vislumbrado.

Multirrotore

A configuração multirroto (ou *multicopter*) representa atualmente a tecnologia pioneira, incorporada a veículo já certificado e comercialmente operacional no campo dos eVTOLs (figuras 4 e 5). Trata-se de uma aeronave sem asas, cujos múltiplos rotores fornecem propulsão para elevá-la do solo. Ao reduzir sua potência na direção em que se queira ir, a aeronave irá se inclinar e se movimentar nessa direção. Aos poucos, o piloto fará o ajuste para que a proa da aeronave fique na direção de voo escolhida.

Feito isso, o processo de certificação se torna mais rápido por utilizar uma aeronave de uso essencialmente urbano em rotas designadas, o que faz com que sua velocidade, inferior àquelas possíveis com as demais configurações, não invabilize seu uso (Hu, 2025; Xiang, 2023). Além disso, há rotores elétricos dispostos simetricamente, oferecendo desempenho aerodinâmico superior durante o voo pairado e em baixa velocidade. Esse *design* confere a tais eVTOLs excelente manobrabilidade e robusta capacidade de pairar, tornando-os ideais para missões de curto e médio alcance, como proteção de cultivos, combate aéreo a incêndios urbanos e passeios turísticos.

A ausência de diversos componentes, como hélices, asas ou rotores basculantes, resulta em uma estrutura mais leve, com menores custos de fabricação e sistemas de controle mais simplificados. Tais benefícios facilitam sua comercialização e aplicação em iniciativas de curto a médio prazo (Hu; Yan; Yuan, 2025). Assim, esses modelos de aeronave representam, até o momento, o auge da maturidade tecnológica na indústria de eVTOL, tendo como exemplares proeminentes projetos como HEXA, VoloCity e EHang 216.

Aeronaves *lift-and-cruise*

Na configuração *lift-and-cruise* (Figura 6), a aeronave apresenta propulsores independentes (rotores verticais) para se elevar do solo e outro(s) propulsor(es) para se deslocar pelo ar em voo de cruzeiro (rotores horizontais). Neste último caso, é feito uso do(s) propulsor(es) alinhado(s) com o eixo longitudinal da aeronave (geralmente na cauda), mas a sustentação aerodinâmica provida pelas asas. Para o pouso, faz-se uso novamente dos rotores verticais.

Essa configuração permite velocidades mais altas, todo tipo de rota e maior alcance da aeronave, podendo inclusive fazer ligação entre cidades próximas. No entanto, o processo de certificação é mais complexo, o que não impediu a configuração *lift-and-cruise* de ser escolhida pela Eve Air Mobility para seu primeiro modelo, o Eve-100.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de aeronaves *lift-and-cruise* tem progredido rapidamente. A ideia central dessa configuração é reduzir a carga de sustentação nos rotores verticais durante o voo de cruzeiro, para que, durante os períodos de voo pairado e de baixa velocidade, a aeronave funcione na configuração VTOL, isto é, seja sustentada pelos rotores verticais. Na medida em que a velocidade de voo aumenta, o rotor horizontal começa a fornecer impulso para a frente, o que faz com que

a velocidade de rotação dos rotores verticais seja reduzida pela metade, passando a dividir com as asas o peso da aeronave numa relação típica de 20%-80%, ou mesmo a zero, com as asas ficando com 100% do peso da aeronave. Isso permite maiores velocidades de voo, maior alcance, menos vibrações e melhor capacidade de manobra. Nesse sentido, trata-se de uma configuração mais indicada para missões de média a longa distância (Hu *et al.*, 2025).

Nessa configuração, destacam-se os projetos Eve-100, o Prosperity 1 (da Autoflight) e o Beta S4.

Aeronaves eVTOL de rotores basculantes (*tilt-X*)

Trata-se de uma configuração que se caracteriza por utilizar rotores tanto para a decolagem na vertical quanto para a propulsão na horizontal (figuras 9 e 10). Para a decolagem, os rotores são posicionados na vertical (com as pás paralelas ao solo) e, à medida que a aeronave decola, os rotores se inclinam para uma orientação horizontal (com as pás perpendiculares ao solo). Essa conversão faz com que a aeronave voe para a frente, permitindo que as asas assumam mais carga enquanto aliviam a carga sobre os rotores.

Na posição horizontal, os rotores fazem com que a aeronave atinja um voo em alta velocidade, tal qual uma aeronave convencional de asa fixa. Embora a eficácia de pairar das aeronaves de rotores basculantes seja marginalmente inferior à das multirrotores, o projeto do rotor basculante demonstra desempenho superior em voo de subida e em cruzeiro de alta velocidade. Um exemplo é o Joby S4, que atinge uma velocidade máxima de voo de 322 km/h (89,4 m/s), um alcance máximo de 241,4 km e uma autonomia de voo máxima de 1,3 hora. Dessa forma, as aeronaves eVTOL de rotores basculantes

são projetadas para missões de médio a longo alcance, que exigem velocidades mais altas, como extensos deslocamentos urbanos metropolitanos e viagens intermunicipais.

A Tabela 1 apresenta um resumo das principais características de diferentes modelos para as configurações apresentadas.

Tabela 1 | Principais características técnicas por tipo de configuração

Multirrotor	Fabricante	Passageiros	Peso (kg)	Alcance (km)
EHang 216	EHang	2 +1	620	35
Hexa	Lift	1	196	24
VoloCity	Volocopter	2 +1	700	35
Lift-and-cruise	Fabricante	Passageiros	Peso (kg)	Alcance (km)
Eve-100	Eve Air Mobility (Embraer)	4 +1	1700	100
EHang VT-30	EHang	2 +1	700	300
Alia-250	Beta	5 +1	2720	250
Tilt-rotor	Fabricante	Passageiros	Peso (kg)	Alcance (km)
Midnight	Archer	4	3175	160
S4	Joby	4 +1	1815	241,4
Lilium Jet	Lilium	6	3000	250
Butterfly	Overair	5	3175	160
SA-2	Supernal (Hyundai)	4	3175	160
VX4	Vertical Aerospace	4	3175	160
Gen 6	Wisk Aero	2	1360	144

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados dos fabricantes.

Modelos de eVTOLs em desenvolvimento

Multirrotores

EHang – aeronave EHang 216S

A EHang, fundada em dezembro de 2014, é uma empresa chinesa pioneira em tecnologia de veículos aéreos autônomos, a qual é responsável por projetar e fabricar aeronaves eVTOL de passageiros e de carga.

O EHang 216S (Figura 4) é um eVTOL autônomo projetado para atender às necessidades de transporte urbano. Possui uma estrutura leve feita de materiais compostos de carbono e metal, comprimento de 5,73 metros, altura de 1,93 metro, peso máximo de decolagem de 620 kg e alcance de até 35 km, atingindo a velocidade máxima de 130 km/h (Goldstein; Warwick, 2023). É alimentado por 16 motores elétricos conectados a 16 rotores em um *design* coaxial de duas pás para cada rotor, além de ser uma aeronave equipada com um sistema de controle de voo avançado, navegação inteligente e GPS, permitindo voos totalmente autônomos.

Os usos do Ehang 216S são variados, incluindo transporte público, turismo, evacuação médica e logística de curta distância. Sua capacidade de decolagem e pouso vertical o torna indicado para operações em áreas urbanas densas, onde o espaço é limitado.

Figura 4 | EHang – 216S



Fonte: Arquivo pessoal de Marcos Henrique Figueiredo Vital. São Paulo, 2025.

A EHang foi o primeiro fabricante a obter uma certificação de tipo eVTOL no mundo, com o modelo Ehang 216S, emitido pela Civil Aviation Administration of China (CAAC), ou autoridade de aeronáutica civil da China (EHang..., 2023). Tal certificação permite que a EHang opere seu eVTOL autônomo de dois lugares em rotas comerciais e de turismo dentro do país.

No entanto, é preciso considerar que o EHang216S tem performance limitada e que foram levantadas questões acerca do nível de segurança operacional nos critérios da CAAC (Goldstein; Warwick, 2023).

Volocopter – aeronave VoloCity

A Volocopter GmbH foi fundada em 2011 em Karlsruhe, na Alemanha, com a intenção de fabricar uma aeronave multicóptero⁴ elétrica de decolagem e pouso vertical (eVTOL) para viagens urbanas rápidas e eficientes. Em 21 de outubro de 2011, a empresa fez história ao fazer o primeiro voo tripulado no mundo de um multicóptero, chamado VC1.

Figura 5 | Volocopter – VoloCity



Fonte: Ibex73, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Volocity_at_Paris_Ari_Show_2023_\(4\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Volocity_at_Paris_Ari_Show_2023_(4).jpg).

Porém, em dezembro de 2024, a Volocopter declarou falência, sendo subsequentemente adquirida por um investidor chinês, mas, aparentemente, estaria enfrentando dificuldades para recomeçar seus desenvolvimentos, dadas a nova gestão e o novo ambiente (Flottau; Wall, 2025).

⁴ Termo de *marketing* criado para aproximar o que é um eVTOL multirotor do conceito de helicóptero (justificável, uma vez que essa configuração não tem asas, apenas rotores múltiplos).

Lift-and-cruise

Eve Air Mobility – aeronave Eve-100 (Embraer)

Em síntese, as principais características e critérios de projeto dessa aeronave são:

- flexibilidade na configuração de assentos: quatro passageiros na entrada em serviço operacional (2027), avançando para seis passageiros no futuro, com operação autônoma (sem pilotagem a bordo);
- alta utilização diária: aeronave projetada para milhares de ciclos de voo ao ano (*flight cycles*), com uma confiabilidade projetada para ser *benchmark* dessa indústria;
- veículo 100% elétrico: emissão nula de CO₂ nas operações;
- projetado para a mobilidade urbana: alcance de 100 km (60 milhas) quando da entrada em serviço (2027), o que atende a 99% das missões de UAM;
- eficiência econômica: custo por assento mais de seis vezes inferior ao de helicópteros equivalentes, objetivando ser o mais baixo entre todos os eVTOLs; e
- baixo impacto ambiental: pegada de ruído (*noise footprint*)⁵ inferior em até 90% em relação à de helicópteros equivalentes.

A Figura 6 apresenta a configuração do Eve-100 em desenvolvimento pela Eve Air Mobility.

5 Esse termo se refere a uma determinada área no solo que sofre o impacto sonoro da operação da aeronave. A linha de contorno dessa área – seu perímetro – é constituída pela chamada curva isofônica, ou seja, uma curva imaginária sobre a qual um determinado nível de ruído é constante. Por exemplo, uma curva de 50 decibéis. Portanto, quanto menos ruído uma aeronave produzir, menor será sua “pegada” de ruído, ou seja, menor será a área coberta pela curva de 50 decibéis no solo.

Figura 6 | Eve Air Mobility – Eve-100



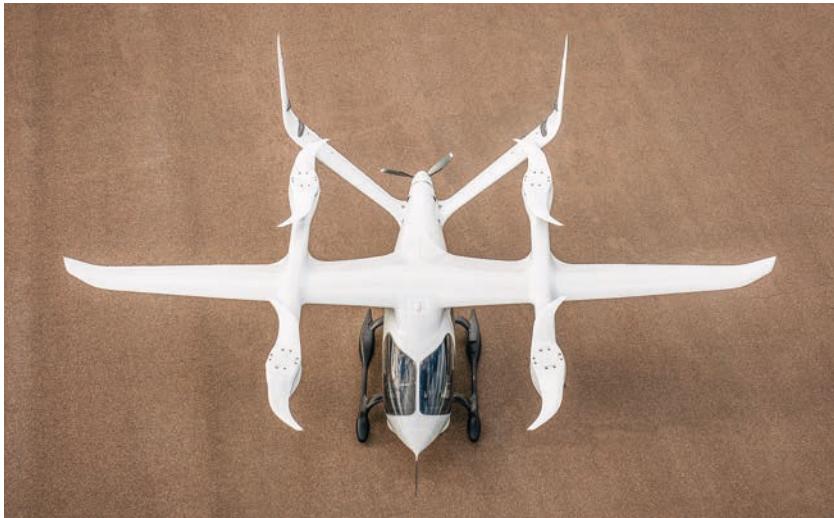
Fonte: Acervo Eve Air Mobility.

Beta Technologies – aeronave Alia 250

O Alia 250 (Figura 7) foi inspirado em um pássaro ártico conhecido por suas longas migrações. Seu *design* inclui uma configuração de cauda em V, asas arqueadas e pontas de asas afiladas para reduzir o arrasto aerodinâmico e melhorar a estabilidade em baixas velocidades (Beta Technologies, 2025). A aeronave também conta com quatro rotores montados horizontalmente para decolagem e pouso verticais, além de uma hélice traseira para a propulsão horizontal.

Ademais, está disponível em versões para passageiros e carga, com capacidade para até seis passageiros, incluindo o piloto, ou 200 pés cúbicos ($5,66 \text{ m}^3$) de carga. Tem um alcance de aproximadamente 250 milhas (cerca de 400 km) e é projetada para ser simples e segura, minimizando a complexidade e os pontos críticos de falha. Além do transporte de passageiros, pode ser utilizada para missões de transporte de órgãos, logística e outras aplicações de mobilidade aérea.

Figura 7 | Beta Technologies – Alia 250



Fonte: BETA Technologies, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BETA_Technologies_ALIA_250.jpg#file.

A Beta recebe recursos do Agility Prime, o programa da Força Aérea dos EUA (USAF, na sigla em inglês), que conta com US\$ 100 milhões anuais para apoiar a certificação e o desenvolvimento de aeronaves eVTOL (Brinkmann, 2022). Esse fato destaca o potencial do Alia 250 para aplicações tanto comerciais como militares.

Airbus – aeronave CityAirbus NextGen

CityAirbus NextGen (Figura 8) é um protótipo de decolagem e pouso vertical (eVTOL) totalmente elétrico de três lugares, mais o lugar do piloto (Airbus, 2025). Tem alcance operacional de 80 km e velocidade de cruzeiro de 120 km/h, tornando-o perfeitamente adequado para uma variedade de operações de voo.

A configuração da aeronave incorpora elementos de *design* inovadores que contribuem para uma arquitetura robusta e perfeita, como:

- asas fixas;
- cauda em forma de V; e
- oito hélices elétricas como parte de seu sistema de propulsão distribuída de design exclusivo.

Figura 8 | Airbus – CityAirbus NextGen



Fonte: Leo067, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CityAirbus_NextGen.jpg.

A Airbus apresentou seu protótipo ao público em dezembro de 2023. Tal evento coincidiu com a abertura do novo centro de desenvolvimento do CityAirbus em Donauwörth, na Alemanha, dedicado a sistemas de teste para eVTOLs. O centro faz parte do investimento contínuo e de longo prazo da Airbus em AAM, sendo usado para ensaios que cobrem os motores elétricos com seus oito rotores, bem como outros sistemas, como controles de voo e aviônicos. Após a realização do primeiro voo não tripulado do protótipo em novembro de 2024, a Airbus resolveu interromper o desenvolvimento desse programa, à espera de avanços na tecnologia das baterias.

Tilt-X

Archer – aeronave Midnight

O *design* do Archer Midnight inclui 12 rotores: seis inclináveis para transição entre voo vertical e horizontal e seis fixos para decolagem e pouso. A fuselagem apresenta asa alta e cauda em “V”, garantindo estabilidade e baixos níveis de ruído, ideal para áreas urbanas densas. Tem capacidade para quatro passageiros e um piloto, peso máximo de decolagem de aproximadamente 3.175 kg, alcance de 80 km e velocidade máxima de 241 km/h (The Vertical Flight Society, 2025b).

O processo de certificação do Archer Midnight está em andamento, com a empresa colaborando com a Federal Aviation Administration (FAA) no processo. A aeronave já recebeu certificado de aeronavegabilidade especial para testes de voo e está em busca da certificação de tipo para operações comerciais, contando ainda com seis protótipos da versão definitiva. É esperado que a certificação da FAA seja obtida ainda em 2025 e o início das operações comerciais logo após.

No âmbito militar, o Midnight tem potencial para missões de transporte de pessoal, suporte logístico e operações de resgate, com vantagens estratégicas em cenários que exigem agilidade e discrição. A Archer tem um contrato de US\$ 142 milhões com o programa Agility Prime da USAF. Isso tem permitido à USAF realizar um número considerável de ensaios em voo com o Midnight, tanto para pesquisa própria como para contar pontos para a campanha de certificação de tipo junto à FAA (uma espécie de subsídio governamental disfarçado ao desenvolvimento da versão civil). Já o Decreto Presidencial de junho de 2025, do Presidente Donald Trump, ao criar o Programa Piloto de Ensaios para Carros Voadores, viabilizou um aumento de

capital de US\$ 850 milhões para a Archer. O programa fomentará os usos de eVTOLs para táxi aéreo, transporte de carga, logística de defesa e serviços médicos emergenciais (President..., 2025).

Joby Aviation – aeronave S4

O S4 (Figura 9) utiliza propulsão elétrica distribuída, permitindo que os motores sejam distribuídos ao longo da estrutura, o que proporciona maior eficiência e redundância. Com seis rotores basculantes, o design combina características de helicópteros e aviões, possibilitando decolagens e poucos verticais, além de voos horizontais rápidos e relativamente silenciosos. A estrutura é feita de materiais compostos leves, com o objetivo de reduzir o peso total e incrementar a eficiência energética, tendo um peso vazio de aproximadamente 1.950 kg e um peso máximo de decolagem de 2.404 kg. É projetado para transportar um piloto e até quatro passageiros, além de espaço para bagagem. Trata-se de uma aeronave dimensionada para missões de serviços de táxi aéreo urbano e interurbano.

Nesse sentido, o S4 tem alcance de aproximadamente 240 km com uma única carga elétrica, adequado para viagens curtas e médias. Atinge uma velocidade máxima de 322 km/h, com níveis de ruído significativamente inferiores aos de helicópteros, tornando-o uma aeronave indicada para operações em áreas urbanas.

Figura 9 | Joby Aviation – S4



Fonte: Acervo Joby Aviation. (c) Joby Aero, Inc. Disponível em: https://drive.google.com/drive/folders/1epAWlpwQiJJL_jOEDIMbWnET8b878Dj.

No que diz respeito à certificação, o processo de aprovação pela FAA vem avançando, incluindo testes estruturais e de sistemas. Isso porque o primeiro protótipo de produção da Joby realizou seu primeiro voo com pilotagem a bordo e transição dos rotores em abril de 2025.

Trata-se da primeira de duas unidades para entrega à USAF ainda este ano, contratadas por meio do programa Agility Prime, da mesma forma como no caso anterior e visando às mesmas aplicações operacionais básicas (o que talvez seja uma concorrência disfarçada). O contrato, no valor de US\$ 131 milhões, prevê a entrega e a operação de até nove aeronaves para ensaios em voo. Com relação aos protótipos pilotados para certificação junto à FAA, eles já estão em voo, com o início da operação comercial previsto para acontecer ainda em 2025, caso a certificação avance no ritmo esperado.

A empresa pretende comercializar diretamente a operação das aeronaves, sem vendê-las para terceiros, sendo a fabricante japonesa Toyota a maior investidora individual na empresa.

Vertical Aerospace – aeronave VX4

O britânico VX4 (Figura 10) tem um *design* aerodinâmico com oito rotores montados na frente e atrás da asa, acima da cabine, sendo que os quatro rotores frontais são inclináveis para transição entre voo vertical e horizontal (Vertical Aerospace, 2024). A estrutura é feita de compósitos de fibra de carbono, garantindo leveza e resistência, e o modelo é alimentado por baterias desenvolvidas pela Vertical Energy Centre, do mesmo grupo.

O VX4 tem capacidade para transportar até quatro passageiros, além do piloto, com um peso máximo de decolagem de aproximadamente 2.700 kg. Foi projetado para alcançar uma velocidade de cruzeiro de até 241 km/h (150 mph) e tem um alcance de aproximadamente 160 km (100 milhas) por carga elétrica (The Vertical Flight Society, 2025c). Em relação à eficiência VX4, o qual conta com *design* bastante aerodinâmico, utilização de tecnologias de ponta em propulsão elétrica e controle de voo, esta foi obtida graças a parcerias com empresas tradicionais como Honeywell (EUA) e Leonardo (Itália).

Os usos do VX4 são variados e incluem transporte urbano de passageiros, serviços de táxi aéreo e operações logísticas. O VX4 é voltado para ambientes urbanos densos, especialmente por apresentar nível de ruído adequado para operar em áreas residenciais. A Vertical Aerospace, sediada no Reino Unido, está colaborando com a Civil Aviation Authority (CAA), do Reino Unido, e com a European Union Aviation Safety Agency (EASA), da União Europeia, para obter a certificação necessária.

Figura 10 | Vertical Aerospace – VX4



Fonte: Acervo Vertical Aerospace. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/181dsRNvtLfHWezGv6Ywar-UoWuigjfMy>.

No entanto, a empresa enfrentou a perda de um protótipo em escala real e não pilotado em 2023, fazendo com que um segundo protótipo em escala real fosse montado para novos ensaios e os voos fossem retomados, inclusive já com pilotagem a bordo. A conclusão da certificação está planejada para ocorrer ao final de 2026.

Seria digna de inclusão nesta seção o eVTOL S-A2 da Supernal, subsidiária nos EUA da gigante coreana Hyundai (mais conhecida por seu braço automobilístico). Porém, a empresa adotou uma estratégia de desenvolvimento lento, prevendo a certificação a partir de 2028. Com isso, espera-se que o mercado já tenha se estabelecido de forma mais consistente até lá, além dos novos avanços tecnológicos (Warwick, 2024).

Por fim, nesta seção, cabe incluir também o Lilium Jet, da fabricante alemã Lilium, embora a empresa tenha, infelizmente, falido no final de 2024, após vários anos de desenvolvimento e com protótipos (não tripulados) já em voo. Isso ocorreu por falta de capital para continuar

seu desenvolvimento, apesar dos apelos (infrutíferos) de apoio e suporte feitos ao governo alemão.

O entendimento correto das características e requisitos de cada projeto apresentado é importante para que seja possível comparar os aspectos concorrenenciais do eVTOL da Eve Air Mobility com os demais projetos. Atualmente, o Eve-100 se encontra em processo de certificação pela Agência Nacional de Aviação Civil (Anac), com expectativa de entrada em operação comercial em 2027. O voo do primeiro do protótipo de engenharia para prova de conceito, sem tripulação, ou seja, com a pilotagem sendo feita de forma remota em solo, está previsto para ocorrer ainda em 2025 ou no início de 2026. A expectativa é de que os cinco protótipos mais avançados levantem voo em 2026, para a campanha de certificação (aeronaves conformes, no jargão técnico). A certificação da Anac deve ser finalizada entre 12 e 18 meses após o início dos voos dos cinco protótipos avançados ou, no mais tardar, em meados de 2027.

No entanto, alguns pontos merecem atenção:

- a existência de *trade-off* entre o alcance (atualmente de 100 km) e o peso (em torno de três toneladas, incluindo quatro passageiros, bagagem e o piloto), compreendendo que, quanto maior o peso, menor o alcance do equipamento, e vice-versa; e
- os custos de operação dos eVTOLs, tais como os de treinamento de pilotos e as tarifas de utilização de vertiportos, mostram-se mais competitivos do que seus concorrentes (principalmente helicópteros, vide próxima seção).

A expectativa de vida da bateria, estimada entre 10% e 15% do valor total do eVTOL, é outro aspecto relevante, dado seus impactos na economicidade da operação da aeronave; a bateria utilizada pelo Eve-100, por exemplo, tem duração de cerca de quatro mil voos (em torno de um ano de uso). No entanto, os fabricantes buscam continuamente avanços

significativos no intuito de aumentar a sua vida útil, o que evidentemente reduz o custo operacional da aeronave.

Comparação entre eVTOLs e helicópteros – substitutos ou complementares?

O eVTOL e o helicóptero⁶ compartilham de diversas características, entre as quais é possível citar:

- a capacidade de decolar e pousar sem a necessidade de uma pista, bastando apenas uma pequena área do terreno ou uma estrutura que suporte seu peso para pousos ou decolagens; e
- a capacidade de executar o que se denomina “voo pairado”.

Essas duas qualidades podem, em princípio, levar a intuir que ambos os equipamentos são concorrentes em diversas aplicações, ainda que não em todas as situações ou mercados. Em particular, a faixa de alcances dos eVTOLs, entre 100 e 300 km, situa-se muito abaixo dos 500 km que um helicóptero médio pode alcançar. Assim sendo, os eVTOLs podem competir apenas em percursos mais curtos, dado o atual estado da arte.

Entretanto, é a propulsão elétrica do eVTOL que o distingue predominantemente, derivando daí as suas principais peculiaridades. Comparado ao helicóptero, o eVTOL apresenta baixa emissão de ruídos e nenhuma emissão direta de gases de efeito estufa (GEE) oriundos da queima de combustível fóssil, além de apresentar menores custos de operação.

6 Características e usos para helicópteros podem ser encontrados em Gomes *et al.* (2013).

Utilizar motores elétricos, leves e de mecânica mais simples é mais um ponto a favor do eVTOL. Sem os complexos e pesados motores dos helicópteros, o eVTOL não requer o uso das também pesadas caixas de transmissão, nem dos sistemas mecânicos e eletrônicos que os controlam (Hu *et al.*, 2025).

Essas qualidades também viabilizam a distribuição da propulsão em diversos motores (multirrotor), trazendo redundância entre os sistemas da aeronave e, consequentemente, maior segurança operacional. Por exemplo, a falha de um rotor pode ser compensada pelos demais rotores, ou a falha de algum dos componentes aerodinâmicos ou de algum sistema que os controla pode ser compensada pela variação na angulação e/ou na velocidade de giro dos rotores.

Por ter propulsão elétrica, o eVTOL não emite GEE diretamente na sua operação. Caso seja carregado com energia de fonte renovável, pode ser considerado um meio de transporte ambientalmente 100% limpo, no que concerne a emissões diretas de CO₂, CO, NO_x e outros GEE oriundos da queima de combustíveis fósseis. Além disso, os motores elétricos têm eficiência energética de ordem de 75% a 90%, ou seja, muito superior à dos motores convencionais a jato, na faixa dos 30% e dos 50%, e dos motores a combustão interna, que ficam entre 20% e 40%.

Aeronaves convencionais utilizam combustível líquido como fonte de energia. Querosene de aviação, para os motores a jato, e gasolina de aviação, para motores a pistão, são os mais utilizados, sendo em ambos os casos hidrocarbonetos derivados do petróleo. O eVTOL requer o armazenamento de energia numa bateria embarcada na aeronave, a qual tem sido objeto de especial atenção, no que diz respeito ao *design*, à operação e à manutenção dos eVTOLs. Porém, baterias e combustíveis líquidos têm características bastante distintas, a saber (Quadro 1).

Quadro 1 | Armazenamento de energia

Combustíveis líquidos	Baterias
A mesma quantidade de energia é armazenada em cada litro de combustível	A energia é distribuída de forma irregular ao longo da célula
A razão de consumo do combustível não diminui conforme o tanque se esvazia	Uma descarga rápida da bateria faz com que menos energia seja liberada
A capacidade de armazenamento do tanque não é reduzida devido ao uso	A capacidade de armazenamento da bateria é reduzida devido ao uso e ao tempo
A energia a ser demandada vai determinar a quantidade de combustível	A energia a ser demandada vai determinar a capacidade da bateria
Cada litro de combustível enche o tanque na mesma proporção	A taxa de carregamento varia – células de bateria são lentas para atingir carga total

Fonte: Adaptado de McDonald (2023).

Da mesma forma que combustíveis líquidos diferem de baterias, as tecnologias dos motores convencionais (que consomem combustível líquido) e de motores elétricos são bastante diferentes, conforme pode ser observado no Quadro 2.

Quadro 2 | Fontes de potência

Combustíveis líquidos – motor convencional	Baterias – motor elétrico
Cada litro de combustível fornece a mesma potência	A potência é disponibilizada ao longo da célula de forma irregular
O combustível aceita praticamente qualquer taxa de consumo	Células de bateria fornecem potência a uma taxa limitada
A potência armazenada no combustível não é reduzida devido ao uso	A potência disponibilizada pela bateria é reduzida devido ao uso e ao tempo
A potência demandada pela aeronave vai determinar a potência do motor	A potência demandada pela aeronave vai determinar a potência do motor e, possivelmente, da bateria
Aeronaves que queimam combustível têm melhor desempenho ao final da missão*	Aeronaves com baterias têm pior desempenho ao final da missão

Fonte: Adaptado de McDonald (2023).

*Isso ocorre porque, ao final da missão, devido à menor quantidade de combustível nos tanques, a aeronave carrega menos peso, o que leva à melhora do desempenho.

Dadas as peculiaridades do uso de baterias e motores elétricos, pode-se inferir que, enquanto não houver avanço considerável, os eVTOLs terão aplicações distintas dos helicópteros. Nesse sentido, os eVTOLs são mais indicados para missões de curta a média distâncias, em trajetos intraurbanos ou interurbanos predefinidos, comportando até quatro passageiros ou 400 kg de carga. Os helicópteros, por outro lado, têm maior autonomia, maior margem para alterações de destino durante a missão, bem como, em geral, maior capacidade de carga.

Assim sendo, em certas atividades, o eVTOL poderá vir a ser o substituto perfeito dos helicópteros, como em missões do tipo interurbanas e *shuttle services*, emergências médicas, combates a incêndios etc., enquanto em outras não seria possível substituir helicópteros por eVTOLs, como mostrado pelo Apêndice A deste artigo, o qual apresenta uma síntese dos empregos vislumbrados para os eVTOLs. Por outro lado, helicópteros devem continuar a prevalecer em missões de longa duração, como operações *offshore*, de busca e salvamento, operações de forças de segurança pública ou militares, como ambulância aérea, e para transporte de autoridades. Ou seja, operações que demandem flexibilidade e maior autonomia da aeronave.

Considerações finais

Apesar das incertezas, alguns pontos sustentam os desenvolvimentos em curso:

- i) Não há maiores impedimentos de engenharia para que eVTOLs sejam certificados e ganhem o mercado, embora as escalas de tempo ainda sejam incertas.

- ii) O ecossistema a ser construído em torno dos eVTOLs (gestão do tráfego aéreo, vertiportos, integração de sistemas) não apresenta maiores impedimentos de engenharia, apesar dos ambientes socioambientais complexos.
- iii) Há demanda para os serviços de transporte dos eVTOLs, dado o grande leque de aplicações possíveis (Apêndice A), apesar da dificuldade em prever quantidades de aeronaves, rotas e frequências de voos.
- iv) O ganho ambiental proporcionado pela propulsão elétrica é considerável, podendo abrir portas para desenvolvimentos tecnológicos significativos na aviação de maior porte.
- v) Os recursos financeiros orçados para a implantação de mercados de AAM/UAM ao redor do mundo não são proibitivos. Diversos governos, principalmente no Oriente Médio (Dubai) e na Ásia (Singapura, Japão e Coreia do Sul), estão agindo proativamente nessa direção. Vislumbra-se que terão operações comerciais de eVTOLs já em 2026, à frente do resto do mundo (tema a ser detalhado na Parte 2).

Apesar disso, nos últimos dois anos, houve, como visto acima, o colapso da Lilium e da Volocopter na Alemanha; a Airbus e a Supernal/Hyundai, dois gigantes industriais, suspendendo (ou colocando em “fogo brando”) seus programas de eVTOLs por vários anos; os EUA intensificando seu apoio aos seus fabricantes com centenas de milhões de dólares e instituindo um programa oficial de apoio; e a China despontando com a primeira certificação aeronáutica de eVTOL no mundo, enquanto os países centrais ainda dão os últimos retoques em suas respectivas regulamentações de certificação.

Tal quadro sugere certo acirramento entre os empreendimentos que visam chegar ao mercado pioneiramente (China) ou de forma massiva (EUA), os *quick followers*, porém precavidos (Airbus e Hyundai), e os

que simplesmente não mantiveram *funding* adequado para sustentar as “queimas de caixa” requeridas até a comercialização em escala de seus produtos (os alemães). Comentários informais por parte de analistas de mercado experientes, os quais foram ouvidos pelos autores em seminários de que participaram, explicitam que o jogo para se tornar um fabricante bem-sucedido de eVTOL é conseguir investir US\$ 1 bilhão até começar a ter retorno, mas isso pode não ser o caso da Airbus e da Hyundai.

No caso do Brasil, a Embraer/Eve Air Mobility parece seguir um caminho intermediário entre os “acirramentos” vistos acima. Vislumbra-se que o Eve-100 só entrará em operação comercial após os eVTOLs americanos, porém seu *funding* tem crescido de forma contínua e consistente ao longo dos anos, inclusive com o apoio do BNDES. Seu foco é o mercado UAM, em que a demanda é prevista como sendo de veículos mais simples do que os americanos, mas em quantidade elevada e com preços de venda inferiores aos dos concorrentes dos EUA.

Talvez o maior desafio, comum a todos os fabricantes que permanecerem no jogo, seja prever a velocidade com que os mercados para aplicações de eVTOLs (Apêndice A) se desenvolverão ao longo dos próximos cinco a dez anos. Isso porque tal velocidade influenciará diretamente os investimentos de longo prazo a serem feitos nas cadeias produtivas e nas cadências de produção nas fábricas. Subinvestimentos geram custos unitários mais elevados e perda de competitividade, ao passo que sobreinvestimentos geram produção que não é comercializada ou alongamentos nos prazos de recuperação do capital investido.

Portanto, são os aspectos mercadológicos do futuro mercado para os eVTOLs que agora se colocam. Entre tais aspectos, a implantação progressiva da infraestrutura requerida apresenta-se como de natureza fundamental. Esse e outros desafios que assim se vislumbram serão abordados na Parte 2.

Referências

AIRBUS. CityAirbus NextGen. *Airbus*, Blagnac, 2025. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hybrid-and-electric-flight/cityairbus-nextgen>. Acesso em: 10 jun. 2025.

BRASIL ganha nova política industrial com metas para o desenvolvimento até 2033. *Agência Gov*, Brasília, DF, 22 jan. 2024. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202401/brasil-ganha-nova-politica-industrial-com-metas-e-acoes-para-o-desenvolvimento-ate-2033-1>. Acesso em: 8 mai. 2025.

BRINKMANN, P. U.S. Air Force determined not let advanced air mobility revolution pass by it, or the American economy. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Reson, 9 set. 2022. Disponível em: <https://aiaa.org/u-s-air-force-determined-not-let-the-advanced-air-mobility-revolution-pass-it-or-the-american-economy/>. Acesso em: 7 mar. 2025.

EHANG successfully obtains type certificate for EH216-S Passenger-Carrying UAV System issued by Civil Aviation Administration of China. *EHang*, Guangzhou, 13 out. 2023. Disponível em: <https://www.ehang.com/news/990.html>. Acesso em: 28 mar. 2025.

FLOTTAU, J.; WALL, R. Arc de Trump. *Aviation Week & Space Technology*, New York, v. 187, n. 1, p. 32, 2025.

GOLDSTEIN, B.; WARWICK, G. First certified eVTOL, EHang's EH216-S, Lacks Commercial Appeal. *Aviation Week Network*, New York, 24 out. 2023.

GOMES, S. B. V.; FONSECA, P. V. R.; QUEIROZ, V. S. O setor aeronáutico de helicópteros civis no mundo e no Brasil: análise setorial. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 38, p. 213-263, 2013. Disponível em: https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4781?&locale=pt_BR. Acesso em: 24 jun. 2024.

HU, L.; YAN, X.; YUAN, Y. Development and challenges of autonomous electric vertical take-off and landing aircraft. *Helijon*, London, v. 11, n. 1, e41055, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41055>. Acesso em: 25 ago. 2025.

JOHNSON, O. Airbus to ‘pause’ CityAirbus NextGen development. *Vertical Magazine*, Kitchener, 28 jan. 2025. Disponível em: <https://verticalmag.com/news/airbus-to-pause-cityairbus-nextgen-development/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

MCDONALD, R. Batteries are not fuel. *Engineering – engrxiv archive*, San Luis Obispo, CA, 2023. Disponível em: <https://engrxiv.org/preprint/view/2803/version/4016>. Acesso em 6 nov. 2024.

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *UAM Vision Concept of Operations (ConOps) UAM Maturity Level (UML) 4*. Version 1.0. Elaborado por Deloitte Consulting LLP. Washington, DC: NASA, 2020. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205011091/downloads/UAM%20Vision%20Concept%20of%20Operations%20UML-4%20v1.0.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2025.

PORSCHE CONSULTING. *The future of vertical mobility: sizing the market for passenger, inspection, and goods services until 2035*. Stuttgart: Porsche Consulting, 2018. Disponível em: <https://canadianaam.com/wp-content/uploads/2021/05/The-Future-of-Vertical-Mobility-Porsche-Consulting.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2024.

PRESIDENT Trump Signs Executive Orders on Drones, Flying Cars, and Supersonics. *The White House*, Washington, DC, 11 jun. 2025. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/articles/2025/06/president-trump-signs-executive-orders-on-drones-flying-cars-and-supersonics/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

THE VERTICAL FLIGHT SOCIETY. The Electric VTOL News. *The Vertical Flight Society*, Fairfax, 2025a. Disponível em: <https://evtol.news/aircraft>. Acesso em: 28 mar. 2025.

THE VERTICAL FLIGHT SOCIETY. Archer Aviation Midnight (production aircraft). *The Vertical Flight Society*, Fairfax, 2025b. Disponível em: <https://evtol.news/archer>. Acesso em: 28 mar. 2025.

THE VERTICAL FLIGHT SOCIETY. Vertical Aerospace VX4 (production model). *The Vertical Flight Society*, Fairfax, 2025c. Disponível em: <https://evtol.news/vertical-aerospace-VA-1X>. Acesso em: 28 mar. 2025.

VERTICAL AEROSPACE. Vertical flight is on the horizon. *Vertical Aerospace*, Bristol, 2024. Disponível em: <https://vertical-aerospace.com/meet-the-vx4/>. Acesso em: 28 mar. 2025.

WARWICK, G. ReConnectTN seeks a unifying vision for regional air mobility. *Aviation Week & Space Technology*, New York, 2024.

Apêndice A – Emprego das aeronaves eVTOLs⁷

Sete empregos principais identificados

- serviço de táxi *on demand* (por aplicativo) entre áreas urbanas, rurais e metropolitanas;
- ligações aéreas regulares – tipo *shuttle* – em redes de transporte, incluindo *airport shuttles* (ligações frequentes cidade – aeroporto);
- turismo e *sight-seeing* em torno e sobrevoando pontos/áreas de interesse;
- transporte médico emergencial de urgência máxima (ambulância e resgate médico);
- transporte de pacientes para o hospital ou entre hospitais;
- gestão em áreas de desastres, incluindo monitoramento, combate a incêndios e evacuação de vítimas; e
- segurança nacional e vigilância aérea, por exemplo vigilância de territórios e áreas de fronteiras.

Cinco empregos principais como aeronave cargueira

- transporte de material médico de curta validade de tempo, incluindo itens sob refrigeração;
- transporte de material para pronto-socorro até áreas de desastres, incluindo alimentos, fármacos etc.;

⁷ Elaborado com base em: BRYCETECH. *Advanced air mobility: an assessment of a coming revolution in air transportation and logistics*. Guilford: BryceTech, 2023. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6571b635049516000f49be06/advanced-air-mobility-evidence-review.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2025.

- entregas diretas de produtos ao consumidor, em domicílio ou em centros de distribuição próximos;
- logística interna de empresas, ou seja, ao longo da cadeia de suprimentos; e
- transporte de carga pesada, por exemplo para correios ou de bens de consumo.

Segmentos de mercado

Os empregos principais acima poderão atender aos seguintes segmentos do mercado de passageiros:

- profissionais especializados deslocando-se do e para o local de trabalho;
- usuários de aeroportos, incluindo serviços de *shuttle* (ligação aeroporto – cidade);
- turistas/viajantes de lazer utilizando veículos AAM;
- empresas contratantes do uso de veículos AAM para passageiros;
- organizações especializadas na resposta rápida a emergências, incluindo entidades de apoio médico ou de atendimento em desastres naturais; e
- organizações ligadas à segurança nacional, como guardas costeiras e de controle de fronteiras.

Segmentos do mercado de carga

- consumidores individuais contratantes de serviços AAM para entrega de mercadorias;
- organizações especializadas na resposta rápida a emergências, empregando serviços AAM para entrega de bens perecíveis ou de curto prazo de validade;

- empresas (que não operadores logísticos) que eventualmente precisarão operar veículos no ambiente AAM;
- operadores logísticos responsáveis pela movimentação de mercadorias; e
- organizações ligadas à segurança nacional, tais como as forças armadas e de controle de fronteiras.

ISSN 1414-9230



Nesta edição:
Indústria
Inovação
Saúde
Mobilidade urbana
Tecnologia da informação
Indústria de base
Aeroespaço e defesa

Editado pelo Departamento de Relacionamento
da Área de Relacionamento, Marketing e Cultura do BNDES
Setembro de 2025



MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO,
INDÚSTRIA, COMÉRCIO
E SERVIÇOS

GOVERNO DO
BRASIL
DO LADO DO Povo BRASILEIRO