DESCARBONIZAÇÃO DOS TRANSPORTES

PERSPECTIVAS DIANTE DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

BNDES

DESCARBONIZAÇÃO DOS TRANSPORTES

PERSPECTIVAS DIANTE DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL

DESCARBONIZAÇÃO DOS TRANSPORTES

PERSPECTIVAS DIANTE DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Rio de Janeiro, 2025

BNDES

Coordenação
Thiago Miguez

Coordenação editorial
Flávia Castellan

Gerência de Editoração e Memória
Luisa de Carvalho e Silva

Copidesque e revisão
Tikinet

***Design* e diagramação**
Refinaria Design

Impresão
Leograf

© 2025

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

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

Distribuição gratuita.

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

Para solicitar um exemplar impresso, envie *e-mail* para gedit@bndes.gov.br.

BNDES

Av. República do Chile, 100 – Centro
Rio de Janeiro – RJ – CEP 20031-917
www.bndes.gov.br

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO 7

1. DESEMPENHO RECENTE DA ECONOMIA BRASILEIRA E RETOMADA DAS POLÍTICAS PÚBLICAS 9
Job Rodrigues, Thiago Miguez, Gabriel Daudt e Felipe Marques

2. A DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR AUTOMOTIVO COMO UMA OPORTUNIDADE PARA A ENGENHARIA AUTOMOTIVA BRASILEIRA 41
Bruno Plattek, Paulo Renato Villarim e Carlos Eduardo Cavalcanti

3. OPORTUNIDADES NA CADEIA DE MATERIAIS MINERAIS PARA BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS 69
Pedro Paulo Dias e João Paulo Cotta da Silva

4. O PAPEL DOS BIOCOMBUSTÍVEIS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DA MOBILIDADE 93
Artur Yabe Milanez, Diego Duque Guimarães, Marcelo Machado da Silva e Vinícius Toshio Pereira Nakano

5. OS ÔNIBUS ELÉTRICOS E A DESCARBONIZAÇÃO DA MOBILIDADE URBANA 111
Filipe de Oliveira Souza e Clarissa Taquette Vaz

6. DESCARBONIZAÇÃO NO TRANSPORTE DE CARGAS: ALTERAÇÃO ESTRUTURAL DA MATRIZ LOGÍSTICA *VERSUS* GANHOS DE EFICIÊNCIA NOS MODOS DE TRANSPORTE 131
Felipe Borim Villen, Tiago Toledo Ferreira, Bernardo Furtado Nunes, Edson José Dalto, Marco Aurélio Cabral Pinto e Paulo Marcelo Machado Costa

APRESENTAÇÃO

Desde o início do novo mandato do sr. presidente da República Luís Inácio Lula da Silva, em 2023, tornou-se claro que o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) precisa se fortalecer para fazer frente aos novos desafios do desenvolvimento nacional. Essa necessidade vem do entendimento de que é indispensável aumentar os investimentos públicos e privados para retomar o crescimento brasileiro em bases sustentáveis. Além disso, o Banco tem papel essencial a cumprir como o principal financiador e estruturador de projetos de longo prazo do país.

A gestão do presidente Aloizio Mercadante à frente do BNDES carrega indubitavelmente essa missão. O novo BNDES que vem sendo construído sob sua administração ampliou os desembolsos para todos os segmentos produtivos no comparativo entre 2022 e 2024, com destaque para as exportações (215,5%), a inovação (382,4%) e a infraestrutura (16,0%). O desembolso também cresceu em todas as regiões do país, inclusive para o Norte (139,2%) e o Nordeste (1,5%).

Ao mesmo tempo, seguimos com a missão de contribuir com o planejamento e o financiamento das políticas públicas federais, destacando-se: o Novo PAC, coordenado pela Casa Civil, que pretende ampliar e modernizar nossa infraestrutura; a Nova Indústria Brasil, coordenada pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (Mdic), com as seis missões para a neoindustrialização; e o Plano de Transição Ecológica, coordenado pelo Ministério da Fazenda, que lançará os alicerces para uma descarbonização justa da economia. Apenas nessas três iniciativas o BNDES deve alocar R$ 570 bilhões até o fim de 2026.

Para dar conta desse aumento de demanda, o BNDES intensificou o diálogo com a sociedade e com o Congresso Nacional a fim de construir novos instrumentos que ampliassem e diversificassem suas fontes de financiamento, permitindo o crescimento de sua atuação com transparência e responsabilidade

fiscal. Citam-se a criação das Letras de Crédito do Desenvolvimento (LCD) e do Fundo de Investimento em Infraestrutura Social (Fiis), bem como a expansão dos recursos do Fundo Clima – políticas com previsão de divulgação e avaliação da aplicação dos recursos.

Essas contribuições ainda vêm acompanhadas pelo fortalecimento das atividades de monitoramento, avaliação e produção de conhecimento como um dos alicerces da atual administração. Isso parte da compreensão de que o BNDES tem uma posição privilegiada de constante interlocução com outros agentes públicos, com o setor privado e com a academia, conseguindo, assim, reunir informações e visões plurais ao participar dos debates mais atuais dos cenários nacional e internacional. Dessa forma, divulgar suas análises e percepções setoriais é uma maneira importante de contribuir para o debate público.

O lançamento desta publicação é parte de tal estratégia e pode ser considerado um dos marcos da retomada da análise estrutural pelo BNDES. *Descarbonização dos transportes – Perspectivas diante da transição energética* tem o objetivo de compilar a visão dos técnicos da Casa sobre o tema, que tem como mérito reunir elementos presentes nas três políticas federais citadas, propiciando a discussão sobre infraestrutura, neoindustrialização e economia de baixo carbono simultaneamente. O primeiro artigo traz um resumo da situação econômica nos últimos vinte anos, que situa o leitor sobre questões importantes nos âmbitos macroeconômico e produtivo. Esse preâmbulo é importante para o entendimento dos desafios lançados nos cinco artigos seguintes, que abordam a descarbonização dos transportes sob as óticas dos setores automotivo, de minerais críticos, de biocombustíveis, de logística e de mobilidade urbana. Assim, a publicação resgata uma análise que combina elementos macroeconômicos e setoriais com o objetivo de aprimorar a formulação de políticas públicas, elementos necessários para uma transformação do país que seja sustentável e com justiça social.

Nelson Henrique Barbosa Filho
DIRETOR DE PLANEJAMENTO E RELAÇÕES INSTITUCIONAIS DO BNDES

1

Desempenho recente da economia brasileira e retomada das políticas públicas

Job Rodrigues
Thiago Miguez
Gabriel Daudt
Felipe Marques*

* Economistas do Departamento de Análise e Avaliação de Política da Área de Planejamento e Pesquisa Econômica do BNDES. Os autores agradecem a Lucas Teixeira (Unicamp) e Luiz Daniel Willcox (BNDES) os comentários, isentando-os de qualquer responsabilidade por eventuais equívocos.

INTRODUÇÃO

O cenário internacional recente vem sendo ditado pelas chamadas megatendências globais, como a crise climática, o aprofundamento do processo de digitalização e a aceleração do envelhecimento populacional, ao lado da necessidade de se promover o crescimento econômico e compatibilizá-lo com justiça social e respeito ao meio ambiente. Essas tendências têm sido frequentemente apontadas como as razões mais comuns para a construção das modernas políticas públicas. Outros fatores, como o aumento da competitividade econômica do Leste Asiático, especialmente o avanço da China, reforçam as discussões sobre nosso desenvolvimento econômico.

Nesse contexto, é necessário que o Brasil aprofunde os estudos sobre sua estrutura produtiva, verificando se os padrões nela observados favorecem a competitividade, a criação de valor, a geração de emprego sustentável e o atendimento às necessidades sociais do país. Em outras palavras, considerando que a estrutura produtiva de um país ajuda a moldar vários aspectos de sua sociedade, desde o nível de bem-estar material até padrões de desigualdade de renda, o Brasil deve perseguir uma rota que reverta a perda de complexidade econômica observada no passado recente.

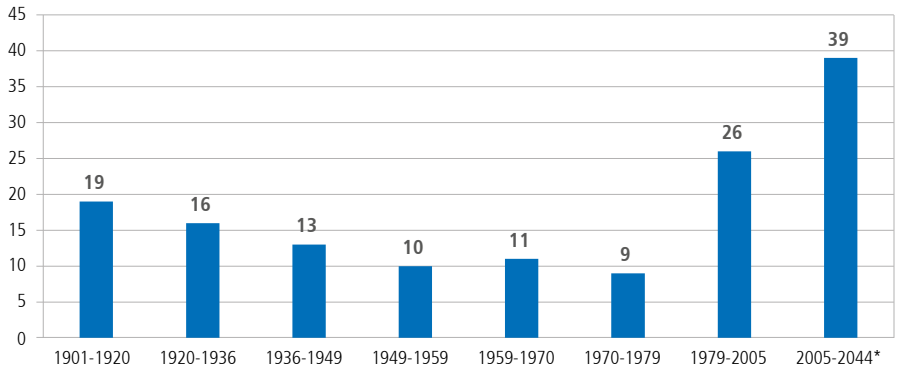
Este texto oferece uma breve caracterização da economia brasileira no século XXI, apresentando alguns indicadores-chave que permitem analisá-la sob uma perspectiva estrutural. O artigo está organizado em três seções. A primeira seção é dedicada a apresentar um breve resumo do quadro macroeconômico da economia brasileira nas últimas décadas, com informações sobre a evolução do produto interno bruto (PIB), do investimento e do mercado de trabalho. A segunda tem como foco estatísticas setoriais, abordando temas como inovação, produtividade, comércio exterior e valor adicionado. O texto se encerra com uma seção sobre os desafios contemporâneos e as políticas públicas que estão sendo construídas para superá-los.

PAINEL MACROECONÔMICO

Em uma perspectiva de longo prazo, observa-se uma nítida ruptura do ritmo de expansão da economia brasileira. Entre 1901 e 1979, o ritmo médio de crescimento foi de 6% ao ano (a.a.), com destaque para os trinta anos entre

1950 e 1980, quando essa média foi de 7,3% a.a. O Gráfico 1 aponta o grau de dinamismo da economia brasileira em várias épocas ao mostrar o tempo que o país levou para duplicar o valor de seu PIB ao longo do século XX.[1] Entre 1901 e 1949, o valor do PIB passou a dobrar cada vez mais rápido e manteve um ritmo acelerado de crescimento a cada década entre 1950 e 1970. No entanto, após 1979, o PIB só voltou a dobrar de valor em 2005, 26 anos depois. Além disso, mantida a média de crescimento pós-2005, ele só deve dobrar novamente em 2044, ou seja, 39 anos depois do marco anterior.

Gráfico 1. Tempo em anos para o PIB brasileiro dobrar de valor



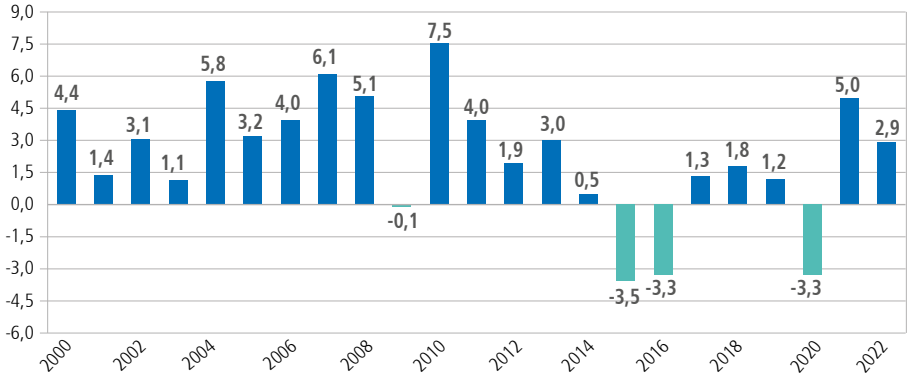
Fonte: Elaboração própria, com base em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): 1901-1999 – Estatísticas do Século XX (disponível em: https://seculoxx.ibge.gov.br/economicas/contas-nacionais. Acesso em: 9 nov. 2023); 2000-2021 – Sistema de Contas Nacionais (SCN) (disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html. Acesso em: 9 nov. 2023); e 2022-2044 – replicação da média do período 2005-2021.

Focando o desempenho da economia no período mais recente, vale destacar que entre 2000 e 2022 o PIB brasileiro cresceu a uma taxa média de 2,2% a.a., enquanto a economia mundial cresceu a uma média de 2,9% a.a.[2] Nesse mesmo período, houve apenas oito ocasiões em que o Brasil cresceu acima da média mundial – cinco delas entre 2004 e 2010. A percepção de baixo dinamismo é reforçada quando se observa no Gráfico 2 que a taxa de crescimento foi superior a 4% a.a. em apenas seis ocasiões, enquanto em 11 ocasiões ela não chegou sequer a 1,5% a.a. (em quatro delas houve recessão).

1 Para o PIB dobrar de valor a cada década, ele precisa crescer a uma média anual de 7,2%.

2 Média calculada a partir da base de dados do Banco Mundial. Disponível em: https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG. Acesso em: 28 nov. 2023.

Gráfico 2. Taxa de crescimento do PIB do Brasil (%)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SCN/IBGE (disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html. Acesso em: 9 nov. 2023).

Observa-se que foi também entre 2004 e 2010 que o Brasil teve seu período de maior crescimento no século XXI, com uma taxa média de 4,3% a.a., a despeito da crise internacional de 2008-2009. Também é importante destacar que simultaneamente a esse crescimento ocorreu uma redução da desigualdade de renda e da pobreza, além de a inflação ter permanecido controlada. Alguns fatores explicam esse melhor desempenho. Primeiramente, os termos de troca foram particularmente favoráveis graças ao *boom* nos preços das *commodities* minerais e alimentícias (notadamente minério de ferro e soja), o que contribuiu para aliviar a restrição externa do país. Ao mesmo tempo, o crescimento econômico foi favorecido por uma série de políticas públicas, como a valorização do salário mínimo, a criação do Bolsa Família, a expansão do crédito e a realização de programas de investimento, como o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), o Minha Casa, Minha Vida e o Luz para Todos. Consequentemente, o setor privado respondeu a esses estímulos aumentando seus investimentos e mantendo o mercado de trabalho aquecido.[3]

A partir de 2011, diversos fatores levaram a uma reorientação da política econômica, como o fato de que boa parte dos países ainda sentia os efeitos da crise internacional de 2008-2009. A nova política econômica atenuou o vigor da demanda agregada, gerando certa desaceleração no crescimento do PIB, que ainda assim se manteve no campo positivo no período de 2011 a 2014.

3 Serrano e Summa (2012) apresentam um panorama mais extenso sobre essa fase da economia brasileira.

O período entre 2015 e 2020 foi marcado por três anos recessivos – duas quedas consecutivas, em 2015 (-3,5%) e em 2016 (-3,3%), e uma queda em 2020 (-3,3%), decorrente da pandemia de Covid-19 – e por índices muito modestos nos demais anos. No geral, a taxa de crescimento média entre 2014 e 2022 foi de apenas 0,2% a.a., e o PIB brasileiro só voltou ao patamar de 2013 em 2022.

A dinâmica do crescimento fica mais evidente quando observada do ponto de vista da contribuição de cada um dos componentes da demanda agregada, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Contribuição dos componentes da demanda ao crescimento do PIB (%)

ANO	CONSUMO DAS FAMÍLIAS	CONSUMO DO GOVERNO	FORMAÇÃO BRUTA DE CAPITAL FIXO (FBCF)	VARIAÇÃO DE ESTOQUES	EXPORTAÇÕES	IMPORTAÇÕES	PIB
2001	0,50	0,49	0,24	-0,36	0,94	-0,41	1,4
2002	0,84	0,74	-0,27	-1,00	0,80	1,94	3,1
2003	-0,34	0,32	-0,71	0,24	1,57	0,06	1,1
2004	2,42	0,74	1,41	0,33	2,20	-1,34	5,8
2005	2,66	0,37	0,34	-0,79	1,60	-0,98	3,2
2006	3,20	0,67	1,14	0,32	0,74	-2,10	4,0
2007	3,86	0,77	2,06	0,78	0,89	-2,28	6,1
2008	3,88	0,39	2,21	0,61	0,05	-2,04	5,1
2009	2,67	0,55	-0,41	-2,72	-1,25	1,04	-0,1
2010	3,86	0,77	3,41	2,00	1,27	-3,79	7,5
2011	2,90	0,42	1,40	-0,15	0,52	-1,12	4,0
2012	2,11	0,43	0,16	-0,72	0,08	-0,14	1,9
2013	2,13	0,28	1,21	0,05	0,22	-0,88	3,0
2014	1,35	0,15	-0,88	-0,29	-0,18	0,32	0,5
2015	-2,03	-0,28	-2,77	-1,17	0,75	1,94	-3,5
2016	-2,46	0,04	-2,16	-0,26	0,11	1,45	-3,3
2017	1,27	-0,14	-0,40	0,78	0,61	-0,81	1,3
2018	1,52	0,16	0,76	-0,26	0,51	-0,91	1,8
2019	1,68	-0,10	0,61	-0,40	-0,37	-0,19	1,2
2020	-2,97	-0,74	-0,27	-0,37	-0,32	1,40	-3,3
2021	1,87	0,84	2,14	1,38	0,72	-2,18	4,8

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SCN/IBGE (disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html. Acesso em: 9 nov. 2023).
Nota: Os elementos em destaque representam os componentes que mais contribuíram positivamente para o crescimento do PIB no respectivo ano.

A Tabela 1 aponta que, em geral, a maior contribuição ao crescimento de cada ano é dada pelo crescimento do consumo das famílias. Além de ser o componente com maior representatividade no PIB (aproximadamente 60%), ele apresentou uma trajetória de crescimento acentuada, especialmente a partir de 2004, devido aos fatores já elencados. Como esperado, o mesmo ocorre no sentido inverso, ou seja, em anos de recessão, o consumo das famílias também apresenta uma das maiores contribuições recessivas.

As exportações tiveram uma contribuição relevante apenas nos primeiros anos da série. De fato, a economia brasileira sempre foi puxada pelo mercado interno. Ainda que as exportações tenham crescido acima do PIB no período (média de 4,1% ao ano), sua baixa participação na economia (de aproximadamente 13%) faz com que sua contribuição seja expressiva apenas nos anos em que o mercado doméstico está desaquecido e não há turbulências internacionais. Quanto ao padrão de inserção das exportações brasileiras, no período analisado, o país se tornou mais especializado em produtos primários e de baixo valor agregado, algo que será examinado na próxima seção.

Quanto às importações, sua contribuição positiva nos anos de recessão deve ser interpretada com cautela. Deve-se considerar que essa variável representa um vazamento de renda, ou seja, de modo geral, toda vez que um país faz uma importação, ele está contribuindo para a expansão do PIB de outro país ao invés de contribuir para a ampliação do seu próprio. Assim, quando as importações caem (algo típico em épocas recessivas),[4] isso acarreta uma contribuição positiva para a taxa de crescimento do PIB, o que significa que o vazamento de renda naquele ano foi inferior em comparação com o ano anterior.[5]

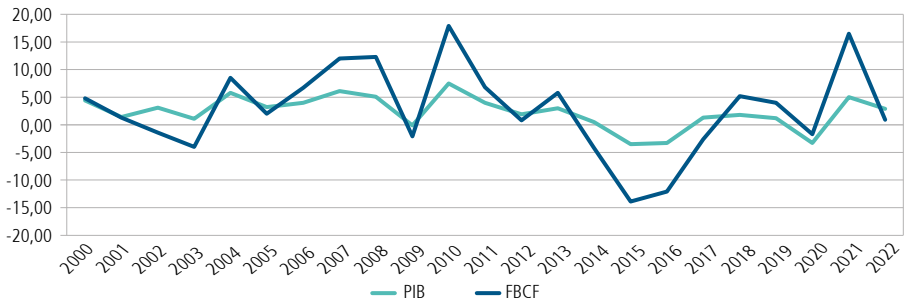
4 A principal característica das importações é o fato de serem "induzidas", ou seja, elas costumam acompanhar de perto a variação do PIB. Sempre que o PIB aumenta, as importações também aumentam; e quando o PIB cai, as importações caem.

5 Ainda que a importação possa permitir a produção de bens e serviços nacionais e, portanto, possa contribuir indiretamente para o crescimento do PIB, do ponto de vista contábil, ela é considerada diretamente uma contribuição negativa. Há metodologias que buscam descontar o valor das importações dentro de cada componente da demanda e, assim, averiguar a contribuição líquida de cada um, como Fevereiro (2016) e Lara e outros (2023).

Outra variável importante de ser mencionada é a formação bruta de capital fixo (FBCF), conhecida comumente como o investimento da economia.[6] O que torna o investimento especial é seu caráter dual: no curto prazo ele é um componente da demanda agregada, enquanto no longo prazo ele atua expandindo a capacidade de oferta da economia. Adicionalmente, como uma parcela significativa das inovações é incorporada em novos ativos de capital fixo, o ritmo de mudança tecnológica e o avanço da produtividade dependem em grande parte do ritmo de expansão do investimento. Assim, a sustentabilidade de uma trajetória de crescimento econômico requer que a expansão da capacidade produtiva seja coerente com o aumento da demanda. Ao mesmo tempo, aumentos consistentes na atividade econômica são um importante estímulo ao investimento, ou seja, as empresas só sentem segurança para investir se elas acreditarem que haverá um aumento na demanda por seus produtos e serviços.

De fato, o que se observa na Tabela 1 é que a contribuição da FBCF para o crescimento acompanhou de perto os movimentos do PIB. Sua contribuição foi muito relevante em anos de recessão (negativa) e de alto crescimento (positiva), sendo modesta em anos de crescimento mediano. Esse comportamento é ainda mais acentuado quando se observa a comparação entre as taxas de crescimento do PIB e da FBCF. Conforme indica o Gráfico 3, nos anos de alto crescimento, há uma resposta acentuada do crescimento da FBCF. Já quando o PIB cai, a FBCF cai proporcionalmente mais que o PIB.

Gráfico 3. Taxas de crescimento do PIB e da FBCF (%)



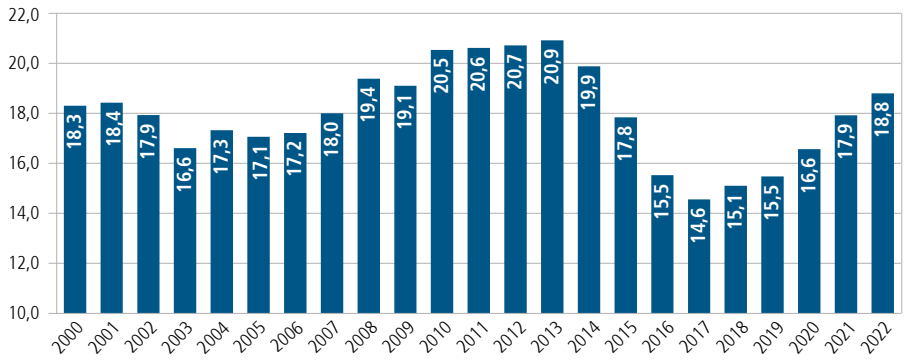
Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SCN/IBGE (disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html. Acesso em: 9 nov. 2023).

6 De fato, na contabilização do PIB, o investimento é composto pela soma da FBCF e da variação de estoques, mas, como a variação de estoques tem uma participação pequena na economia, é comum que a FBCF ganhe sozinha a alcunha de "investimento da economia".

Uma forma adicional de ver a relação entre crescimento e investimento é por meio da taxa de investimento, que corresponde à razão entre a FBCF e o PIB. Sempre que o crescimento da economia acelera, a taxa de investimento tende a aumentar como resposta; já quando a economia perde força, a taxa de investimento tende a cair. Esses movimentos reforçam o caráter induzido do investimento.

Isso pode ser constatado observando a própria trajetória da economia brasileira. Nas décadas de 1950, 1960 e 1970, que apresentaram elevadas taxas de crescimento do PIB, a taxa de investimento seguiu na mesma direção, aumentando de modo expressivo, com médias de 15,5%, 16,4% e 21,9%, respectivamente. Já a partir dos anos 1980, quando a economia começou a apresentar taxas médias de crescimento mais baixas (incluindo alguns períodos recessivos), a taxa de investimento teve um comportamento mais instável e com tendência de queda. Embora ela tenha se mantido nos mesmos 21,9% durante a década de 1980, passou para 18,8% nos anos 1990, 17,9% nos anos 2000 e 18,1% nos anos 2010. O Gráfico 4 mostra seu comportamento no período recente, em que é possível observar alguns movimentos de ciclo, refletindo os movimentos apresentados nos gráficos 2 e 3.

Gráfico 4. Taxa de investimento da economia brasileira (%)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SCN/IBGE (disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html. Acesso em: 9 nov. 2023).

Observa-se no Gráfico 4 como a taxa de investimento reagiu em dois momentos bastante distintos da economia brasileira nos últimos anos: acelerando no período de maior crescimento, entre 2004 e 2010, e caindo rapidamente no período recessivo, entre 2015 e 2017.

O movimento de aceleração da taxa de investimento entre 2004 e 2010 foi decorrente de uma média de crescimento da economia de 4,3% a.a. no período. Já entre os anos de 2011 e 2014, a taxa média de crescimento se manteve positiva, mas desacelerou para 1,8% a.a., levando a taxa de investimento a se estabilizar próxima de 20,0%. Já no período de 2015 a 2018, quando a taxa de variação média do PIB foi negativa em -0,1%, a taxa de investimento desacelerou fortemente, inclusive esse foi o momento em que se observou o menor valor de todo o período entre 2000 e 2022, que foi 14,6% em 2017.

Por fim, o período mais recente, entre 2019 e 2022, apesar de ter sido marcado pelos efeitos da pandemia, apresentou uma tendência de alta na taxa de investimento. No entanto, valem duas ressalvas sobre esse movimento. Primeiramente, o valor da FBCF em 2019 ainda não havia alcançado seu valor nominal de 2014, ou seja, a recessão do período anterior foi tão intensa que, embora a taxa de investimento tenha se recuperado, o nível de investimento ainda era baixo. Assim, possivelmente, o que ocorreu nesses últimos anos da série está mais ligado a reposições do capital depreciado do que à expansão da capacidade de oferta.

O segundo ponto importante é que, a partir de 2018, com o fim do Repetro,[7] as plataformas de petróleo que antes não eram contabilizadas como FBCF passaram a sê-lo. De fato, nesse cenário houve um duplo movimento.[8] Não apenas as novas plataformas passaram a ser contabilizadas na FBCF, o que já distorceria o comparativo com os anos anteriores, como as plataformas que já haviam sido produzidas e "exportadas" antes de 2018 precisaram ser "importadas". Esse movimento, que é meramente contábil, também foi absorvido pela FBCF entre 2018 e 2021 e pode ter levado a impactos que adicionaram até 1 ponto percentual (p.p.) na taxa de investimento do

7 O Repetro – regime aduaneiro especial de exportação e de importação de bens destinados às atividades de pesquisa e de lavra das jazidas de petróleo e de gás natural – era um regime tributário que isentava de uma série de impostos os investimentos em máquinas e equipamentos específicos do setor de petróleo e gás, em especial a exportação ficta desses bens (quando a posse do equipamento é transferida para uma empresa do exterior, mas ele não deixa o território nacional).

8 Ver Olinto e outros (2021).

período de modo artificial. Assim, os números oficiais provavelmente estão subestimados no período pré-2018 e superestimados entre 2018 e 2021.

Além dos resultados agregados, do ponto de vista do desenvolvimento econômico, é importante observar o investimento sob uma ótica mais desagregada, entendendo o que foi adquirido. Isso pode ser feito a partir da análise de seus componentes, a saber: "máquinas e equipamentos", "construção" (que ainda pode ser separada em "residencial" e "não residencial") e "outros ativos fixos". Tal separação está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Componentes da formação bruta de capital fixo (% do PIB)

COMPONENTES	2000	2004	2010	2014	2018	2021
Máquinas e equipamentos	5,3	5,9	8,0	7,3	6,1	7,9
Construção	10,9	9,1	10,2	10,3	6,8	7,6
Residencial	3,6	3,3	4,1	4,5	3,3	3,3
Não residencial	7,3	5,8	6,1	5,8	3,6	4,3
Outros ativos fixos	2,1	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2
Taxa de investimento	**18,3**	**17,3**	**20,5**	**19,9**	**15,1**	**18,1**

Fonte: Elaboração própria, com base em Miguez e Freitas (2021) para 2000 e 2004 e em SCN/IBGE (disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html. Acesso em: 9 nov. 2023) para os demais anos.

O primeiro ponto que chama a atenção é que a participação de "outros ativos fixos"[9] é pequena e constante ao longo do tempo. Assim, são os investimentos em "máquinas e equipamentos" e em "construção" que determinam a trajetória da FBCF e da taxa de investimento. Com relação ao primeiro grupo, observa-se que ele apresenta uma trajetória positiva até 2010, muito influenciado, como veremos na seção seguinte, pelo investimento nos setores agropecuário, extrativo e de transportes, que são grandes demandantes de máquinas e equipamentos. A queda posterior se deve à redução do investimento nesses setores (exceto o agropecuário) e ao baixo dinamismo dos

9 Essa categoria é composta basicamente dos chamados ativos "orgânicos" (plantações perenes e animais utilizados para reprodução) e dos investimentos realizados na descoberta de novas jazidas de petróleo.

investimentos da indústria de transformação, seu maior demandante. A recuperação em 2021, como já apontado, tem contribuição das importações fictas[10] de plataformas de petróleo.

Já os investimentos em "construção" têm dois importantes impulsionadores que fizeram sua participação no PIB aumentar entre 2004 e 2010: a retomada dos investimentos públicos, visto que a administração pública é o maior demandante de obras civis do país, e a expansão do crédito imobiliário, que, aliada à diminuição do desemprego e ao aumento da renda média, impulsionou fortemente a construção residencial. No período pós-2014, contudo, a recessão econômica se somou a uma crise que afetou grandes *players* do setor, levando a um duplo choque (de demanda e de oferta) que reduziu sensivelmente a contribuição de "construção" para a FBCF e para o PIB.

Como se viu neste breve resumo, o panorama macroeconômico da economia brasileira nas últimas décadas foi de baixo dinamismo, exceto pelo período entre 2004 e 2010, quando todos os componentes da demanda contribuíram positivamente para o crescimento da economia. Na esteira desse baixo crescimento, os indicadores relativos à FBCF também apontaram uma situação preocupante. Após essa síntese macroeconômica, a próxima seção examina alguns aspectos setoriais. Esse elemento é importante para entender as interações entre os movimentos macro e microeconômicos e para indagar até que ponto o cenário formado nos últimos anos segue um desenho favorável ao desenvolvimento econômico e social do país e quais são as possíveis dificuldades para sua reversão.

PAINEL SETORIAL

Os setores que compõem uma economia e suas respectivas contribuições para o desenvolvimento de um país resultam de processos históricos provenientes da interação entre as iniciativas desses setores e as políticas públicas de desenvolvimento. A indústria, em particular, teve um papel proeminente na transformação econômica de diversos países. Muitas das economias hoje

10 As importações fictas são aquelas com efeito meramente contábil. No caso, são as já explicadas importações de plataformas de petróleo decorrentes do Repetro.

desenvolvidas passaram por um processo de substituição da agropecuária pela indústria entre fins do século XIX e a primeira metade do século XX. Outros países passaram por um processo semelhante a partir da segunda metade do século XX e, ainda que na maioria dos casos não tenham logrado o mesmo grau de sucesso, foram capazes de modernizar suas economias, como é o caso do Brasil.

Mais recentemente, observam-se, tanto nas economias centrais como em algumas periféricas, uma perda relativa de participação da indústria no PIB e no emprego e um aumento da presença do setor de serviços, o que vem motivando debates sobre as consequências dessa dinâmica e sobre a centralidade da indústria no processo de desenvolvimento. Não obstante, é interessante fazer algumas observações. Primeiramente, mesmo em decréscimo, o peso direto da indústria ainda é relevante para o PIB e para o emprego na maioria dos países, ao que se somam dois vetores indiretos importantes, descritos a seguir.

Apesar de as cadeias globais de valor alocarem a atividade manufatureira na parcela com o menor valor adicionado e os serviços no segmento de maior valor agregado, não é possível generalizar em nenhuma das direções. As cadeias intensivas em conhecimento na verdade se mostram muito integradas à existência de setores industriais que comandem a dinâmica tecnológica, ou seja, segue sendo vital que a parcela da indústria intensiva em conhecimento (por exemplo, bens de capital, automotiva e medicamentos) permaneça fisicamente presente nos países para alimentar o processo de inovação. Assim, o que se observa nas economias centrais é que o tipo de serviço que tem surgido em substituição ao trabalho nas manufaturas é de alto valor agregado (como pesquisa e desenvolvimento – P&D –, desenvolvimento de *softwares* e consultorias especializadas) e se integra à indústria, ou seja, a indústria acaba induzindo a transformação dos demais setores. De fato, esse poder de indução se dá tanto pelo lado da demanda industrial, definindo padrões técnicos elevados de seus fornecedores (como no caso dos serviços de alto valor agregado), quanto pelo lado da oferta industrial, fabricando produtos que contribuem para outros setores aumentarem sua produtividade, reduzirem seus custos ou mesmo diminuírem impactos ambientais (como

no caso de máquinas e equipamentos modernos e mais eficientes e produção de novos materiais).[11]

Já nas economias periféricas, observa-se que os serviços estão concentrados nas categorias de valor agregado mais baixo, como comércio, serviços pessoais (cabeleireiros, manicures, serviços domésticos) e alimentação. Nesse caso, como há uma perda da competitividade da manufatura que leva a uma redução mais ampla de sua participação na economia, os trabalhadores que perderam seus empregos acabam relegados a algum tipo precário de inserção em serviços mais simples, pouco integrados à indústria e, portanto, de baixa produtividade e com salários mais baixos.

Ao mesmo tempo, identificou-se a partir dos anos 1980 e 1990 um movimento de reordenamento global da produção industrial. Houve aumento da participação dos países asiáticos nas atividades manufatureiras de baixo valor agregado em detrimento das demais regiões – de modo mais generalizado a América Latina, mas também as economias centrais. No entanto, o avanço da competitividade do Leste Asiático e o rápido processo de *catch-up* tecnológico que alguns desses países estão implementando acirraram substancialmente o cenário de competitividade global também nas atividades manufatureiras de valor agregado mais elevado.

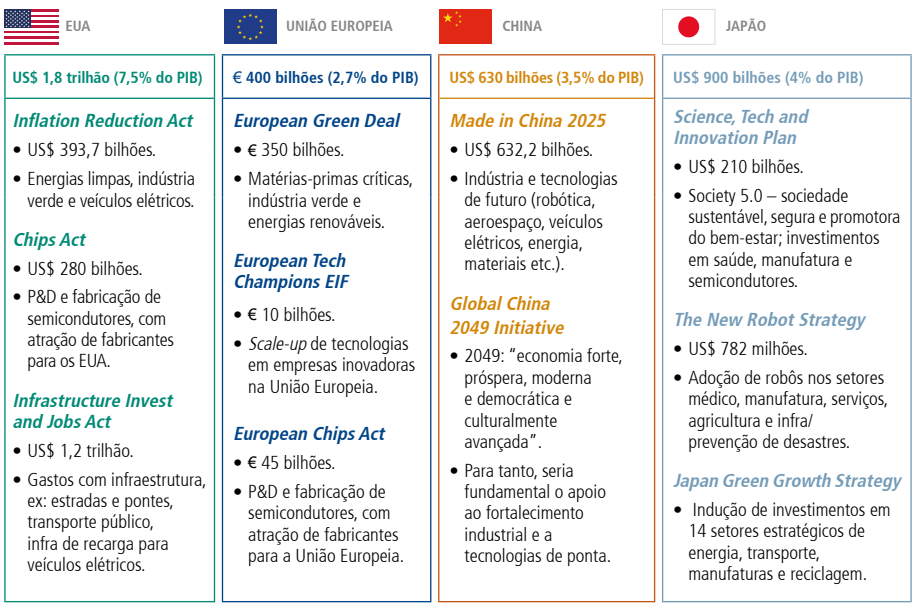
Uma das respostas que as economias centrais têm implementado é o retorno das políticas industriais, conforme apontado, por exemplo, por Chang e Andreoni (2020), Juhász, Lane e Rodrik (2023) e por analistas do Fundo Monetário Internacional (FMI), como Cherif e Hasanov (2019) e Evenett e outros (2024). Desde a crise internacional de 2008, nota-se o retorno da política industrial ao centro do debate sobre desenvolvimento e retomada do crescimento econômico, especialmente nos países centrais. Diversos governos têm desenvolvido e implementado esse tipo de política não somente para estimular o crescimento e a produtividade, mas para enfrentar desafios sociais e temas específicos da complexa agenda ambiental e climática. Assim, a política

11 A relação direta entre a importância da indústria e o crescimento da produtividade da economia é uma relevante contribuição de Nicholas Kaldor, cuja obra seminal no tema é *Causes of the slow rate of economic growth of the United Kingdom: an inaugural lecture* (Kaldor, 1966). Ainda, Thirlwall (1983) e Lamonica e Feijó (2011) podem ser consultados para o debate das chamadas "Leis de Kaldor", esta última obra com uma interpretação para o caso brasileiro.

industrial vem sendo usada para questões que vão desde a limpeza da matriz energética até a produção de semicondutores, passando por reforços dos sistemas produtivos e inovativos ligados à saúde, em decorrência das fragilidades expostas pela pandemia de Covid-19.

Entre as estratégias que vêm sendo implementadas, podem ser citadas iniciativas para relocalização da indústria nos respectivos territórios nacionais (fenômeno conhecido como *reshoring*), com incentivos à aquisição de produtos com ampliação do conteúdo local ou regional. São importantes também políticas de inovação que apoiem o surgimento de novas tecnologias habilitadoras, investimentos do governo e da iniciativa privada em institutos especializados para o desenvolvimento dessas tecnologias e formação de consórcios de empresas e institutos de ciência e tecnologia para o desenvolvimento de capacitações coletivas (*industrial commons*).[12] A Figura 1 apresenta um resumo de algumas iniciativas internacionais.

Figura 1. Exemplos de iniciativas internacionais de políticas industriais



Fonte: Elaboração própria.

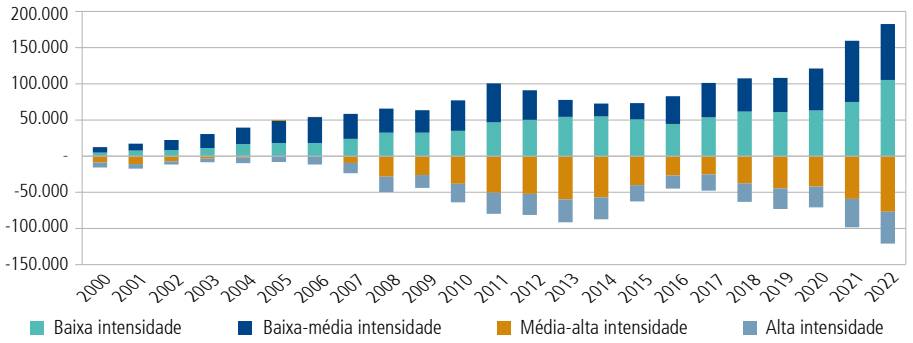
12 Os *industrial commons* foram definidos por Pisano e Shih (2009) como o conjunto de capacidades que não apenas uma indústria tem, mas também sua rede de fornecedores. Assim, quando uma indústria decide realocar geograficamente sua produção, não apenas as capacidades dela ficam ameaçadas, mas também as das demais empresas, o que pode acarretar riscos de competitividade sistêmicos a partir de decisões aparentemente isoladas.

É possível observar na Figura 1 que há um investimento massivo de alguns países em suas estratégias industriais. Os Estados Unidos da América (EUA), por exemplo, já anunciaram US$ 1,8 trilhão em três programas, o que equivale a 7,5% do seu PIB. Também é possível notar alguns elementos em comum nessas estratégias, como a presença de programas associados à transição energética, à indústria verde (descarbonização da indústria) e à fabricação de semicondutores.

É nesse cenário de intensa competição, retomada das políticas industriais e ampliação dos investimentos que a moderna discussão sobre desenvolvimento econômico se insere. É preciso então que se avalie a estrutura produtiva brasileira para identificar os principais pontos de atenção e as oportunidades e necessidades de atuação da política pública.

Partindo primeiramente de uma visão mais ampla, é possível enxergar questões associadas à estrutura produtiva com os dados de comércio exterior. Do ponto de vista meramente macroeconômico, o Brasil tem gerado superávits frequentes na balança comercial desde 2000 – fato que persistiu mesmo em épocas de câmbio apreciado –, sendo raros os anos de exceção. Contudo, um olhar mais detalhado considerando o grau de intensidade tecnológica dos produtos transacionados conta uma história um pouco mais preocupante, como se vê no Gráfico 5.

Gráfico 5. Saldo comercial por intensidade tecnológica (US$)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados do ComexStat/Secex (disponível em: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/comercio-exterior/estatisticas/base-de-dados-bruta. Acesso em: 17 nov. 2023).

Em todos os anos entre 2000 e 2022, sem exceção, houve superávit nos setores de baixa e baixa média intensidade tecnológica, e tal superávit apresenta tendência de crescimento. Por outro lado, os setores de média alta e alta intensidade

tecnológica apresentaram déficits consistentes e com tendência de piora (exceto no período recessivo de 2015 e 2016), evidenciando um perfil de país que exporta produtos menos sofisticados e importa produtos mais complexos. Como os setores de maior intensidade tecnológica tendem a ser os de maior valor agregado e de maior geração de empregos qualificados, o perfil observado da balança comercial reflete um desafio para o desenvolvimento econômico do país.

Esse perfil é fruto tanto da conjuntura externa como da estrutura produtiva do país. Por um lado, a conjuntura externa foi bastante favorável às *commodities* produzidas no Brasil, que tiveram influências positivas tanto dos preços como das quantidades exportadas, especialmente devido à demanda da China. Já a estrutura produtiva interna não apresentou uma trajetória tão favorável e é responsável por uma parte da explicação dos déficits nos setores de mais intensidade tecnológica. A Tabela 3 apresenta um resumo da evolução da estrutura produtiva brasileira nas últimas duas décadas a partir da produtividade e da distribuição do valor adicionado e das ocupações.

Tabela 3. Composição setorial da estrutura produtiva brasileira

SETOR	PRODUTIVIDADE DO TRABALHO**			VALOR ADICIONADO (% TOTAL)			OCUPAÇÕES (% TOTAL)		
	2000	2010	2020	2000	2010	2020	2000	2010	2020
Agropecuária	3,4	5,5	9,1	5,5	5,2	5,3	21,2	15,8	12,7
Indústria extrativa	75,2	92,3	125,4	1,4	2,4	3,0	0,2	0,3	0,2
Indústria de transformação	19,0	17,7	16,3	15,3	15,6	11,8	10,5	11,8	10,6
Siup*	61,1	61,3	68,9	3,1	2,7	3,1	0,7	0,7	0,7
Construção	12,9	13,0	11,8	7,0	5,7	4,0	7,1	8,0	7,1
Comércio	6,1	6,8	6,8	8,1	13,2	13,2	17,4	18,2	17,7
Outros serviços	17,4	20,0	19,2	49,5	44,7	49,3	38,0	40,0	45,9
Administração pública	20,8	20,1	18,1	10,1	10,5	10,4	4,9	5,3	5,0
Total	**13,1**	**14,9**	**15,2**	**100,0**	**100,0**	**100,0**	**100,0**	**100,0**	**100,0**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SCN/IBGE (disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html. Acesso em: 9 nov. 2023).
Notas: * Siup – serviços industriais de utilidade pública (energia, água, esgoto, coleta). ** R$ mil/pessoa ocupada (ano base: 2000). Os valores reais da produtividade do trabalho foram calculados com base na variação real do valor adicionado fornecido nas tabelas sinóticas do SCN.

Alguns movimentos chamam atenção na Tabela 3. Primeiramente, a produtividade geral da economia apresentou um desempenho preocupante, com uma taxa de crescimento acumulada entre 2000 e 2020 de apenas 16,4%, o que representa uma média de crescimento de apenas 0,76% ao ano.[13] Entre os destaques setoriais positivos, temos a agropecuária, que aumentou consideravelmente sua produtividade, em 168,1% (média de 5,1% ao ano), e a indústria extrativa, com ganhos acumulados de 66,7% (média de 2,6% ao ano). Já pelo lado das contribuições negativas, vale destacar a indústria de transformação, que viu sua produtividade cair 13,8% (média de -0,7% ao ano).

No caso do valor adicionado, a indústria de transformação também chama a atenção por sua perda de representatividade. Após chegar em 2010 com uma participação de 15,6%, quase estável em relação aos 15,3% em 2000, ela terminou 2020 com apenas 11,8%. A diminuição do peso da indústria de transformação foi acompanhada pelo aumento da participação da indústria extrativa, do comércio e dos outros serviços. Ao mesmo tempo, a distribuição da força de trabalho também passou por algumas mudanças. O maior destaque é a forte redução da participação da agropecuária, de 21,2% em 2000 para 12,7% em 2020. Simultaneamente, o setor de serviços teve um aumento de sua participação no total de ocupações, passando de 38,0% para 45,9%.

Em suma, o que se observou nos últimos anos foi que, apesar de ter atingido uma taxa considerável de crescimento, a agropecuária ainda apresentou um nível de produtividade baixo, porém crescente, e uma parcela das ocupações decrescente (um reflexo do ganho de produtividade), mas ainda significativa. A indústria extrativa e os serviços industriais de utilidade pública (Siup), embora tenham apresentado as maiores produtividades, empregaram uma parcela ínfima da população, enquanto os setores de comércio e serviços não foram muito dinâmicos do ponto de vista de produtividade, mas responderam por uma parcela relativamente maior das ocupações. A indústria de transformação, ao perder dinamismo e protagonismo, perdeu também o mencionado poder indutor de

13 O desempenho da produtividade da economia brasileira chama a atenção da literatura já há algum tempo, valendo destacar dois livros do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) dedicadas ao tema: *Produtividade no Brasil: desempenho e determinantes – volume 1: desempenho* (De Negri; Cavalcante, 2014) e *Produtividade no Brasil: desempenho e determinantes – volume 2: determinantes* (De Negri; Cavalcante, 2015).

transformar os demais setores. Assim, o resultado não poderia ser outro a não ser uma trajetória insatisfatória da produtividade agregada da economia.[14]

Corroborando esse perfil de especialização da economia brasileira, dados da Pesquisa Industrial Anual – Empresa do IBGE (PIA-Empresa/IBGE)[15] mostram queda expressiva do peso dos setores de alta e média alta intensidade tecnológica no valor adicionado da indústria, que passou de 30,2% em 2010 para 23,6% em 2020, evidenciando certa fragilidade do tecido industrial brasileiro.[16] Se não há dinamismo nos setores de maior intensidade tecnológica, então a demanda industrial perde complexidade e não há poder indutor capaz de transformar os demais setores. Quanto a esse desafio, a atuação do Estado precisa focar ativamente duas variáveis que são chave para a reversão desse quadro por constituírem vetores transformadores da economia: a inovação e o investimento.

Há algum tempo a inovação tem se destacado como um dos temas principais do debate sobre desenvolvimento econômico. De fato, ganhos de produtividade e de competitividade podem ser obtidos por meio de inovações de produto e de processo, e por isso as políticas industriais modernas tendem a incluir iniciativas relativas ao esforço inovador das empresas. Há duas maneiras básicas de atingir esse tipo de objetivo. Primeiramente, pode-se pensar em políticas horizontais que busquem que todas as empresas aumentem um pouco seu esforço inovador. Outra opção seria uma política mais verticalizada, por exemplo, concentrando o investimento nos setores que já são mais inovadores e, portanto, ampliando seu peso na economia.

Independentemente de qual seria a melhor estratégia, os números que serão mostrados na sequência apresentam uma situação de partida desafiadora para o Brasil, sugerindo que o volume de recursos aplicados no incentivo à inovação precisa aumentar substancialmente. As trajetórias apresentadas no

14 Estudo recente da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (Fiesp, 2023) aponta que a indústria precisaria investir 4,6% do PIB (contra uma estimativa atual de 2,6%) por pelo menos sete anos para atingir uma produtividade equivalente à de 55% dos EUA (contra um valor atual de 20%).

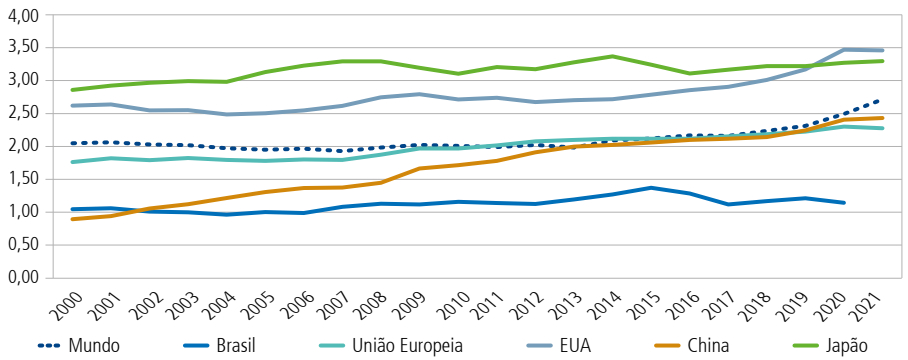
15 Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pia-empresa/tabelas/brasil/2022. Acesso em: 9 nov. 2023.

16 Passoni (2023) oferece uma abordagem complementar da desindustrialização ao estudar a mudança estrutural da indústria (e dos demais setores) a partir de uma análise insumo-produto. A autora aponta que os setores de maior intensidade passaram por um processo de perda de competitividade, com aumento da participação dos importados e baixo crescimento da produtividade do trabalho.

Gráfico 6 mostram que a média mundial de gastos em P&D, após passar vários anos estagnada em aproximadamente 2,0% do PIB, subiu regularmente desde 2013, passando de 2,0% do PIB naquele ano para 2,7% em 2021. O Brasil apresentou uma participação relativamente estável de cerca de 1,0% do PIB entre 2000 e 2004, quando iniciou uma leve tendência de alta até 2015 e atingiu 1,4% do PIB, o que permitiu ao país manter uma distância relativamente constante da média mundial até aquele momento. No entanto, a partir de 2016, observou-se uma trajetória de queda. Em 2020, o país já havia diminuído seus gastos em P&D para a proporção de 1,1% do PIB, na contramão da média mundial, portanto ampliando essa distância.

Comparando com o desempenho de outros países, a China chama bastante a atenção por apresentar um crescimento contínuo, partindo de uma proporção inferior a 1,0% do PIB em 2000 e chegando a 2,4% em 2021 – ainda abaixo da média mundial, mas já superando a União Europeia. Os EUA, que já apresentavam valores consistentemente acima da média mundial durante o período analisado, aceleraram os gastos a partir de 2013 e ultrapassaram o Japão, que em todos os anos teve valores bem acima da média mundial. Adiciona-se que é provável que esses países e a União Europeia aumentem o valor desse indicador como resultado das políticas industriais relatadas na seção anterior, o que pode levar a um aumento ainda maior da distância do Brasil nesse indicador em relação aos demais países.

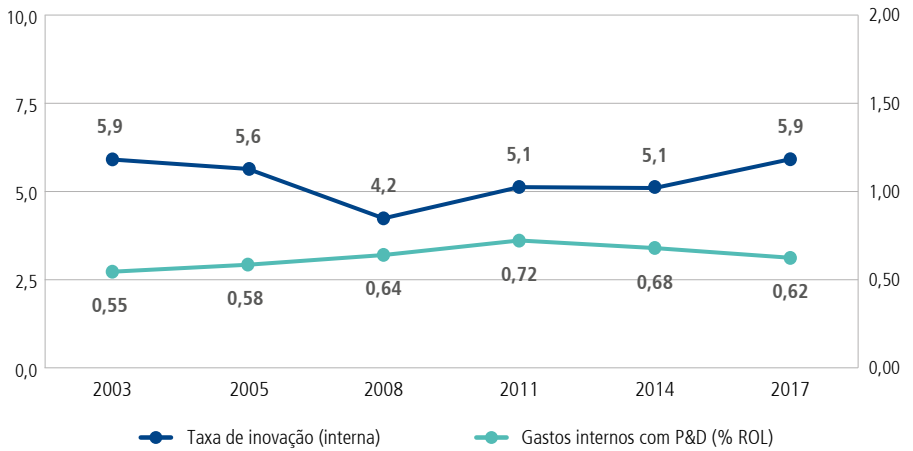
Gráfico 6. Gastos com pesquisa e desenvolvimento em países selecionados (% PIB)



Fonte: Adaptado da base de dados do World Bank Group. Disponível em: https://data.worldbank.org/indicator/GB.XPD.RSDV.GD.ZS. Acesso em: 28 nov. 2023.
Nota: Os dados do Brasil para 2021 ainda não estavam disponíveis até a data de editoração da publicação.

É possível observar um pouco mais detalhadamente o caso brasileiro a partir dos dados da Pesquisa de Inovação do IBGE (Pintec/IBGE).[17] Tomando como base as iniciativas internas de P&D das empresas, pode-se calcular tanto a taxa de inovação (percentual de empresas que implementaram alguma atividade de inovação) como o esforço inovativo (razão entre o valor dos dispêndios com atividades de P&D e a receita líquida das empresas). O Gráfico 7 indica que, para a indústria de transformação, o primeiro indicador ficou na casa dos 5%, enquanto o esforço inovativo apresentou uma média de 0,64%. Se, por um lado, talvez não seja esperado que uma grande quantidade de empresas realmente empreenda esforços internos de P&D, por outro, os valores médios para indústria de transformação podem ser considerados baixos.

Gráfico 7. Indicadores-síntese de P&D para a indústria de transformação (%)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados da Pintec/IBGE. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pintec/tabelas. Acesso em: 9 nov. 2023.

Analisando especialmente o caso dos setores de média alta e alta intensidade tecnológica, os dados da Pintec mostram que o esforço inovativo deles também não teve um bom desempenho. Para todo o conjunto de empresas pesquisadas nesses segmentos, o indicador caiu progressivamente: 2,9% em 2008, 2,6% em 2011, 2,5% em 2014 e 2,0% em 2017, com

17 Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pintec/tabelas. Acesso em: 9 nov. 2023.

destaque para alguns setores. No de químicos, por exemplo, passou de 2,5% em 2008 para 2,1% em 2017; em farmoquímicos e farmacêuticos, de 4,9% para 3,6%; e em máquinas e equipamentos, de 3,0% para 1,7%. Com uma contribuição positiva, há o setor de "fabricação de outros equipamentos de transporte", que ampliou seu esforço inovativo, passando de 2,0% para 5,8%. É importante mencionar que esse setor é formado pelas empresas dos segmentos de fabricação de embarcações, equipamentos metroferroviários e aeronaves e que, muito provavelmente, o resultado bastante acima da média do restante da indústria se deve aos investimentos deste último.[18]

Assim, independentemente da estratégia de inovação escolhida pelo Brasil, seja a mais horizontal, com aumento generalizado do esforço inovativo, ou a mais vertical, incentivando o esforço inovativo apenas de alguns setores, fica posto um desafio merecedor de atenção das políticas públicas. Tanto o indicador de esforço inovativo agregado (Gráfico 7) está abaixo da média mundial, como os setores mais inovadores vêm diminuindo os esforços na área.

O caso do outro vetor de transformação, o investimento, não é muito diferente. Como visto na seção "Painel macroeconômico", a dinâmica do investimento está fortemente relacionada ao desempenho da economia. Essa relação vale tanto no nível agregado quanto no nível microeconômico, ou seja, as decisões de investimento das empresas são determinadas majoritariamente pela expectativa de demanda e pela forma como elas acreditam que isso pressionaria a utilização da sua capacidade instalada. Observando os números apresentados na Tabela 4, é possível notar que os investimentos se comportaram de maneira muito similar ao do restante da dinâmica setorial apresentada até aqui.

18 Ainda que não seja possível afirmar com certeza que a contribuição do setor aeronáutico seja majoritária, é possível deduzir isso por sua importância na economia do país – relativamente maior que a dos demais segmentos – e por sua atuação tipicamente inovadora, pesando ainda a reconhecida capacidade inovativa da Embraer.

Tabela 4. FBCF setorial em anos selecionados (% PIB)

SETOR	2000	2005	2010	2015	2020	MÉDIA 2000-2020
Agropecuária	0,8	0,9	1,0	1,0	1,2	1,1
Indústria extrativa	0,3	0,4	0,6	0,7	1,1	0,7
Indústria de transformação	4,9	4,0	3,5	3,5	3,5	3,8
Siup*	0,9	1,1	1,4	0,8	1,0	1,1
Construção	0,4	0,4	0,8	0,5	0,4	0,5
Comércio	1,2	0,6	0,9	1,0	0,7	0,9
Transporte, armaz. e correio	1,3	2,0	2,5	1,3	1,3	1,7
Informação e comunicação	1,4	1,2	1,1	0,9	1,0	1,1
Atividades financeiras	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
Atividades imobiliárias	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
Outros serviços	0,7	0,7	1,0	0,8	0,8	0,8
Administração pública	2,2	2,1	3,2	2,3	1,8	2,4
Construção residencial	3,6	3,3	4,1	4,4	3,3	3,7
Total	**18,3**	**17,1**	**20,5**	**17,8**	**16,6**	**18,0**

Fonte: Miguez e Freitas (2021).

Nota: * Siup – serviços industriais de utilidade pública (energia, água, esgoto, coleta).

Percebe-se que apenas dois setores aumentaram a participação de seus investimentos no PIB: a agropecuária e a indústria extrativa. Enquanto os investimentos da agropecuária saíram de 0,8% do PIB em 2000 para 1,2% em 2020, a indústria extrativa saltou de 0,3% para 1,1%. São os mesmos setores que apresentaram melhora da produtividade e que contribuíram sobremaneira para o superávit comercial do país. No caso da indústria extrativa, não deve ser esquecida a contribuição majoritária da Petrobras,[19] que, embora tenha reduzido seus investimentos a partir de meados dos anos 2010, seguiu com planos de investimentos elevados.

A indústria de transformação apresentou o valor mais representativo, visto que uma de suas características estruturais é ser um setor capital intensivo. No entanto, a perda de participação no período foi significativa, inclusive durante os anos de maior dinamismo da economia (entre 2004 e 2010), visto

19 O estudo especial do BNDES *Os investimentos da Petrobras* apresenta um resumo sobre o assunto (Os investimentos..., 2023).

que ela começou com uma participação de 4,9% em 2000, que caiu para 4,0% e chegou a 2010 com 3,5%. O menor valor da série foi de 2,7% em 2017, logo após os anos recessivos de 2015 e 2016, quando ela começou a se recuperar até retomar em 2020 o mesmo patamar de 3,5% de 2010. O comportamento é similar quando visto por uma perspectiva mais desagregada, pois 27 dos 29 segmentos da indústria de transformação observados por Miguez e Freitas (2021) chegaram a 2020 com uma participação de seus investimentos no PIB menor do que era em 2000.

Nos setores ligados à infraestrutura, percebe-se que Siup e transporte, armazenagem e correio apresentaram um comportamento mais cíclico, ou seja, aumentaram sua participação até 2010 e tiveram um nível mais próximo da estabilidade em 2020, enquanto o setor informação e comunicação apresentou uma leve tendência de queda, oscilando próximo a 1% do PIB. O investimento da administração pública reflete bem os momentos fiscais dos últimos anos. Como mencionado na seção "Painel macroeconômico", houve um forte crescimento entre 2005 e 2010 na esteira dos programas públicos, em especial do PAC e do Minha Casa, Minha Vida.

Os dados apresentados nesta seção mostram que a economia brasileira chegou a 2020 com uma estrutura produtiva fragilizada e uma configuração propensa a aprofundar desigualdades, inibir a inovação, se especializar em produtos de baixo valor agregado, gerar poucas oportunidades para trabalhadores qualificados e investir pouco. O fraco desempenho macroeconômico, impactando em especial o investimento, origina um grande desafio para que o país alcance o desenvolvimento necessário à melhoria da qualidade de vida da sua população. Do ponto de vista setorial, as adversidades não são menores. A indústria de transformação perdeu espaço e competitividade e houve uma inclinação a favor dos setores ligados a *commodities* e a serviços de baixa produtividade. O contexto internacional aponta para um acirramento do cenário competitivo, por exemplo, com os países centrais retomando ativamente suas políticas industriais e revendo a estratégia de *offshoring* da produção largamente implementada nas últimas décadas.

Ao mesmo tempo, existem agendas que representam oportunidades para o Brasil, como o enfrentamento da crise climática e a definição de missões orientadas para os desafios sociais. Mas para aproveitar essas agendas são necessárias políticas públicas ativas e com recursos suficientes que retomem os

investimentos públicos e impulsionem o setor privado nas direções desejadas. A próxima seção trata das três principais políticas apresentadas até agora pelo Governo Federal e aborda o papel previsto para o BNDES.

A RETOMADA DAS POLÍTICAS PÚBLICAS

O Governo Federal tem discutido três grandes políticas públicas na tentativa de reordenar a economia do país, a saber: i) o Programa de Aceleração do Crescimento (Novo PAC), focado na modernização da infraestrutura; ii) a Nova Indústria Brasil (NIB), política industrial e de inovação baseada em missões para estimular o desenvolvimento produtivo e tecnológico ao mesmo tempo que atende às demandas sociais; e iii) o Plano de Transformação Ecológica (PTE), para promover o desenvolvimento sustentável e iniciativas de descarbonização da economia.

O Novo PAC é coordenado pela Casa Civil (CC). Lançado em agosto de 2023, representa um conjunto articulado não apenas de investimentos, mas também de medidas governamentais, conferindo racionalidade e prioridade às diversas ações de política pública. No total, foi anunciado R$ 1,7 trilhão em investimentos, distribuído por nove eixos: i) água para todos; ii) cidades sustentáveis e resilientes; iii) educação, ciência e tecnologia; iv) inclusão digital e conectividade; v) indústria da defesa; vi) infraestrutura social e inclusiva; vii) saúde; iii) transição e segurança energética; e ix) transporte eficiente e sustentável.

Cabe destacar que o valor de R$ 1,7 trilhão pode ser decomposto da seguinte maneira: i) R$ 371 bilhões do Orçamento Geral da União; ii) R$ 612 bilhões do setor privado; e iii) R$ 343 bilhões das empresas estatais, notadamente a Petrobras. Está previsto que os bancos públicos financiem um montante de R$ 440 bilhões, ou seja, aproximadamente 23,5% dos investimentos.

No lançamento do Novo PAC, foi anunciado um conjunto de 43 medidas institucionais, que envolvem 168 ações.[20] Essas medidas são entendidas como

20 Essa contabilidade de ações envolve dupla contagem de algumas que se repetem, como nas categorias "expansão do crédito e incentivos econômicos" e "incentivos à transição ecológica". No caso das ações do BNDES, três delas se repetem: i) Novo Fundo Clima; ii) abertura de linha de crédito do Fundo Clima para financiamento de programas municipais de eletrificação de frotas de ônibus; e iii) ampliação da carteira do Programa de Garantia a Créditos para Eficiência Energética (FGEnergia).

um conjunto articulado de atos normativos, de gestão e de planejamento que contribuem para a expansão sustentada de investimentos públicos e privados no Brasil. Elas foram agrupadas em cinco categorias e o BNDES tem um total de 12 medidas distribuídas por três categorias, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Medidas institucionais do Novo PAC por categoria

CATEGORIAS	TOTAL DE MEDIDAS	TOTAL DE AÇÕES	AÇÕES BNDES
a) Aperfeiçoamento do ambiente regulatório e do licenciamento ambiental	13	54	–
b) Expansão do crédito e incentivos econômicos	11	38	11
c) Aprimoramento dos mecanismos de concessão e parcerias público-privadas (PPP)	4	16	1
d) Incentivos à transição ecológica	7	32	3*
e) Planejamento, gestão e compras públicas	8	28	–
Total geral	**43**	**168**	**12***

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da Casa Civil. Disponível em: https://www.gov.br/casacivil/novopac/medidas-institucionais. Acesso em: 1º dez. 2023.
Nota: * As três ações de "incentivos à transição ecológica" se repetem em "expansão do crédito e incentivos econômicos", que foram excluídas do total geral para evitar dupla contagem.

Além das ações de fortalecimento institucional sob sua responsabilidade, o BNDES tem contribuído nas discussões da Comissão Interministerial de Inovações e Aquisições do Programa de Aceleração do Crescimento (CIIA-PAC), que tem o objetivo de utilizar os investimentos do Novo PAC como forma de fomentar o adensamento e as inovações tecnológicas nas cadeias produtivas envolvidas. Há a expectativa de que o BNDES financie R$ 270 bilhões em projetos, o que responde por mais de 60% dos R$ 440 bilhões esperados dos bancos públicos e 15,9% do montante total de investimentos de R$ 1,7 trilhão.

Por sua vez, a NIB, política industrial anunciada em janeiro de 2024, está sendo coordenada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial (CNDI), vinculado ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (Mdic). O CNDI instituiu seis missões orientadoras

para a chamada "neoindustrialização", que visam modernizar, digitalizar e descarbonizar a indústria, bem como promover inclusão social, redução da desigualdade e trabalho decente. São elas: 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 e transição e segurança energéticas para garantir recursos para as futuras gerações; e vi) tecnologias de interesse para a soberania e a defesa nacionais.

Ainda sobre o papel do BNDES, o Banco é um dos membros do CNDI e, portanto, vem contribuindo ativamente para o desenvolvimento da NIB. Além disso, ele será um importante ator no financiamento dos investimentos necessários para que o Brasil revitalize e modernize seu parque industrial dentro do Plano Mais Produção, que prevê mais de R$ 300 bilhões em recursos, dos quais o BNDES responde por R$ 250 bilhões. Os recursos do Plano Mais Produção estão divididos em operações de crédito, participação indireta via fundos no capital de empresas (operações de renda variável) e recursos não reembolsáveis, conforme indicado na Tabela 6.

Tabela 6. Plano Mais Produção por tipo de apoio financeiro (R$ bilhões)

FORMA DE APOIO	VALOR (R$ BILHÕES)	% TOTAL
Operações de crédito	271,0	90,3
Recursos não reembolsáveis	21,0	7,0
Renda variável	8,0	2,7
Total	**300,0**	**100,0**

Fonte: Elaboração própria, com base em Brasil (2024).

Além da questão de disponibilidade de recursos, uma das principais medidas que fortalece o Plano Mais Produção surgiu com a aprovação da Lei 14.592, de 30 de maio de 2023, que permitiu ao BNDES utilizar a taxa

referencial (TR)[21] como custo financeiro base de seus financiamentos à inovação e à digitalização, temáticas reconhecidamente essenciais para o desenvolvimento econômico e nas quais o Brasil precisa avançar, conforme apresentado na seção anterior. Esses recursos serão utilizados por meio do programa BNDES Mais Inovação, lançado em setembro de 2023, cujos efeitos foram sentidos no mesmo ano. Em 2023, o BNDES aprovou um total de R$ 5,3 bilhões para inovação (aumento de 132% em relação ao total aprovado em 2022), dos quais R$ 3,5 bilhões foram relativos ao BNDES Mais Inovação.

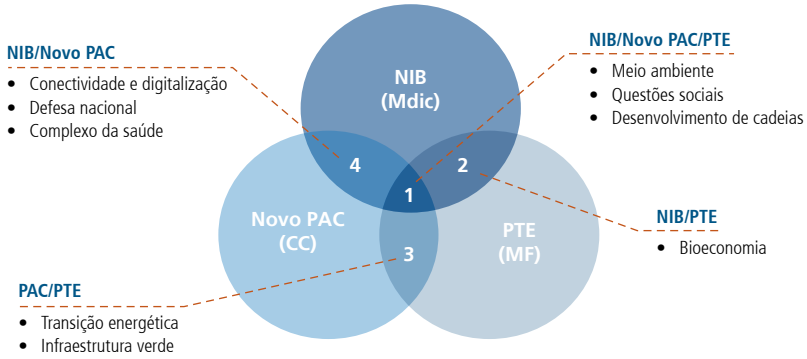
Já a terceira política pública mencionada, o PTE, coordenado pelo Ministério da Fazenda (MF), foi lançado durante a COP28, em dezembro de 2023, e, segundo o MF, envolve um amplo mapeamento de oportunidades, com mais de cem ações para serem executadas em um período de quatro anos. O PTE está organizado em seis eixos: i) finanças sustentáveis; ii) adensamento tecnológico; iii) bioeconomia; iv) transição energética; v) economia circular; e vi) infraestrutura verde.

O BNDES também está participando das discussões de concepção do PTE e, apesar de ainda estar em uma fase mais incipiente que as outras políticas, já é possível afirmar que um dos maiores expoentes desse plano será o Fundo Clima, gerido pelo Banco. Apenas para 2024 já foram alocados pouco mais de R$ 10 bilhões em novos recursos, o que quintuplica os R$ 2 bilhões que o fundo acumulou de 2009 até então.

Por fim, cabe frisar que as três políticas citadas anteriormente estão sendo discutidas de forma integrada e, naturalmente, têm elementos em comum. A Figura 2 mostra as principais ligações existentes entre elas, tanto as interseções entre pares como aquelas comuns às três políticas, a saber: temas ligados ao meio ambiente, às questões sociais e ao desenvolvimento de cadeias produtivas.

21 A taxa referencial tem sua metodologia de cálculo definida pela Resolução do Conselho Monetário Nacional (CMN) 4.624, de 18 de janeiro de 2018. Ela é função da taxa básica financeira (TBF), que, por sua vez, depende da Selic e da taxa de juros prefixada das Letras do Tesouro Nacional (LTN) de curto prazo. Uma característica importante é que na sua fórmula existe um redutor que cresce à medida que a TBF sobe, ou seja, a TR é uma taxa de juros que fica sistematicamente abaixo das demais taxas de juros de mercado.

Figura 2. Interlocuções entre as políticas públicas do Governo Federal



Fonte: Elaboração própria.

CONCLUSÃO

Durante as últimas duas décadas, a economia brasileira passou por diferentes momentos. No período entre 2004 e 2010, houve uma retomada do crescimento como há tempos não ocorria, a despeito da crise internacional de 2008 e 2009. Mesmo após 2010, ainda foi possível observar alguns anos de crescimento razoável da economia até 2014. No entanto, a partir de 2015, houve três anos de recessão (2015, 2016 e a pandemia de 2020) intercalados com períodos de crescimento mais baixo.

Do ponto de vista setorial, a situação também não evoluiu de modo positivo. O processo de desindustrialização iniciado ainda nos anos 1980 não foi revertido – ele parece, inclusive, ter sido aprofundado. O encolhimento do tecido industrial brasileiro representa um desafio à medida que a indústria deixa de exercer um poder indutor capaz de incentivar outros setores, especialmente os serviços, a se engajar em atividades de maior valor agregado. Além disso, a perda de produtividade e competitividade da indústria levou os superávits comerciais do país a uma dependência cada vez maior do desempenho de produtos de menor intensidade tecnológica, especialmente *commodities*, ocasionando uma fragilidade estrutural na balança comercial brasileira.

Adiciona-se que o elevado diferencial de produtividade observado entre os setores favorece a ocorrência dos altos níveis de desigualdade que caracterizam

a sociedade brasileira, ou seja, uma pequena parcela da população trabalha em setores de alta produtividade capazes de pagar maiores salários, enquanto a maior parte acaba encontrando apenas empregos ligados a atividades pouco produtivas, que não têm a mesma capacidade de geração de renda.

No cenário internacional, há uma retomada ativa das políticas industriais tanto por parte dos países centrais, como EUA, União Europeia e Japão, como dos países periféricos mais dinâmicos, como a China, os quais vêm aportando valores bilionários em iniciativas de expansão da fronteira tecnológica e de retomada da produção local.

Apesar de partir de uma situação econômica e produtiva mais delicada, existem agendas em que o Brasil tem capacidade de atuar de forma promissora. Ciente disso, o Governo Federal anunciou três grandes políticas produtivas, o Novo PAC, a NIB e o PTE, cada uma com suas particularidades, mas também com elementos complementares. O BNDES vem contribuindo ativamente para o planejamento, a execução e o financiamento dessas três políticas.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Secretaria de Comunicação Social. Plano Mais Produção tem R$ 250 bilhões do BNDES até 2026 para nova política industrial. *Agência Gov*, [Brasília, DF], 25 jan. 2024. Disponível em: https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202401/plano-mais-producao-tem-r-250-bilhoes-do-bndes-ate-2026-para-nova-politica-industrial. Acesso em: 26 jan. 2024.

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

CHERIF, R.; HASANOV, F. *The return of the policy that shall not be named*: principles of industrial policy. Washington, DC: International Monetary Fund, 2019. (Working Paper, n. 19/74).

DE NEGRI, F.; CAVALCANTE, L. R. (org.). *Produtividade no Brasil:* desempenho e determinantes – volume 1: desempenho. Brasília, DF: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2014.

DE NEGRI, F.; CAVALCANTE, L. R. (org.). *Produtividade no Brasil:* desempenho e determinantes – volume 2: determinantes. Brasília, DF: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2015.

EVENETT, S. *et al. The return of industrial policy in data*. Washington, DC: International Monetary Fund, 2024. (Working Paper, n. 24/1).

FEVEREIRO, J. B. *Decomposição da taxa de crescimento do PIB pelo lado da demanda:* uma metodologia alternativa. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2016. (Carta de Conjuntura, n. 30).

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. *Investimento e estoque de capital da indústria de transformação – 1996 a 2021*. São Paulo: Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, 2023. Disponível em: https://www.fiesp.com.br/file-20231002174745-estoque-de-capitalusoexrefino. Acesso em: 8 de out. 2024

OS INVESTIMENTOS da Petrobras. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2023. 5 p. (Estudos especiais do BNDES; 9). Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/23605/1/PRFol_215985_Os%20investimentos%20da%20Petrobras.pdf. Acesso em: 27 out. 2023

JUHÁSZ, R.; LANE, N. J.; RODRIK, D. *The new economics of industrial policy*. Cambridge: National Bureau of Economic Research, 2023. (Working Paper, n. 31538).

KALDOR, N. *Causes of the slow rate of economic growth of the United Kingdom*: an inaugural lecture. London: Cambridge University Press, 1966.

LAMONICA, M. T.; FEIJÓ, C. A. Crescimento e industrialização no Brasil: uma interpretação à luz das propostas de Kaldor. *Revista de Economia Política*, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 118-138, 2011.

LARA, F. M. *et al*. *A inserção do Brasil no século XXI e seu desempenho macroeconômico*. Rio de Janeiro: Centro Internacional Celso Furtado de Políticas para o Desenvolvimento, 2023.

MIGUEZ, T.; FREITAS, F. *Matrizes de absorção de investimento (MAIs):* metodologia de estimação para o Sistema de Contas Nacionais: referência 2010. Rio de Janeiro: Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021. (Textos para Discussão, n. 024).

OLINTO, R. *et al*. O mistério das plataformas fantasmas. *Blog do Ibre*, Rio de Janeiro, 21 jun. 2021. Disponível em: https://blogdoibre.fgv.br/posts/o-misterio-das-plataformas-fantasmas. Acesso em: 13 mar. 2024.

PASSONI, P. A. *Desindustrialização e especialização regressiva na economia brasileira entre 2000 e 2014*: uma avaliação crítica a partir da análise insumo-produto. Rio de Janeiro: BNDES, 2023. (38º Prêmio BNDES de Economia).

PISANO, G. P.; SHIH, W. C. Restoring American competitiveness. *Harvard Business Review*, Brighton, v. 87, n. 7-8, p. 1-25, 2009.

SERRANO, F.; SUMMA, R. Macroeconomic policy, growth and income distribution in the Brazilian economy in the 2000s. *Investigación Económica*, Ciudad de México, v. 71, n. 282, p. 55-92, 2012.

THIRLWALL, A. P. A plain man's guide to Kaldor's growth laws. *Journal of Post Keynesian Economics*, [*s. l.*], v. 5, n. 3, p. 345-358, 1983.

2

A descarbonização do setor automotivo como uma oportunidade para a engenharia automotiva brasileira

Bruno Plattek
Paulo Renato Villarim
Carlos Eduardo Cavalcanti*

* Engenheiros do Departamento de Bens de Capital e Consumo, Comércio e Serviços da Área de Desenvolvimento Produtivo e Inovação do BNDES.

INTRODUÇÃO

A mudança climática demanda políticas públicas que viabilizem a transição para uma economia de baixo carbono em diversos setores. Optar pelo uso de energias de menor nível de emissão é essencial para atingir os objetivos de zerar as emissões líquidas de carbono em 2050 e cumprir as metas do Acordo de Paris (2015).

Diferentes países têm articulado suas políticas energéticas, industriais e tecnológicas a fim de acelerar o processo de transição para uma economia de baixo carbono. Ademais, pretendem garantir a segurança energética; impulsionar a geração de emprego e renda; e promover o desenvolvimento industrial e a autonomia tecnológica nacional. Assim, o volume de investimentos em tecnologias que contribuam para a redução de emissões deve se expandir de forma significativa nas próximas décadas.

O setor de transportes é um importante emissor de gases de efeito estufa (GEE), com uma participação de aproximadamente 27% das emissões globais (IPCC, 2022). No Brasil, o uso da terra e a agropecuária são os dois principais responsáveis pelas emissões de GEE (44% e 28%, respectivamente), enquanto o setor de transportes é o principal emissor no segmento de energia (Seeg, 2020), tendo sido responsável por 9% do total das emissões brasileiras em 2019 (com a maior parcela proveniente do transporte rodoviário).

A descarbonização da mobilidade deve, assim, ser um dos focos das políticas públicas voltadas para a redução das emissões no mundo e no Brasil. No setor automotivo, essa perspectiva vem impulsionando relevantes investimentos em novas rotas tecnológicas, que reduzem o uso de combustíveis fósseis, com destaque para a eletrificação veicular. No entanto, rotas alternativas como a dos biocombustíveis e a do hidrogênio também representam uma oportunidade de acelerar a transição para a mobilidade de baixo carbono, a depender da região e da realidade local de alguns países.

Importante ressaltar que o Brasil é, ainda hoje, um eminente polo mundial da engenharia automotiva. Nosso parque industrial tem competências destacadas em engenharia veicular. Além disso, o ecossistema brasileiro de inovação apresenta uma relevante capacidade de pesquisa, desenvolvimento, testes e

certificação no setor automotivo, contando com grande experiência no uso de biocombustíveis. A cadeia de fornecedores, embora bastante heterogênea no perfil e no porte das empresas, também tem capacidades locais significativas.

A existência de um setor robusto de biocombustíveis e de uma infraestrutura de abastecimento já instalada no território nacional dão alternativas para a alavancagem do processo de transição energética no país, representando uma oportunidade para o desenvolvimento da indústria local.

Adicionalmente, serão necessários investimentos relevantes para mitigar as emissões associadas não apenas ao uso dos veículos, mas também ao processo produtivo ao longo da cadeia de fornecedores de componentes e insumos e da cadeia produtiva dos energéticos (combustíveis e, no caso dos veículos elétricos, geração de energia).

Diante disso, a questão que se coloca para análise é a viabilidade da estruturação de uma estratégia nacional de descarbonização do setor automotivo que utilize as capacidades locais da engenharia automotiva e dos biocombustíveis. Tal recurso deve impulsionar a agenda de inovação e industrialização no país, sendo capaz de combiná-la com as mudanças significativas que vêm ocorrendo no setor automotivo mundial no contexto das novas rotas tecnológicas da eletrificação veicular. Explora-se a ideia da bioeletrificação como uma possível rota para o desenvolvimento da indústria brasileira e para a transição para um novo paradigma da descarbonização da mobilidade na indústria automotiva.

Este artigo apresenta cinco seções além desta introdução. A segunda seção mostra um panorama do setor automotivo no Brasil e sua importância para a economia brasileira. Na terceira seção, aborda-se a eletrificação veicular e se discute o ritmo de sua difusão no mundo. A quarta seção expõe como a indústria automotiva brasileira está posicionada em relação ao desenvolvimento e à disponibilidade no país das diferentes plataformas veiculares (elétrica, biocombustíveis, híbridas etc.). A quinta seção discute como poderia se dar o processo de estruturação das políticas industriais e tecnológicas voltadas para o desenvolvimento das novas tecnologias de descarbonização da mobilidade. Por fim, são apresentadas as conclusões.

PANORAMA ATUAL DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA BRASILEIRA

Desde o início de seu desenvolvimento no Brasil, a indústria automotiva assumiu um papel relevante para a economia do país. Segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores – Anfavea (Anuário..., 2023), o setor representa cerca de 2,5% do produto interno bruto (PIB) brasileiro e responde por mais de 20% do PIB da indústria de transformação. Há no país 26 empresas fabricantes de veículos e 498 fabricantes de autopeças. O setor emprega aproximadamente quinhentas mil pessoas – direta e indiretamente, são cerca de 1,2 milhão de profissionais – e tem uma capacidade instalada de 4,5 milhões de veículos.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores – Sindipeças (2023), a frota brasileira de veículos fechou o ano de 2022 atingindo o patamar de 46,9 milhões de unidades. Desse total, 44,3 milhões são automóveis e comerciais leves, 2,1 milhões são caminhões e 387 mil veículos compõem a frota de ônibus.

Atualmente, uma dúzia de montadoras multinacionais de grande porte produz veículos no país.[1] Dos cinco maiores fabricantes mundiais (Toyota, Volkswagen, Ford, Hyundai e Honda), apenas a Ford não mantém fabricação no Brasil, embora tenha um importante centro de engenharia localizado na Bahia. Ademais, alguns fabricantes locais atuam sob o regime de licenciamento (como a HPE, que produz veículos das marcas Mitsubishi e Suzuki) ou de *joint-ventures* (como a Caoa Chery).

No que se refere à competência técnica, as montadoras multinacionais presentes no país apresentam níveis variáveis de capacidade de engenharia, podendo atrair junto às suas matrizes desde projetos de desenvolvimento de novos veículos até reestilizações/adaptações dos produtos existentes. É importante notar, entretanto, que, na ausência de estímulos específicos, as

1 Os fabricantes atualmente instalados no Brasil são: Stellantis, Hyundai, Honda, Volkswagen, Toyota, GM, Renault, Nissan, Caoa Chery, HPE, BMW e Land Rover.

etapas mais nobres de concepção, projeto e desenho são feitas nas matrizes dessas empresas.

O primeiro elo de fornecimento para as montadoras de veículos é composto por sistemistas. Costuma-se denominar esse elo da cadeia produtiva como *tier* 1. São fornecedores de subconjuntos, módulos e sistemas. Os principais sistemistas no Brasil são grandes grupos industriais de origem europeia, asiática e estadunidense. Entre eles, estão: Bosch, ZF, Magna, Continental, Denso, Aisin Seiki, Hyundai Mobis e Faurecia. Cabe mencionar, também, empresas de origem brasileira com alcance global, tais quais a Iochpe-Maxion e a Tupy-MWM. Os fornecedores *tier* 1 costumam ter uma relação de parceria com as matrizes das grandes montadoras e fazem a localização de subsidiárias do tipo *follow-sourcing*, ou seja, trabalhando com a mesma montadora em unidades produtivas ao redor do mundo.

São principalmente esses dois conjuntos de empresas, montadoras e sistemistas que detêm o poder de comando sobre a cadeia produtiva. Em ambos os casos, trata-se de grandes empresas com capacidade de investimento e exportação, boa gestão financeira, elevado faturamento, além de práticas modernas de produção.

Os elos inferiores da cadeia de autopeças – os *tiers* 2 e 3 – são compostos de fabricantes de conjuntos, partes, peças e componentes. Essas empresas atuam em diferentes segmentos, como os de componentes metálicos (forjados, fundidos, estampados e usinados), não metálicos (como os de plástico e borracha) e, ainda, os elétricos e eletrônicos. Esses elos da cadeia são bastante heterogêneos quanto ao porte das empresas. Diferentemente dos elos superiores, há neles uma importante presença de firmas de menor porte em termos de faturamento e de número de empregados. Essas, em geral, são primordialmente de capital nacional, com acesso mais restrito a crédito e a fontes de financiamento ao investimento.

As informações atualizadas de produção, licenciamento e exportação de veículos estão reunidas na Tabela 1.

Tabela 1. Brasil: produção, licenciamento e exportação de veículos – 2023 (milhares de unidades)

	PRODUÇÃO	LICENCIAMENTO	EXPORTAÇÃO
Automóveis	1.781,6	1.721,4	308,2
Comerciais leves	422,1	458,8	73,8
Caminhões	100,5	108,0	16,9
Ônibus	20,6	20,4	5,0
Total	**2.325**	**2.309**	**404**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Carta... (2024).

O AVANÇO DA ELETRIFICAÇÃO VEICULAR

Os veículos elétricos (VE), impulsionados por avanços tecnológicos em baterias e eficiência energética, emergem como a principal tendência de desenvolvimento do setor automotivo global.[2]

Todavia, há incertezas relevantes quanto ao ritmo de adoção da eletrificação veicular por meio dos veículos elétricos puros, decorrentes, principalmente, do elevado investimento necessário para instalação da infraestrutura de recarga, do ritmo de queda dos custos das baterias e dos desafios tecnológicos para o aumento da autonomia dessas baterias. Tais incertezas têm levado à adoção gradual da eletrificação, coexistindo diferentes tipos de VEs, resumidos no Quadro 1.

2 Governos ao redor do mundo estão estimulando a transição para a mobilidade elétrica por meio de fortes incentivos fiscais à produção, subsídios à aquisição e regulações ambientais para redução de emissões, como o *Inflation Reduction Act* (IRA), nos Estados Unidos da América, e o *Green Deal Industrial Policy*, na União Europeia. Já a China tem um plano de longo prazo dedicado à indústria automotiva, o *New Energy Vehicle Industry Development Plan* (2021-2035). Como consequência, segundo a Agência Internacional de Energia (em inglês: International Energy Agency – IEA), em 2022, mais de 90% das vendas de veículos elétricos no mundo contaram com algum tipo de incentivo (IEA, 2023).

Quadro 1. **Plataformas para eletrificação veicular**

PLATAFORMA VEICULAR	DESCRIÇÃO
Veículos elétricos a bateria (VEB)	A tração motriz é completamente provida por um ou mais motores elétricos, que, por sua vez, obtêm a energia de baterias recarregáveis. A carga das baterias provém de uma fonte externa (*plug-in*). As baterias recarregáveis (cuja tecnologia dominante é hoje a de íons de lítio) são um componente crítico no conjunto, respondendo por uma parcela relevante (até 50%) do custo do veículo.
Veículos híbridos (VH) e veículos híbridos *plug-in* (VHP)	Combinam um motor a combustão interna com um motor elétrico para o fornecimento de tração motriz, seja em conjunto, seja separadamente. O motor elétrico é alimentado por uma bateria que pode ser carregada por meio de fonte externa ou da regeneração da energia dissipada em desacelerações e frenagens. No caso de a bateria ser carregada com ajuda de fonte externa, o veículo é denominado "híbrido *plug-in*" (VHP).
Veículos a célula de combustível (VCC)	As células de combustível são dispositivos eletroquímicos que produzem uma reação de eletrólise reversa da água. Nessa reação, o hidrogênio armazenado no veículo combina-se com o oxigênio atmosférico, gerando uma corrente que alimenta um motor elétrico de tração. Utiliza-se também uma bateria recarregável, de menor porte, para estabilizar a corrente gerada pela célula.

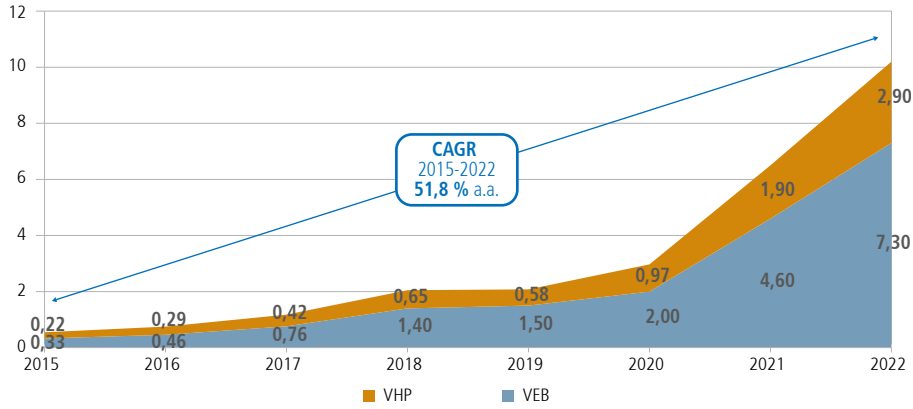
Fonte: Elaboração própria.

Os sucessivos avanços tecnológicos na mobilidade elétrica, principalmente ligados ao desenvolvimento de baterias, levaram ao lançamento de novos modelos de carros elétricos e híbridos ao longo da primeira década do século XXI. A expansão da eletrificação veicular tem ocorrido, sobretudo, por meio dos veículos de passeio leves *plug-in*, ou seja, quando o carregamento da bateria se dá por uma fonte externa (podendo ser do tipo VEB ou VHP).

Na última década, as vendas foram bastante alavancadas pelo estabelecimento de políticas governamentais de estímulo à aquisição e produção desses veículos, por meio de subsídios e incentivos fiscais, uma vez que eles apresentam custos superiores a seus equivalentes movidos a combustão.[3] O Gráfico 1 mostra que as vendas de veículos *plug-in* cresceram a uma taxa média de 51,8 % ao ano (a.a.) no período de 2015 a 2022, passando de cerca de 550 mil para 10,2 milhões anuais.

3 Os veículos elétricos são, atualmente, cerca de 50% a 80% mais caros que os veículos a combustão da mesma categoria.

Gráfico 1. Evolução das vendas globais de veículos leves eletrificados *plug-in* (milhões de unidades)



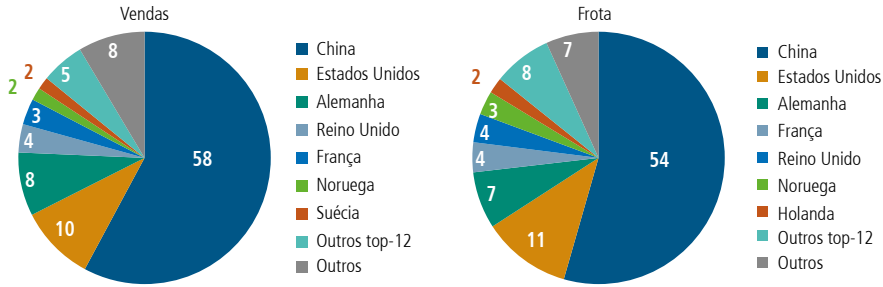
Fonte: Elaboração própria, com base em dados da IEA (2023).
Nota: CAGR = *compound annual growth rate* (taxa de crescimento anual composta).

Os Estados Unidos da América (EUA), os países da União Europeia, a China, a Coreia do Sul e o Japão são os maiores investidores na eletrificação e visam manter a competitividade de suas montadoras. Foi principalmente nesse conjunto de países que se verificou um crescimento acelerado da produção e da venda de veículos eletrificados *plug-in*, assim como a consequente expansão da parcela dessa categoria na frota de veículos em uso.

Apenas entre os anos de 2020 e 2022, a participação dos veículos elétricos *plug-in* nas vendas totais de carros passou de 5% para 14%, em termos globais. O crescimento de vendas levou a frota global de veículos leves *plug-in* a 26 milhões de unidades em 2022, dos quais cerca de 18 milhões são veículos elétricos a bateria (VEB).

Tal volume de veículos *plug-in* representa 2,1 % da frota mundial de veículos leves. Adiciona-se que apenas 12 países representaram 92% das vendas e 93% da frota global em 2022, a saber, China, EUA, Alemanha, Reino Unido, França, Noruega, Suécia, Holanda, Coreia do Sul, Canadá, Itália e Japão. E, como é possível ver no Gráfico 2, China, EUA e Alemanha representam mais de dois terços desse total.

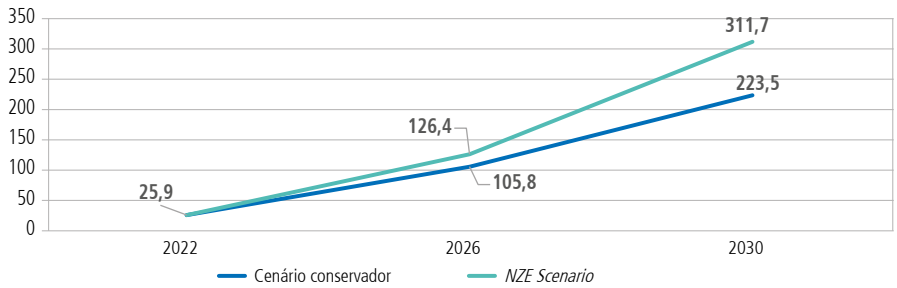
Gráfico 2. Participação nas vendas e na frota de veículos leves *plug-in* em 2022 (%)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados da IEA (2023).

A expectativa é que esse mercado continue a se expandir fortemente na próxima década. O Gráfico 3 apresenta as projeções da IEA (2023) para o ano de 2030, que apontam para uma frota total entre 223 milhões no cenário mais conservador, que considera as políticas e os objetivos oficialmente estabelecidos por governos, e 312 milhões no cenário mais otimista, que considera os objetivos de emissões líquidas zero (*Net Zero Emissions by 2050 Scenario – NZE Scenario*). Assim, as projeções indicam um crescimento de oito a doze vezes em relação ao tamanho da frota atual em menos de uma década.

Gráfico 3. Projeção da evolução da frota global de veículos leves eletrificados *plug-in* (milhões de unidades)

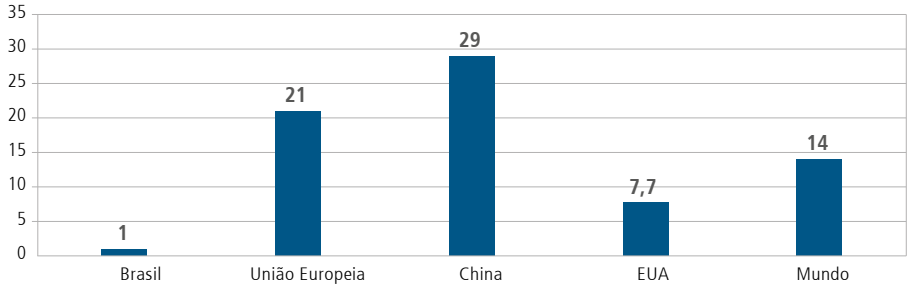


Fonte: Elaboração própria, com base em dados de IEA (2023).

O avanço das vendas dos veículos leves *plug-in* é heterogêneo a depender da região e do país, como pode ser observado no Gráfico 4. Em mercados emergentes, o avanço da eletrificação da frota ocorre de forma mais gradual. No mercado brasileiro, as vendas de veículos leves eletrificados *plug-in* em 2022 se aproximaram do patamar de vinte mil unidades, o que corresponde a 1,1%

das vendas totais de veículos leves no país. Mesmo somando a esse número as pouco mais de trinta mil unidades de híbridos não *plug-in*, a participação dos eletrificados representaria 3,1% das vendas.

Gráfico 4. Participação dos veículos eletrificados *plug-in* nas vendas totais de veículos leves em 2022 (% total)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados de IEA (2023) e ABVE (2023).

Além dos veículos de passeio, o segmento de veículos comerciais leves elétricos *plug-in* também vem apresentando um crescimento nas vendas globais. Em 2022, cerca de 310 mil unidades foram comercializadas, quase um terço da frota, que atingiu 930 mil unidades, metade das quais se encontra na China (IEA, 2023).

Em relação aos veículos pesados *plug-in*, por sua vez, observa-se que o pico das vendas globais foi em 2017 para os caminhões (81 mil unidades) e em 2015 para os ônibus (123 mil unidades) (IEA, 2023). Após esse pico, seguiram-se anos de vendas decrescentes, seguidos pela pandemia de Covid-19 em 2020 e 2021, com uma recuperação das vendas em 2022 para ambas as categorias (respectivamente 60 mil e 65 mil unidades, ante 41 mil e 57 mil em 2021). As vendas na China representaram 85% do volume global para os caminhões e 80% para os ônibus.

É importante mencionar que a expansão dos veículos elétricos requer enormes investimentos em infraestrutura de recarga. Apenas para ter a dimensão do volume de recursos necessários, estima-se que seja preciso investir cerca de US$ 1,7 trilhão na Índia, China e Europa (J.P. Morgan, 2018) e entre US$ 210 bilhões e US$ 300 bilhões no Brasil (EPE, 2018). Em conjunto com esses investimentos, os ganhos de escala na produção e o desenvolvimento das baterias devem viabilizar uma queda dos custos desses veículos.

Deve-se destacar a relação direta que se observa entre o avanço em termos globais dos veículos *plug-in* e as políticas governamentais de subsídios a aquisições de veículos e de incentivos fiscais voltados aos massivos investimentos em infraestrutura de recarga.

A aplicação de tais ferramentas teria um espaço restrito no contexto brasileiro dada a escala de recursos e incentivos que seriam demandados para os investimentos em infraestrutura e para a redução dos elevados custos desses veículos para o mercado consumidor local.

A formulação de uma estratégia para a descarbonização nacional da mobilidade deve considerar essas restrições ao processo de transição para o paradigma da eletrificação. Um caminho para equacionar essas relevantes restrições passa pela utilização das capacidades já estabelecidas no país para o desenvolvimento das soluções mais adaptadas, de menor custo e maior retorno ambiental, econômico e social para a sociedade brasileira.

AS PLATAFORMAS DE DESCARBONIZAÇÃO NO BRASIL

Esta seção apresentará como a indústria automotiva brasileira está posicionada em relação ao desenvolvimento e à disponibilidade no país das diferentes plataformas veiculares. A indústria automotiva no Brasil, como no mundo, é caracterizada por uma cadeia produtiva madura voltada para a produção e comercialização dos veículos movidos a motores de combustão interna.

A base industrial automotiva brasileira conta com um diferencial relevante no panorama mundial no que se refere aos processos de descarbonização. Foi no Brasil que se estabeleceu o maior *case* mundial de uso em larga escala de biocombustíveis para movimentar a frota de veículos. O uso do etanol para essa finalidade é uma realidade há quase cinquenta anos, desde a implantação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975, passando pelo desenvolvimento, no início dos anos 2000, dos motores *flex-fuel*, que usam indistintamente etanol ou gasolina. Essas foram duas grandes realizações

da engenharia automotiva brasileira, que se aproveitaram das capacidades constituídas no setor automotivo nas décadas anteriores.

Fomentado com o objetivo de ser uma alternativa à forte restrição à importação de combustíveis por conta das crises do petróleo da década de 1970, o uso em larga escala desse biocombustível colocou o Brasil historicamente em posição de destaque entre os diferentes países quanto à descarbonização da mobilidade, mesmo antes de o tema ser uma preocupação global e uma realidade no setor automotivo.

Um simples exercício ilustrativo pode ser feito para dimensionar o impacto do uso desse biocombustível na frota veicular brasileira. A gasolina comercializada no Brasil contém um volume de 27% de etanol anidro em sua composição, podendo atingir até 35%, segundo as regras definidas no programa Combustível do Futuro – Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024 (Brasil, 2024). Conforme já mencionado, a frota de veículos leves no Brasil soma cerca de 44,3 milhões de veículos, dos quais 40 milhões são *flex-fuel*. Supondo, conservadoramente, que todos sejam abastecidos exclusivamente com a gasolina vendida nos postos, teríamos uma frota fictícia equivalente a 12,2 milhões de veículos usando somente o etanol anidro.

Adicionalmente, estima-se que a cana-de-açúcar, em seu ciclo de desenvolvimento vegetal, absorve de 70% a 80% do dióxido de carbono (CO_2) liberado na produção e queima do álcool combustível (Stellantis, 2023). Admitindo-se, também de forma conservadora, que essa absorção seja de 70%, a frota de 12,2 milhões de veículos a etanol equivaleria a uma frota teórica de 8,5 milhões de veículos "emissão-zero", ou seja, cujas emissões de CO_2 são inteiramente absorvidas pelas plantações de cana-de-açúcar, o que colocaria o Brasil na segunda posição entre as maiores frotas de veículos de baixa emissão, atrás apenas da China.[4] Esse simples exercício ilustrativo considera apenas o volume de etanol anidro já contido na gasolina no Brasil e desconsidera o uso recorrente no país do etanol como um substituto da gasolina.

Ainda no âmbito da plataforma de veículos com motores a combustão, uma outra modalidade seriam os veículos a gás natural veicular (GNV).

4 Em 2022, a frota de veículos a bateria era de 11,5 milhões na China e de 2,1 milhões nos EUA (IEA, 2023).

Trata-se de uma alternativa viável para a redução de emissões em veículos pesados. As emissões de CO_2 em caminhões a GNV podem ser até 20% inferiores às de um caminhão equivalente a *diesel*. As reduções são ainda maiores para os óxidos de nitrogênio (até 90%) e material particulado (até 85%) (Machado, 2023).

Essas emissões seriam ainda inferiores se fosse usado, em veículos dessa plataforma, o biometano no lugar do gás natural. O biometano pode ser intercambiável com o GNV[5] e pode ser obtido a partir de resíduos de atividades agropecuárias, de estações de tratamento de esgoto e de aterros sanitários. Há empresas no Brasil com capacidade produtiva de caminhões pesados e chassis de ônibus com motorização a GNV/biometano desde 2020.

Em relação à plataforma de veículos elétricos a bateria, o Brasil não apresenta, até o momento, produção local de veículos leves. No segmento de pesados (caminhões e ônibus urbanos), por outro lado, já há algum avanço em termos de produção local de veículos e de alguns dos componentes do trem de força elétrico, com destaque para os inversores[6] e motores elétricos, bem como de algumas etapas de fabricação de baterias. Existem plantas para a montagem final de baterias de íons de lítio produzidas com células importadas, casos da WEG Equipamentos Elétricos, BorgWarner Brasil e BYD do Brasil. A WEG produz também os elementos do sistema de tração, inversor e motor, que são usados na produção local de caminhões e ônibus elétricos.

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) teve um papel importante na instalação dessas capacidades produtivas por meio do credenciamento de máquinas e equipamentos no BNDES Finame, produto do Banco voltado para o financiamento de sua produção e comercialização. As plantas de montagem de baterias de íons de lítio foram introduzidas no país

5 As resoluções ANP 886, de 29 de setembro de 2022 (Brasil, 2022a) e 906, de 18 de novembro de 2022 (Brasil, 2022b) dispõem sobre as especificações de produção de biometano, que garantem sua intercambiabilidade com o GNV.

6 O inversor em veículos elétricos faz a conversão da corrente contínua (CC) armazenada nas baterias em corrente alternada (CA), necessária para acionar o motor elétrico. Ele é o componente-chave do sistema de controle de energia, ajustando tensão, frequência e fase da corrente elétrica para controlar a rotação e o torque do motor de maneira precisa.

a partir da formulação de uma metodologia lançada em 2019 para o credenciamento de veículos elétricos e seus componentes.

Além da montagem de baterias, já são produzidos no país caminhões de porte médio para distribuição de mercadorias, principalmente em ambiente urbano, pela Volkswagen Caminhões; e chassis de ônibus elétricos, pela BYD, Eletra Industrial, Marcopolo e Mercedes-Benz.

Em relação aos veículos híbridos, que mesclam motores a combustão com baterias recarregáveis, o mercado brasileiro já dispõe de algumas opções de fabricação local, que se enquadram nas arquiteturas de híbridos puros e híbridos leves. Com o anúncio de novos lançamentos e o crescimento do mercado é possível que o aumento de escala possibilite a fabricação de componentes dos sistemas híbridos no país. Todos os modelos de híbridos em produção nacional e planejados utilizam a tecnologia *flex* nos motores a combustão. O sistema híbrido, que ainda é importado, poderá vir a ser fabricado no país, caso o aumento de escala dessa tecnologia se concretize.

Finalmente, em relação à plataforma veicular de células a combustível, rota tecnológica menos madura que as anteriores, destacam-se alguns projetos de pesquisa e desenvolvimento no país com foco no uso dos biocombustíveis como fonte de hidrogênio.

Essa pode representar uma importante alternativa em médio-longo prazo para a combinação dos biocombustíveis com a eletrificação veicular, uma vez que o etanol é uma fonte relevante de hidrogênio e que já conta com uma infraestrutura de distribuição constituída no país. Além disso, a topologia dos veículos a célula de combustível, como no caso dos veículos elétricos a bateria, também utiliza baterias, inversores e motores elétricos acrescidos da célula propriamente dita.

Sendo assim, a estratégia nacional de descarbonização da mobilidade deveria impulsionar essas diferentes plataformas veiculares, usando o potencial que algumas delas têm, como no caso dos veículos híbridos e de célula combustível, para alavancar a constituição de novas capacidades na indústria automotiva relacionadas à eletrificação veicular.

CONSIDERAÇÕES PARA UMA ESTRATÉGIA NACIONAL DE DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Movimentos de transição tecnológica, como o que ocorre atualmente na indústria automotiva mundial, de migração para plataformas veiculares de baixo carbono, são janelas de oportunidade para que os países estabeleçam políticas industriais e tecnológicas. O desafio de descarbonização da mobilidade representa uma oportunidade para a indústria automotiva brasileira combinar inovação e sustentabilidade.

Conforme já apresentado, existem diferentes plataformas veiculares que representam alternativas para que se atinja o objetivo de descarbonização da mobilidade. Considerando o processo de adoção da eletrificação no mundo, seus desafios e potencialidades já citados, é possível antever a convivência de diferentes plataformas veiculares nos próximos anos e uma eletrificação em ritmo heterogêneo entre os diferentes países. O ritmo e a intensidade do processo em cada região dependerão, principalmente, de fatores como disponibilidade de infraestrutura, perfil econômico dos consumidores e características das matrizes energéticas.

Diante do cenário acima descrito e das características de nossas matrizes industrial e energética, esta seção aborda algumas considerações para o estabelecimento de uma estratégia brasileira para a descarbonização da indústria automotiva. A seguir, são apresentados alguns princípios que deveriam nortear a construção dessa estratégia:

i) Estabelecer a descarbonização da mobilidade e da indústria automotiva como desafio nacional orientador de políticas energética, industrial e tecnológica.

ii) Reduzir emissões mais rapidamente, com menor custo e maior impacto para a sociedade.

iii) Considerar as emissões associadas aos veículos segundo as metodologias de ciclo de vida ("poço à roda", "campo à roda", "berço ao túmulo").

iv) Garantir segurança energética e autonomia tecnológica, fortalecendo as cadeias produtivas locais e alavancando o sistema de inovação.

v) Impulsionar as plataformas tecnológicas que se provem como as mais adequadas aos diferentes usos dos veículos (segmentos de leves *versus* pesados, urbano *versus* rodoviário).

vi) Adotar uma abordagem sistêmica capaz de articular diferentes dimensões de políticas (energética, industrial e tecnológica; de financiamento; de educação; de ciência, tecnologia e inovação – CT&I – etc).

O primeiro aspecto – **estabelecer a descarbonização da mobilidade e da indústria automotiva como desafio nacional orientador de políticas energética, industrial e tecnológica** – incorpora a ideia de estruturação de políticas nacionais orientadas por missões (Mazzucato, 2018) e desafios nacionais (Gadelha, 2016).

Políticas públicas orientadas por missões e desafios nacionais referem-se a uma abordagem estratégica na qual governos e instituições públicas estabelecem metas específicas e ambiciosas para abordar desafios significativos da sociedade. Essas políticas são elaboradas para lidar com questões complexas e urgentes, como mudanças climáticas, cuidados de saúde, redução da desigualdade e inclusão social. As missões buscam incentivar e definir o processo de desenvolvimento econômico.

Políticas orientadas por missões têm uma perspectiva em longo prazo e visam impulsionar mudanças transformadoras, alinhando recursos e esforços a uma visão compartilhada de progresso e desenvolvimento. Essa orientação permite também que a política seja estruturada nas diversas dimensões que precisam estar inseridas na construção de qualquer política pública, como as sociais, ambientais, políticas, econômicas, de criação de demanda por novas soluções, de padrões de financiamento ao investimento, de educação e formação profissional, de ciência e tecnologia, de geração de emprego, entre outras.

O segundo aspecto – **reduzir emissões mais rapidamente, com menor custo e maior impacto para a sociedade** – é o vetor orientador de iniciativas de políticas pelo qual o desafio selecionado se torna realidade. A partir desse

objetivo, elas devem se nortear pela busca de soluções que sejam capazes de reduzir mais rapidamente as emissões, o que passa por considerar as particularidades de determinada região e país.

Assim, permite-se um olhar para as capacidades locais e para a estrutura produtiva existente como alavancas de iniciativas de políticas. Essa abordagem impõe a necessidade de colocar em questão o processo de transição tecnológica para o paradigma da eletrificação a bateria como um fenômeno geral e desconectado das realidades locais. No caso brasileiro, o potencial dos biocombustíveis em viabilizar uma transição energética mais célere não pode ser desconsiderado.

Esse segundo aspecto se conecta fortemente com a terceira abordagem: **considerar as emissões associadas aos veículos segundo as metodologias de ciclo de vida**. O debate sobre emissões no setor de transporte tem enfatizado a importância de se contabilizar as emissões em todo o ciclo de vida[7] dos veículos e dos combustíveis/eletricidade. Isso passa, no caso específico da indústria automotiva, por considerar as emissões não apenas nos escapamentos dos veículos, mas também nas diferentes etapas de produção dos veículos, seus componentes e insumos, e na produção dos chamados vetores energéticos (combustíveis e/ou energia consumida no uso desses veículos).

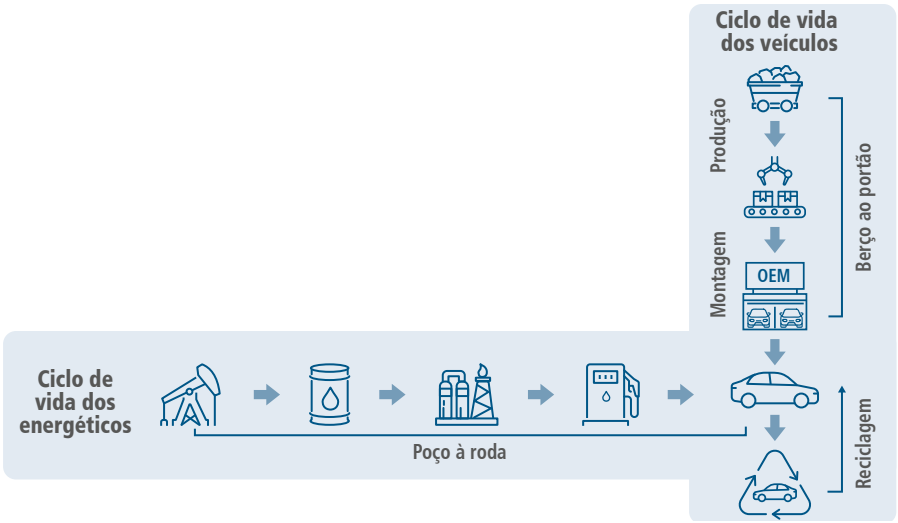
Esse conceito, na verdade, deve combinar dois ciclos de vida completos, distintos e interligados. O ciclo de vida da produção dos veículos, seus insumos e componentes; e o ciclo de vida dos vetores energéticos utilizados por eles. Esses dois ciclos de vida se encontram no uso dos veículos (Figura 1).

Isso implica a definição de normas e parâmetros que sejam consistentes do ponto de vista técnico e que sejam aceitos internacionalmente, uma vez que podem impactar o posicionamento brasileiro na definição dos acordos climáticos globais. O Brasil tem feito avanços importantes nesse sentido. Além disso, tem adotado o conceito de ciclo de vida nas políticas relacionadas ao setor automotivo, por exemplo no programa Combustível

7 Os diversos ciclos de emissões associadas aos veículos recebem nomenclaturas particulares na literatura técnica: as emissões associadas ao uso dos veículos, mediante o consumo do vetor energético, formam o ciclo "do tanque à roda". Somando essas emissões àquelas geradas por todo o processo de produção dos vetores energéticos se obtém o ciclo "do poço à roda". Finalmente, as emissões associadas aos processos produtivos dos veículos, seus componentes e insumos formam o ciclo "do berço ao portão".

do Futuro[8] e na nova fase do regime automotivo, implementada em junho de 2024, também conhecida como Programa Mover.[9]

Figura 1. Ciclos de vida dos veículos e dos vetores energéticos



Fonte: Adaptado de Abreu (2023, p.2).

Nesse ponto, surge outro aspecto relevante para a estruturação de uma política de descarbonização da indústria automotiva brasileira, qual seja, a combinação dos processos de eletrificação veicular com os biocombustíveis, que podem impulsionar, em escalas crescentes, a redução das emissões. Diferentes estudos baseados na abordagem do ciclo de vida indicam que a combinação dessas variadas plataformas tecnológicas (biocombustíveis, eletrificação, hidrogênio) e veiculares (veículos a baterias, híbridos com biocombustíveis, células combustíveis) apresentam um maior potencial

8 O programa Combustível do Futuro se refere a uma série de medidas incorporadas ao texto da Lei 14.993/2024 (Brasil, 2024), que trata de programas nacionais de *diesel* verde, de combustível sustentável para aviação e de biometano, além do aumento das proporções de mistura de etanol na gasolina e de *biodiesel* no *diesel*.

9 O Programa Mover é a política industrial para o setor automotivo, sancionada em junho de 2024, que sucede o Programa Rota 2030. O objetivo é promover a adoção de meios de mobilidade mais sustentáveis, por meio da concessão de incentivos fiscais às empresas do setor que desenvolvam veículos e componentes que incorporem tecnologias de baixa emissão.

de redução das emissões (Boureima *et al.*, 2012; Gauto *et al.*, 2023; Meier *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2018; Tessum; Hill; Marshall, 2014).[10]

Ao integrar os biocombustíveis e a eletrificação veicular, busca-se o objetivo de **garantir segurança energética e autonomia tecnológica, fortalecendo as cadeias produtivas locais e alavancando o sistema de inovação** e estabelece-se uma rota de inserção da indústria automotiva brasileira na direção da eletrificação.

Nesse aspecto, é importante que o Brasil não deixe de realizar o fomento e o adensamento produtivo de etapas relevantes da rota tecnológica dos veículos elétricos a bateria, por exemplo, a partir da agregação de valor dos minerais críticos disponíveis no país que são utilizados na fabricação das baterias, devendo também buscar saltos tecnológicos por meio do desenvolvimento das tecnologias de células combustíveis com reforma do etanol.

A política deve ser capaz de **impulsionar as plataformas tecnológicas mais adequadas aos diferentes usos dos veículos (segmentos de leves *versus* pesados, urbano *versus* rodoviário)**. Para ilustrar esse ponto, pode-se tomar como exemplo o segmento de veículos pesados, cujas condições operacionais são diferentes dependendo do uso. No caso de rotas de média e longa distância (transporte de carga por caminhões ou de passageiros em ônibus interestaduais), o uso de veículos elétricos a bateria ainda se confronta com o desafio da autonomia. Para essas aplicações, a melhor estratégia pode ser incentivar a substituição dos motores a *diesel* por motores a GNV e estruturar uma estratégia focada na viabilização do *diesel* verde e no biometano. Já para as aplicações urbanas com rotas mais curtas (transporte de passageiros em ônibus municipais), há condições para uma adoção mais rápida da plataforma de veículos elétricos a bateria.[11] No que concerne aos veículos leves, por outro lado, a plataforma baseada em veículos híbridos a etanol pode ser alternativa para acelerar a

10 Esses estudos destacam, por exemplo, que veículos híbridos a biocombustíveis e/ou a biometano teriam a vantagem de prescindir da constituição de uma infraestrutura de recarga e possuem, no presente, emissões comparáveis ou inferiores àquelas encontradas no uso dos veículos elétricos a bateria quando utilizados na Europa, EUA ou China. Esses veículos seriam, portanto, alternativa relevante para a descarbonização da mobilidade no Brasil para o curto e médio prazo.

11 Muitas cidades têm incentivado essa adoção buscando ganhos também em questões relacionadas à saúde pública, visto que as emissões de particulados dos motores a combustíveis fósseis estão associadas a vários tipos de doenças respiratórias e cardíacas.

redução das emissões em curto prazo, por prescindir de infraestrutura de recarga de larga escala e por apresentar balanço de emissões favorável. Diferentes estimativas indicam esse potencial de veículos híbridos na redução de emissões. Gauto e outros (2023), por exemplo, sugerem que os veículos híbridos no Brasil apresentam um melhor desempenho em termos de emissões do que os veículos elétricos a bateria usados na Europa, quando se considera a metodologia de ciclo de vida para mensuração das emissões.

O Quadro 2 ilustra essas considerações, ao combinar os diferentes veículos aos tipos de usos e às plataformas de transição tecnológica para um novo paradigma da mobilidade de baixo carbono.

Quadro 2. Estratégia multiplataformas para descarbonização da mobilidade

VEÍCULOS	USOS	PLATAFORMAS DE TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA
Leves	Todos	Veículos híbridos (elétrico + etanol) em curto prazo e eletrificação a bateria e célula a combustível em médio-longo prazo.
Pesados	Urbanos	Veículos elétricos a bateria e biogás em curto-médio prazo e hidrogênio em longo prazo.
	Rodoviário	Veículos a combustão com baixa emissão em curto-médio prazo (GNV e biogás) e *diesel* verde em médio-longo prazo.

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, é importante **adotar uma abordagem sistêmica capaz de articular diferentes dimensões de políticas (energética, industrial e tecnológica; de demanda; de financiamento e fomento; de educação; de CT&I etc.)**. Aqui, trata-se de, a partir das considerações anteriores, refletir acerca da implementação da política em suas diversas dimensões, o que inclui o alinhamento entre as políticas explícitas e implícitas[12] e a necessidade de se estabelecer uma governança capaz de articular diferentes iniciativas e

12 As políticas explícitas são aquelas que influenciam diretamente no objeto de uma política industrial e tecnológica a fim de atingir determinados objetivos. O fomento à pesquisa e desenvolvimento ou políticas de formação e qualificação profissional para determinada atividade-fim são exemplos de políticas explícitas. As políticas implícitas, por sua vez, são aquelas que não têm uma atuação direta no objeto da política. Não enunciam determinado objetivo, ou mesmo não definem um instrumento de atuação e fomento para esse fim. Ainda assim, influenciam o processo de desenvolvimento, reforçando-o – ou indo em direção contrária –, podendo até anular os efeitos da política explícita. A política macroeconômica de um país é um exemplo de política implícita.

organizações executoras da política. Adiciona-se a isso a importância de se ter um olhar sobre as competências e habilidades das organizações públicas que executam essas políticas.

Na visão sistêmica das políticas públicas, as próprias ações de formulação e execução devem ser continuamente acompanhadas, com ajustes e reformulações ao longo do tempo, no intuito de prevenir consequências sociais indesejáveis e de promover o desenvolvimento coeso, inclusivo e sustentável (Cassiolato e Lastres, 2005). O acúmulo de capacidades dinâmicas nas organizações executoras de políticas industriais e de inovação é um aspecto importante para o aprimoramento e o desenvolvimento de novas abordagens para a execução dessas políticas.

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um panorama sobre as mudanças que vêm ocorrendo na indústria automotiva global e no Brasil, com destaque para a transição tecnológica em direção a um novo paradigma de mobilidade de baixo carbono e da indústria automotiva, baseado em diferentes rotas tecnológicas de eletrificação veicular. Há enormes incertezas envolvidas nesse processo, não apenas tecnológicas, mas também aquelas relacionadas à geopolítica da energia, que devem definir o ritmo dessa transição nos próximos anos.

Movimentos de transição como o que ocorre atualmente na indústria automotiva são janelas de oportunidade para que os países estabeleçam políticas industriais e tecnológicas focadas na superação dos seus desafios nacionais e promovam novos ciclos de desenvolvimento. O desafio de descarbonização da mobilidade representa uma oportunidade única para que a indústria automotiva brasileira estabeleça um novo ciclo de desenvolvimento que combine inovação, engenharia e sustentabilidade.

Argumentou-se que as políticas devem se orientar pela busca de soluções que acelerem a transição para a mobilidade de baixo carbono com menor custo e maior retorno ambiental, econômico e social para a sociedade brasileira. Esse processo deve ser trilhado considerando as realidades locais e as restrições que certamente terão que ser enfrentadas para a estruturação de políticas

amplas, orientadoras, abrangentes e eficazes. Nesse sentido, a abordagem das missões e dos desafios nacionais pode contribuir para o processo de elaboração dessas políticas.

O Brasil, por ter disponível uma matriz energética com participação relevante de energias renováveis e uma indústria automotiva madura que utiliza em larga escala os biocombustíveis, se posiciona em situação muito particular em relação aos demais países. É possível construir uma estratégia nacional de descarbonização da indústria automotiva que considere as capacidades locais no processo de transição para o paradigma da eletrificação veicular.

Essa estratégia deve levar em consideração as diferentes plataformas veiculares e impulsioná-las, para construir um novo paradigma de bioeletrificação, estimulando a localização de componentes comuns nas diferentes plataformas a exemplo dos motores elétricos, inversores e geradores. Em paralelo, é necessário explorar o desenvolvimento e a produção local de baterias, avançando na cadeia de minerais críticos já existente.

A estratégia também deve considerar as oportunidades para que o Brasil tome a dianteira no desenvolvimento de motores de combustão interna dedicados à hibridização para o uso dos combustíveis de baixo carbono que já estão disponíveis, como o etanol e o biometano, e para aqueles que virão a partir da produção de hidrogênio verde e outros combustíveis sintéticos.

Importante notar que o Brasil já conta com um arcabouço completo de programas e políticas públicas. São políticas como o Programa Mover, que sucedeu o Programa Rota 2030, atualizando o regime automotivo no país, com regras e contrapartidas de investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação; o programa Combustível do Futuro, que orienta as ações direcionadas para o segmento de combustíveis; o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve),[13] focado na regulação das emissões veiculares; a Política Nacional de Biocombustíveis

13 O Proconve é uma iniciativa do governo brasileiro, conduzida pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, para reduzir a emissão de poluentes por veículos automotores. Implementado por etapas desde 1986, o programa estabelece limites de emissão e incentiva o desenvolvimento de tecnologias mais limpas, visando reduzir a emissão de gases de efeito estufa e melhorar a qualidade do ar e a saúde pública.

(Renovabio),[14] direcionada especificamente ao segmento de biocombustíveis; além de iniciativas como o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), que, por meio de etiquetas que indicam a eficiência energética de um produto, viabiliza uma solução eficaz e de fácil comunicação à sociedade.

Essas políticas devem incorporar a dimensão do financiamento, em que o BNDES tem papel fundamental, especialmente no fomento à infraestrutura e à indústria. Nesse contexto, o Banco vem se articulando com outras instituições, com destaque para a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), gestora do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), que dispõe de recursos relevantes para o fomento à inovação; a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação e Industrial (Embrapii); e o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai). Destaca-se ainda o lançamento recente do Programa BNDES Mais Inovação, que apoia projetos de investimentos voltados para inovação, aquisição de bens inovadores e difusão tecnológica. O programa é orientado pelas missões de descarbonização e transição energética priorizadas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial (CNDI), que estabelece a governança para a coordenação das diferentes ações de política industrial e tecnológica.

Todos esses elementos podem contribuir para a estruturação da nova estratégia nacional de descarbonização da indústria automotiva. O caminho do desenvolvimento brasileiro passa pelo aproveitamento das competências já constituídas no país e pela execução de políticas que impulsionem a indústria, a inovação e a engenharia automotiva brasileira.

14 O Renovabio é um programa coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, que visa promover a expansão de biocombustíveis na matriz energética nacional. Estruturado com metas de descarbonização, o programa incentiva a produção sustentável de biocombustíveis por meio da redução das emissões de gases de efeito estufa no processo produtivo.

REFERÊNCIAS

ABREU, R. Mobilidade sustentável do poço a roda: descarbonização como política integrada. 2023. *In*: SEMINÁRIO INDÚSTRIA, TECNOLOGIA E ENGENHARIA AUTOMOTIVA PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA MOBILIDADE, 2023, Rio de Janeiro. *Apresentação* [...]. Rio de Janeiro: BNDES, 2023. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/seminarios/seminario-industria-tecnologia-e-engenharia-automotiva-para-a-descarbonizacao-da-mobilidade/. Acesso em: 27 nov. 2023.

ABVE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Em ano de recordes, veículos plug-in avançam. *ABVE*, São Paulo, 2023. Disponível em: https://abve.org.br/em-ano-de-recordes-veiculos-plug-in-ganham-mercado/. Acesso em: 24 jan. 2024.

ANUÁRIO da Indústria Automobilística Brasileira 2023: reindustrialização. São Paulo: Anfavea, fev. 2023. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2023/04/ANUARIO-ANFAVEA-2023.pdf. Acesso em: 24 jan. 2024.

BOUREIMA, F. *et al.* Environmental assessment of different vehicle technologies and fuels. *WIT Transactions on the Built Environment*, [*s. l.*], v. 128, p. 15-26, 2012. DOI: https://doi.org/10.2495/UT120021.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro de 2022*. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado no território nacional. [*S.l.*]: ANP, 2022a. Disponível em: https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-886-2022-estabelece-a-especificacao-e-as-regras-para-aprovacao-do-controle-da-qualidade-do-biometano-oriundo-de-aterros-sanitarios-e-de-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-industriais-e-comerciais-a-ser-comercializado-no-territorio-nacional?origin=instituicao. Acesso em: 24 jan. 2024.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Resolução ANP nº 906, de 18 de novembro de 2022*. Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. [*S.l.*]: ANP, 2022b. Disponível em: https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-906-2022-dispoe-sobre-as-especificacoes-do-biometano-oriundo-de-produtos-e-residuos-organicos-agrossilvopastoris-e-comerciais-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao. Acesso em: 24 jan. 2024.

BRASIL. *Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024*. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999, 8.723, de 28 de outubro de 1993, e 13.033, de 24 de setembro de 2014; e revoga dispositivo da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2024. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14993-8-outubro-2024-796443-publicacaooriginal-173317-pl.html. Acesso em: 5 dez. 2024.

CARTA da Anfavea: resultados de dezembro e janeiro a dezembro de 2023. São Paulo: Anfavea, n. 452, jan. 2024. Disponível em: https://www.anfavea.com.br/cartas/carta452.pdf. Acesso em: 24 jan. 2024.

CASSIOLATO, J. E.; LASTRES, H. M. M. Sistemas de inovação e desenvolvimento: as implicações de política. *São Paulo em Perspectiva*, São Paulo, v. 19, p. 34-45, 2005.

EPE – EMPRESA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. *Eletromobilidade e biocombustíveis*. Documento de apoio ao PNE 2050. EPE, Rio de Janeiro, 2018.

GADELHA, C. A. G. Política industrial, desenvolvimento e os grandes desafios nacionais. *In*: LASTRES H. M. M.; CASSIOLATO J. E.; LAPLANE G.; SARTI F. (org.). *O futuro do desenvolvimento*. Campinas: Editora Unicamp, 2016. p. 215-351.

GAUTO, M. A. *et al*. Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles. *Energy for Sustainable Development,* Amsterdam, n. 76, v. 76, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101261.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2023*: Catching up with climate ambitions. Paris: IEA, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023. Acesso em: 18 mar. 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change:* Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra: IPCC, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 18 mar. 2024.

J.P. MORGAN. Eye on the market. *Energy Outlook 2018*: Pascal's wager. Nova York: JP Morgan, 2018.

MACHADO, Nayara. Caminhões a gás disputam com elétricos o espaço do diesel. *Agência Epbr (Eixos)*, [*s. l.*], 19 abr. 2023. Disponível em: https://epbr.com.br/caminhoes-a-gas-em-alta-e-nas-rotas-do-biometano/#:~:text=Na. Acesso em: 7 dez. 2023.

MAZZUCATO, M. Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities. *Industrial and Corporate Change*, Oxford, v. 27, n. 5, p. 803-815, 2018. DOI: https://doi.org/10.1093/icc/dty034.

MEIER, P. J. *et al*. Potential for electrified vehicles to contribute to U.S. petroleum and climate goals and implications for advanced biofuels. *Environmental Science and Technology*, [*s. l.*], v. 49, n. 14, p. 8277-8286, 2015. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01691.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima no Brasil 1970-2019 (base de dados), 2020. *Seeg*, 2020. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-net-emissions-by-sector-nci. Acesso em: 18 mar. 2024.

SINDIPEÇAS – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Relatório da Frota Circulante:* Edição de 2023. Sindipeças: São Paulo, 2023. Disponível em: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2023/RelatorioFrotaCirculante_2023.pdf. Acesso em: 26 jan. 2024.

SOUZA, L. L. P. *et al*. Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 203, p. 444-468, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.236.

STELLANTIS. Comparativo de emissões de CO2 confirma vantagens do etanol para uma mobilidade mais sustentável (*press release*). *Stellantis*, [*s. l.*], 31 mar. 2023. Disponível em: https://www.media.stellantis.com/br-pt/corporate-communications/press/comparativo-de-emissoes-de-co2-confirma-vantagens-do-etanol-para-uma-mobilidade-mais-sustentavel. Acesso em: 7 dez. 2023.

TESSUM, C. W.; HILL, J. D.; MARSHALL, J. D. Life cycle air quality impacts of conventional and alternative light-duty transportation in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Washington, DC, v. 111, n. 52, p. 18490-18495, 2014. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1406853111.

3

Oportunidades na cadeia de materiais minerais para baterias de veículos elétricos

Pedro Paulo Dias
João Paulo Cotta da Silva*

* Respectivamente, gerente e estagiário do Departamento de Indústrias de Base e Extrativa da Área de Desenvolvimento Produtivo e Inovação do BNDES.

INTRODUÇÃO

O combate às mudanças climáticas e a transição para uma economia de baixo carbono têm impulsionado movimentos de transformação de diversos mercados. Atividades e produtos tradicionais precisarão reduzir sua pegada de carbono, com destaque para as atividades de transporte e as indústrias de cimento e siderurgia. Ao mesmo tempo, há segmentos que ganham força nesse contexto de transformação, envolvendo bioprodutos, química verde e materiais críticos.[1]

No contexto de transformação dos transportes, a descarbonização da mobilidade pela via da eletrificação dos veículos e a expansão necessária da geração de energias renováveis podem ser compreendidas como os principais vetores a impactar a cadeia de materiais minerais, impulsionando fortemente a demanda por minerais e transformados críticos para a transição energética. Isso porque as baterias para armazenamento de energia, motores de propulsão elétrica, bem como algumas das máquinas e equipamentos para geração renovável dependem de diferentes minerais críticos para sua fabricação.

A Agência Internacional de Energia (IEA, conforme a sigla original em inglês) destaca a importância dessas cadeias para a transição energética e para a economia de baixo carbono ao afirmar que a resposta dos formuladores de política e das empresas determinará se os minerais críticos seguirão sendo um viabilizador fundamental da transição energética ou se eles se tornarão um gargalo desse processo.[2]

Segundo a IEA (2022b), a transição energética envolverá a mudança para um sistema energético mais intensivo em minerais críticos. De acordo com dados do relatório, uma usina de geração eólica *offshore* demanda 13 vezes mais recursos minerais do que uma usina de potência similar movida a gás natural, e um veículo elétrico demanda cinco vezes o volume de minerais críticos inseridos em um veículo convencional.

---

1 Recursos minerais considerados essenciais para atividades produtivas de elevada importância econômica e cujo fornecimento está sujeito a riscos de ruptura ou escassez, a exemplo de lítio, terras raras, cobalto, níquel, cobre, manganês, grafita etc. Esses riscos em geral são associados à ausência de reservas conhecidas para o atendimento da demanda projetada ou à elevada concentração de oferta em poucos países.

2 No original: "*The response from policy makers and companies will determine whether critical minerals remain a vital enabler for clean energy transitions or become a bottleneck in the process*" (IEA, 2022b).

O movimento de eletrificação de frotas de veículos tem projeção de altos volumes para os próximos anos, o que representa crescimento expressivo para a demanda de minerais e produtos transformados de minerais, como lítio, níquel, terras raras, grafite, cobalto, manganês, cobre, alumínio, entre outros. O Brasil, reconhecido por sua riqueza geológica, seu histórico em mineração e transformação mineral e sua diversificação econômica, beneficia-se desse movimento e tem potencial de impulsionar a produção mineral, bem como de materiais transformados e componentes inseridos na fabricação de veículos eletrificados.

As principais diferenças dos veículos elétricos quando comparados a veículos tradicionais a combustão são motor, bateria, maior volume de cabos e necessidade de materiais leves que auxiliem na redução do peso total do veículo diante do maior peso dos componentes utilizados. De acordo com dados da IEA (2022b), o veículo elétrico contém mais de 200 kg de minerais considerados críticos, enquanto o veículo a combustão, menos de 40 kg.

A bateria é um componente fundamental e, segundo a IEA (2022a), corresponde a 30% a 40% do valor de um veículo elétrico. Por essa razão, há diversos países buscando internalizar a cadeia de produção de baterias, o que demanda conhecimento tecnológico e disponibilidade de materiais minerais.

Além disso, as empresas estão incorporando maior capacitação na produção de motores e impulsionando o desenvolvimento da capacidade produtiva de materiais e componentes aplicados, a exemplo de ímãs permanentes e refino de terras raras.

Diante desse cenário, este artigo tem o objetivo de apresentar aspectos relevantes dos mercados de baterias e materiais, a fim de contribuir para a identificação de oportunidades para o desenvolvimento das cadeias de materiais para baterias no Brasil. Está dividido em mais três seções, além desta introdução. Na segunda seção, são apresentadas informações e tendências do mercado de baterias de veículos elétricos. Na terceira, são apresentadas oportunidades relacionadas a quatro minerais considerados de maior destaque para a produção de baterias. Por fim, são tecidas breves considerações finais, que indicam o potencial do Brasil para avançar nessa agenda.

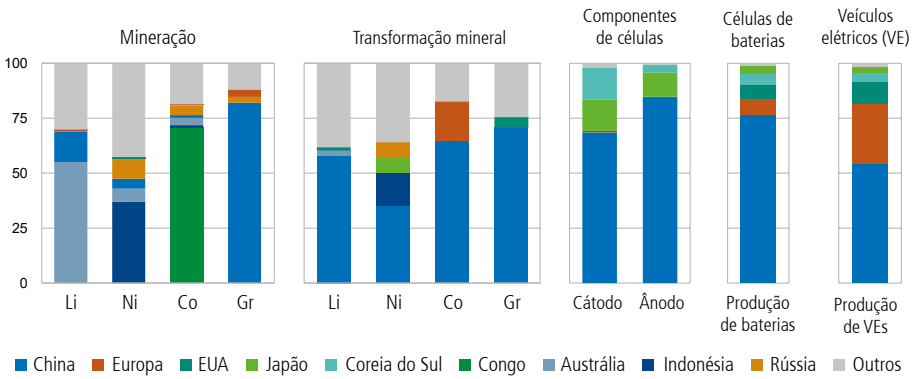
AS BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

A escalada recente dos investimentos para a produção de veículos elétricos faz com que a indústria de baterias vivencie um período de grandes movimentações e inovações. Destaca-se a corrida tecnológica por melhor eficiência, custo e sustentabilidade, o que explica a diversidade de modelos e as evoluções no mercado.

Trata-se de um mercado que deverá crescer mais de 20% ao ano nos próximos dez anos, de acordo com projeções da consultoria CRU Group International (2023a), com destaque às baterias de veículos leves, que responderão por 80% a 85% de todo o mercado de baterias.

Como mostrado no Gráfico 1, a produção atual é bastante concentrada nos diversos elos da cadeia, com destaque à participação massiva da China nas etapas de processamento de materiais, produção de componentes e baterias. Diante dessa alta concentração da oferta de materiais e componentes essenciais para a indústria de veículos elétricos, são observados diversos movimentos e políticas de governos no sentido de promover capacidades produtivas nos próprios países, em países geograficamente próximos a seus mercados consumidores e em países aliados geopolíticos.

Gráfico 1. Cadeia de produção de baterias e distribuição geográfica (%)



Fonte: Adaptado de IEA (2022a, p. 5, tradução nossa).

Notas: Li = lítio; Ni = níquel; Co = cobalto; e Gr = grafite. A distribuição geográfica refere-se ao país onde ocorre a produção. A mineração é baseada em dados de produção. A transformação mineral é baseada nos dados de capacidade de produção de refino. A produção de componentes de células é baseada em dados de capacidade de produção de material cátodo e ânodo. A produção de células de baterias é baseada em dados de capacidade de produção. A produção de VEs é baseada em dados de produção.

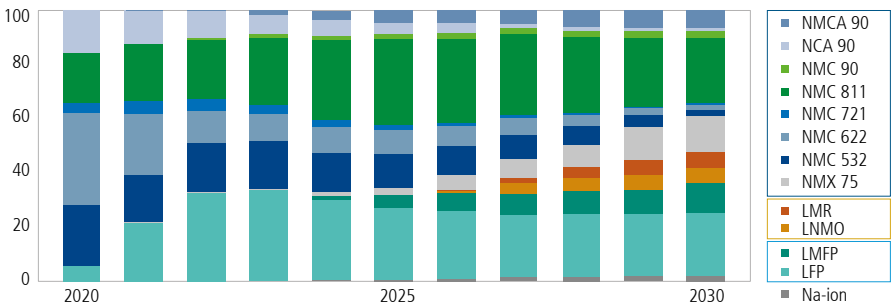
Os modelos variam de acordo com a composição química dos cátodos (eletrodos positivos), que acaba por determinar características importantes das baterias, como peso, custo de produção, tempo de vida, densidade energética e resistência a altas e baixas temperaturas. Além disso, a composição das baterias é fundamental para a sustentabilidade da produção, que diz respeito à disponibilidade dos materiais consumidos e às condições socioambientais em que são produzidos.

Os modelos predominantes atualmente no mercado possuem lítio na composição do cátodo e grafite como ânodo, por isso são conhecidas como "baterias de íon de lítio". Podem ser divididas em três grandes categorias, conforme sua composição química: (i) lítio com alto teor de níquel; (ii) lítio com baixo ou médio níquel; e (iii) lítio ferro fosfato.

As composições de baixo ou médio níquel apresentam maiores volumes de cobalto. Observa-se uma tendência de redução da participação desse tipo de bateria no mercado,[3] com predominância dos modelos de lítio com alto teor de níquel e de lítio ferro fosfato. Além disso, estão sendo desenvolvidas novas gerações de baterias, com destaque para dois tipos: (i) as de íon de lítio sem cobalto e com maior adição de manganês; e (ii) as baterias de íon de sódio.

O Gráfico 2 apresenta a participação projetada das diversas composições de cátodos até 2030 (com predominância das baterias de íon de lítio), servindo como base para projeções de mercado da demanda por materiais.

Gráfico 2. Material de cátodo em baterias de veículos no mundo (% GWh)



Fonte: Adaptado de CRU Group International (2023a, tradução nossa).

Nota: Apresenta as baterias instaladas na produção dos veículos. Outras substâncias químicas não mostradas: NCA 94, NMC 94, NMA 98, NMX 50, LNMFP.

3 O afastamento do mercado em relação a baterias com maior participação de cobalto pode ser explicado pela elevada concentração da produção atual e pela baixa expectativa quanto ao desenvolvimento de novas reservas. Segundo dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS, 2023), a República Democrática do Congo concentrou 68% da produção de cobalto em 2022.

Quadro 1. Composições químicas de cátodo de modelos de baterias

SIGLA	DESCRIÇÃO
NMCA	*Lithium nickel manganese cobalt aluminium oxide*
NCA	*Lithium cobalt aluminium oxide*
NMC	*Lithium nickel manganese cobalt oxide*
NMX	*Lithium nickel manganese*
LMR	*Lithium and manganese rich oxide*
LNMO	*Lithium nickel manganese oxide*
LMFP	*Lithium manganese iron phosphate*
LFP	*Lithium iron phosphate*
Na-ion	*Sodium-ion*

Fonte: Elaboração própria.

Assim, com base na projeção do mercado para os próximos anos sobre as tecnologias de baterias, destacam-se quatro materiais minerais como aqueles com maior potencial de demanda futura: lítio, níquel, grafite e manganês. Na seção seguinte, apresenta-se um breve panorama desses mercados.

MATERIAIS VENCEDORES E CRÍTICOS

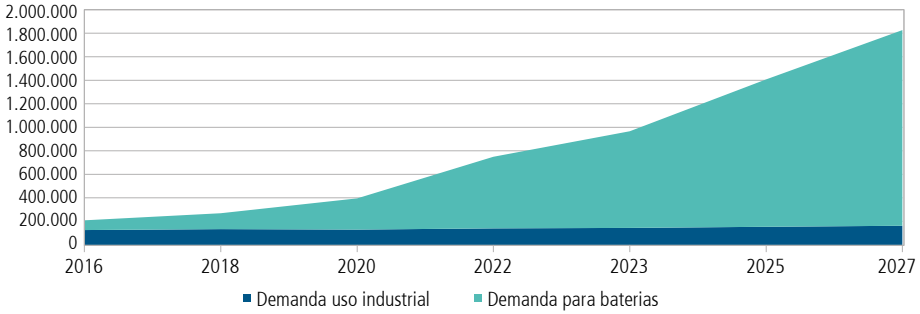
Como já mencionado, o veículo elétrico demanda cinco vezes mais insumos de minerais críticos do que um veículo tradicional a combustão. Não bastasse isso, também demanda maior diversidade de insumos na própria composição, a qual envolve materiais com mercados ainda pequenos e pouco maduros, mas em rápida expansão. São materiais dependentes de reservas minerais consideradas não abundantes diante dos grandes volumes demandados para a produção de veículos (além de outras aplicações, como a geração de energias renováveis). Por isso, são considerados materiais críticos para a transição energética.

Vale destacar que, de acordo com o Serviço Geológico do Brasil – SGB-CPRM (2023, p. 15, tradução nossa), o país "tem pelo menos um grande depósito de cada mineral crítico e geologia favorável para crescer", colocando-o diante da oportunidade de contribuir ativamente para o desenvolvimento desses mercados.

Lítio

Elemento metálico de menor densidade e maior eletropositividade da tabela periódica, o lítio tem características ideais para aplicação em baterias e está presente em todas as composições atuais no mercado. O crescimento dos mercados de eletrônicos e, mais recentemente, a aceleração da eletrificação veicular fizeram disparar a demanda e a corrida por suprimentos de lítio para a produção de baterias, como pode ser observado no Gráfico 3 e com mais detalhes na Tabela 1.

Gráfico 3. Evolução da demanda de lítio (t)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CRU Group International (2023b).

Tabela 1. Demanda de lítio por uso final (kt LCE)

FINALIDADE	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Demanda industrial (exceto baterias)	130	137	140	144	149	154	158	162
Vidro e cerâmica	64	66	68	71	73	75	78	80
Graxa lubrificante	20	22	23	23	24	25	25	26
Outros	46	49	49	50	52	54	55	56
Demanda para baterias	265	425	609	822	1.045	1.254	1.458	1.664
Veículos leves	180	322	493	686	887	1.069	1.246	1.423
Outros meios de transporte	22	25	27	30	33	36	39	41
Armazenamento estacionário	16	29	42	56	71	90	109	130
Eletrônicos portáteis	35	35	32	33	35	38	40	42
Outros	12	14	15	17	19	21	24	28
Total	**395**	**562**	**749**	**966**	**1.194**	**1.408**	**1.616**	**1.826**
Crescimento da demanda em relação ao ano anterior	28,1%	42,3%	33,3%	29,0%	23,6%	17,9%	14,8%	13,0%

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CRU Group International (2023b).

A Tabela 1 apresenta o ritmo de crescimento da demanda observado até 2022 e a projeção até 2027, quando se espera que a demanda por lítio para baterias corresponda a dez vezes o consumo total para outros usos industriais. Desse consumo, 1,46 milhão de toneladas (88%) deve ser destinado a veículos eletrificados, sendo 1,42 milhão apenas para veículos leves.

Para atender a todo esse crescimento, o lítio pode ser obtido por meio de dois tipos de formações minerais distintas: salares e rocha dura. Segundo dados dos agentes produtores, as operações de lítio de rocha dura apresentam atualmente vantagens comparativas para a aplicação em baterias, por envolverem processos ambientalmente mais sustentáveis e com menor custo para atingir os níveis de pureza necessários. As reservas mais abundantes conhecidas atualmente se concentram nos salares do Chile, da Argentina e da Bolívia, enquanto as reservas de rocha dura são a base da produção na Austrália e no Brasil.

Na Tabela 2, são apresentadas as estimativas de capacidade de produção de lítio por países. Trata-se de uma estimativa conservadora para os volumes no Brasil, pois a metodologia de cálculo leva em conta apenas projetos em implantação e prováveis, sobre os quais se aplica um desconto em razão da incerteza acerca de sua concretização. Logo, se fossem consideradas as reservas potenciais e outros projetos não listados, os números seriam ainda mais significativos.

Tabela 2. Produção de minério de lítio, por principais países (kt LCE)

PAÍSES	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Austrália	292	360	448	500	572	610
China	121	161	215	289	342	357
Chile	211	255	274	280	290	307
Argentina	34	71	131	193	237	259
Zimbábue	10	46	79	106	120	127
Brasil	12	30	63	81	97	98
Canadá	0	14	21	41	60	68
Estados Unidos da América	16	16	17	18	33	48

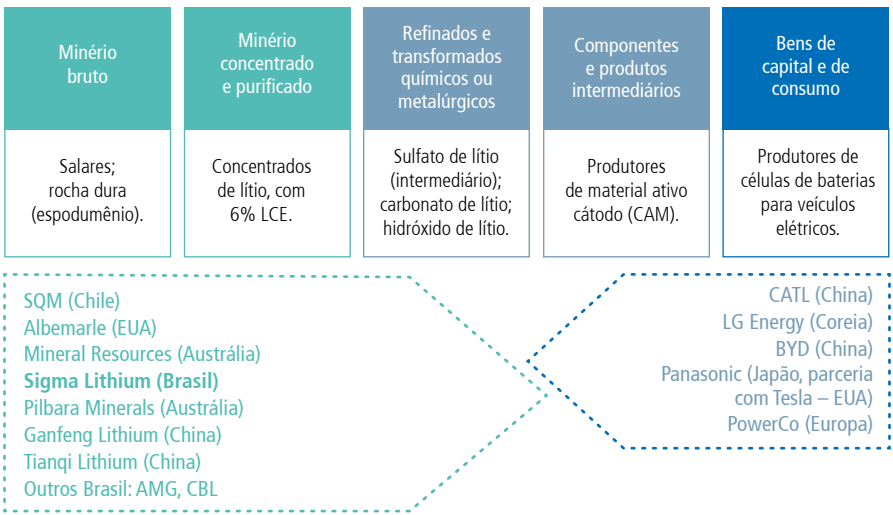
Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CRU Group International (2023b).

No caso do Brasil, a Tabela 2 apresenta de forma conservadora os projetos de expansão de apenas uma produtora, e não inclui os projetos com boas perspectivas em fase de exploração mineral. O país vivencia forte expansão dos investimentos para exploração e produção do lítio, especialmente após a retirada de restrições ao comércio internacional e o sucesso de investimentos no norte de Minas Gerais. A partir de 2022, 130 novas empresas iniciaram pesquisas de minério de lítio no país, e cabe destacar os seguidos avanços reportados pelas empresas listadas em bolsa, o que reforça um potencial ainda maior de produção do que aquele apresentado na Tabela 2.

Diante da perspectiva de crescente disponibilidade de minério de lítio e da boa competitividade esperada dos projetos em estágio mais avançado, o país tem a oportunidade de avançar na cadeia e promover novos investimentos também para capacidade de refino de lítio.

Para aplicação em baterias, o lítio extraído é concentrado e passa por um processo de refino para produção dos materiais de alto grau de pureza, seja na forma de carbonato, seja na forma de hidróxido de lítio, os quais serão aplicados na composição das células das baterias.

Figura 1. Cadeia de lítio para baterias e principais produtores mundiais



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 1 apresenta as principais etapas, bem como as empresas de maior relevância na cadeia atual do lítio para baterias. Cabe destacar que o desenvolvimento desse mercado experimenta movimentos de verticalização nas duas direções: empresas produtoras de minérios buscam participar de etapas a jusante, principalmente do refino, enquanto produtores de células de bateria desenvolvem parcerias em plantas de refino para garantir a oferta de concentrados de lítio.

Por ser considerado material crítico, governos de diversos países, como Estados Unidos da América (EUA), Canadá e Austrália, têm fomentado a produção de minérios e refinados de lítio nos próprios territórios, de forma a garantir participação nesse mercado e condições competitivas para a produção de baterias e veículos elétricos. Um exemplo dessas políticas são os créditos tributários concedidos pelo governo dos EUA para a produção de células de baterias e suas composições químicas no país, no âmbito do *Inflation Reduction Act*. Outras iniciativas são os orçamentos destinados pelos governos do Canadá e da Austrália para financiamento incentivado ao desenvolvimento de minerais críticos.

De acordo com dados da CRU Group International (2023b), foram mapeados 66 projetos de refinarias de lítio em implantação ou considerados prováveis no mundo. A maior concentração desses projetos será na China (50%). Outros países e blocos buscam aproveitar a oportunidade de desconcentração da produção em nível mundial, como é o caso de Argentina (dez projetos), Austrália (quatro projetos), EUA (quatro projetos), Chile, União Europeia e Coreia do Sul (três projetos cada). Há um projeto mapeado para produção de hidróxido de lítio no Brasil, em Minas Gerais.

Diversos desses projetos se beneficiam de parcerias entre produtores de minério de lítio e consumidores fabricantes de veículos elétricos ou baterias, como ocorre na Argentina em parceria entre a Ganfeng Lithium e a BMW. O Brasil deverá buscar parcerias para atração de investimentos para refino de lítio.

Níquel

O níquel é um metal básico com mercado consolidado, aplicado principalmente na produção de aços inoxidáveis. Conta com mercado em expansão em virtude da aplicação na fabricação de cátodos de baterias. De acordo com projeções de mercado, a demanda por níquel para essa aplicação deverá crescer à taxa média de 20% ao ano nos próximos cinco anos. Até 2027, espera-se que o uso em baterias represente cerca de 28% da demanda total de níquel primário.[4]

Tabela 3. Demanda mundial por níquel primário, por aplicação (kt)

APLICAÇÕES	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Aço inoxidável	1.923	1.893	2.082	2.176	2.256	2.317	2.393
Outras aplicações	946	1.095	1.277	1.457	1.648	1.810	1.941
Baterias	358	486	656	811	978	1.119	1.230
Demanda total por Ni primário	**2.869**	**2.988**	**3.359**	**3.633**	**3.904**	**4.127**	**4.334**

Fonte: Adaptado de CRU Group International (2023d).

Conforme a Tabela 4, diante das expectativas de aumento do consumo de níquel, espera-se um crescimento da produção de cerca de 8% ao ano em cinco anos, de 2022 a 2027. Em resposta à forte expansão do mercado de baterias, a produção de sulfato de níquel deverá crescer mais de 27% ao ano no mesmo período. Trata-se de uma verdadeira corrida de novos projetos para atendimento a esse mercado.

Tabela 4. Oferta mundial de produtos acabados de níquel primário (kt)

PRODUTOS	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Gusa de níquel (NPI)	1.297	1.547	1.731	1.665	1.767	1.849	1.859
Sulfato de níquel	204	404	596	791	965	1.146	1.361
Cátodo	457	472	525	593	609	614	614
Ferroníquel	374	345	327	341	359	367	367
Briquetes	162	168	180	173	167	155	155
Óxido de níquel	40	40	44	46	46	46	46
Outros	168	177	187	197	197	197	197
Total	**2.702**	**3.153**	**3.590**	**3.806**	**4.110**	**4.374**	**4.599**

Fonte: Adaptado de CRU Group International (2023d, tradução nossa).

4 O níquel primário é obtido a partir de extração e beneficiamento mineral, em contraposição ao níquel obtido por meio de sucata (secundário), com grande participação na produção de aços inoxidáveis.

O sulfato de níquel, material utilizado nas composições químicas de baterias, pode ser obtido a partir do processamento de diferentes produtos de níquel: briquete e outros de alta pureza, bem como produtos intermediários, como precipitados de hidróxidos mistos (MHP, na sigla em inglês), precipitados de sulfeto misto (MSP, na sigla em inglês) ou mate de níquel.

Enquanto os produtos de alta pureza, também conhecidos como classe 1, são precificados ao valor de níquel cotado na London Metal Exchange (LME)[5] ou mesmo com pequeno prêmio, os produtos intermediários, com menores concentrações de níquel, são negociados com desconto em relação ao preço LME. Por isso, é crescente o uso de produtos intermediários para a produção de sulfato de níquel, com destaque para a utilização de MHP como rota preferida para obtenção de sulfato, por vantagens de processamento e segurança em relação a outros intermediários.

A produção de sulfato de níquel é bastante concentrada na China e apresenta parcela significativa na Finlândia. Além disso, segundo dados da CRU Group International (2023d), espera-se a adição de volumes representativos de sulfato também na Indonésia e na Coreia do Sul, reforçando a concentração da produção na Ásia.

Quanto à produção de intermediários precursores ao sulfato de níquel, é esperado forte crescimento das operações de MHP, principalmente na Indonésia (maior produtor mundial de níquel), além de projeto de grande porte em Nova Caledônia.

O Brasil se posiciona entre os dez maiores produtores de níquel, além de deter a quarta maior reserva mundial (USGS, 2023). O país possui grandes projetos em operação, como Santa Rita, da Atlantic Nickel; Barro Alto, da Anglo American; e Onça Puma, da Vale, que é uma das maiores produtoras mundiais de níquel, também com grande volume de operações no Canadá. De acordo com dados da Agência Nacional de Mineração – ANM (2023b), o valor da produção de níquel alcançou R$ 9 bilhões em 2022.

5 Bolsa londrina com maior mercado de contratos futuros e opções de metais básicos, portanto a principal referência de preços desses metais.

Além disso, há grande volume de investimentos em novos projetos de níquel em implantação ou em estudos de viabilidade, com perspectiva de fornecimento para o mercado de baterias, como o projeto Piauí Níquel, da empresa Brazilian Nickel (Capitão Gervásio de Oliveira, no Piauí); e os projetos Vermelho, da empresa Horizonte Minerals, e Jaguar, da empresa Centaurus Metals, ambos na Província Mineral de Carajás, no Pará.

Cabe destacar o projeto Jaguar, que espera produzir de forma integrada 20 mil t/ano de sulfato de níquel (volume comparável a operações de grande porte fora da China) em um horizonte de vinte anos de ciclo de vida do projeto.

Sobre o processamento do níquel, o Brasil tem ainda duas refinarias negociadas recentemente pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), do grupo Votorantim, que estavam com a produção paralisada. A refinaria de níquel-cobalto São Miguel Paulista, em São Paulo, foi adquirida pela empresa Jervois Global e se prepara para a retomada de produção, com foco no mercado de baterias. E a unidade de Niquelândia, em Goiás, que inclui mina, planta de processamento e toda a estrutura operacional, teve negociação para venda à empresa Wave Nickel, do grupo Lorentzen, interrompida. Segundo informações divulgadas pelas empresas, a CBA continuará buscando alternativas para a Unidade Niquelândia, enquanto a Wave Nickel segue com sua estratégia de processamento sustentável de níquel por meio de rota industrial disruptiva, utilizando micro-ondas.

Considerando o sucesso dos projetos em desenvolvimento, o país deverá se posicionar como importante fornecedor de produtos de níquel para composição química de baterias de veículos elétricos.

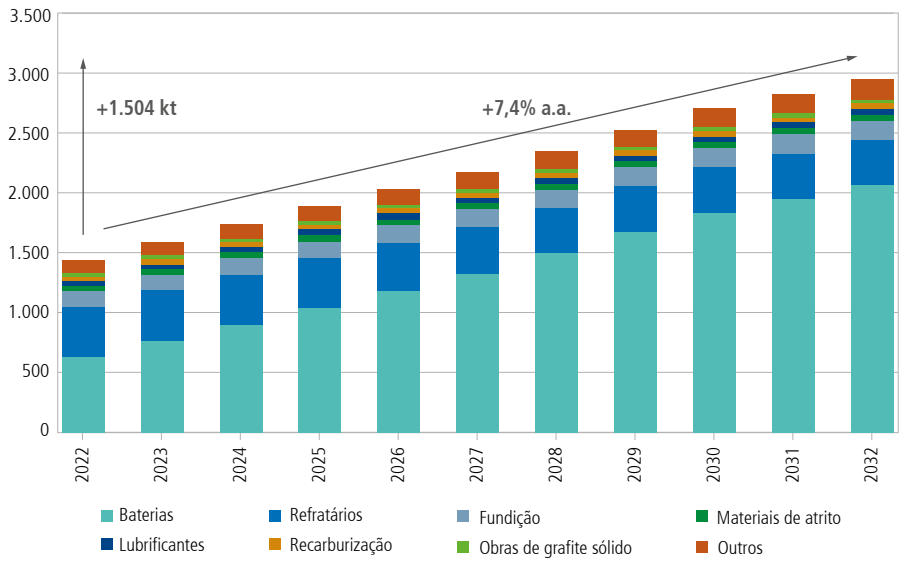
Grafite

Apesar de menos presente na mídia, o grafite é tido por alguns analistas como um grande vencedor entre os materiais aplicados em baterias. Isso porque todos os modelos utilizam grafite em sua composição, principal material aplicado nos ânodos das baterias. Trata-se de material não metálico puro de carbono, com propriedades de alta condutividade elétrica e elevado ponto de fusão.

O grafite pode ser obtido tanto de forma sintética quanto pelo processamento da grafita natural, mineral de que o Brasil detém a segunda maior reserva mundial, segundo dados do USGS (2023). A produção brasileira, no entanto, correspondeu em 2022 a cerca de 10% da produção da China, país que detém a terceira maior reserva, 30% inferior à reserva brasileira. Além da demanda crescente em baterias, tem aplicação principalmente em refratários, eletrodos, fundições, recarburação de aço e em usos mais populares, como material para escrever, lubrificantes, entre outros.

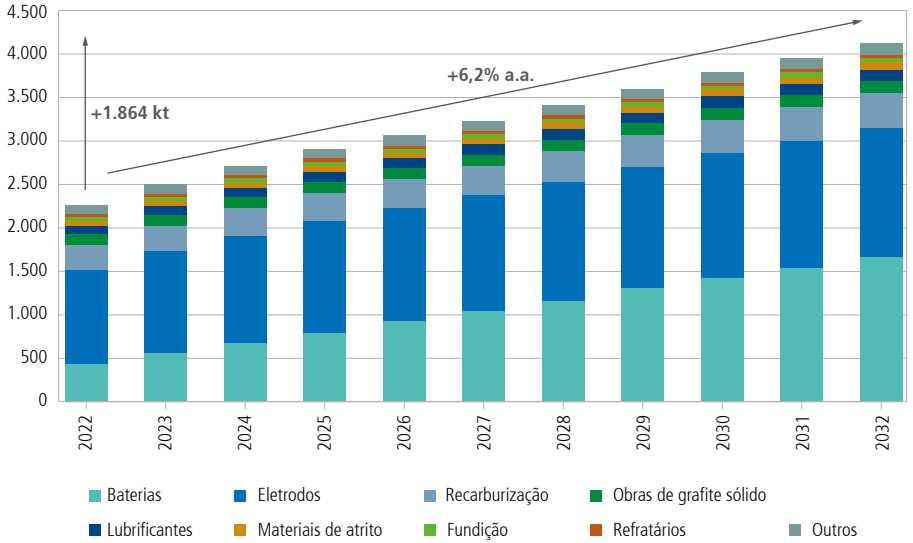
Segundo o Banco Mundial, o grafite é o principal material utilizado para armazenamento de energia, correspondendo a mais de 50% da demanda de materiais para esse fim (World Bank, 2022). Projeções de mercado elaboradas pela European Carbon and Graphite Association – ECGA (2022) indicam que a demanda por grafite apresentará forte crescimento, previsto em 6,7% ao ano na próxima década, puxada pelo crescimento exponencial da produção de baterias para veículos elétricos. Os gráficos 4 e 5 mostram a demanda global de grafite natural e sintético.

Gráfico 4. Demanda de grafite natural por aplicação (kt)



Fonte: Adaptado de Wood Mackenzie *apud* ECGA (2022, p. 5, tradução nossa).

Gráfico 5. Demanda de grafite sintético por aplicação (kt)



Fonte: Adaptado de Wood Mackenzie *apud* ECGA (2022, p. 5, tradução nossa).

De acordo com informações de empresas produtoras, os grafites sintético e de origem natural competem entre si, e os ânodos de baterias costumam ser compostos por uma combinação desses dois materiais. Enquanto o grafite natural se destaca por ter baixo custo, alta capacidade e baixo consumo de energia, com menor pegada de carbono, a vantagem do grafite sintético é o melhor desempenho quanto a velocidade de recarga e longevidade da bateria (Stibbs; Pan, 2023).

Considerando os grandes volumes necessários para atendimento da demanda futura, o mercado de grafite está sujeito aos mesmos riscos de demais materiais críticos quanto à disponibilidade. Assim, os produtores de baterias e veículos procuram garantir o fornecimento desse material de fontes com melhores práticas ASG (ambiental, social e governança) e baixos custos, a fim de garantir maior competitividade de mercado.

Conforme análises de Bennet (2023), da consultoria Fastmarkets, espera-se um déficit de grafite para ânodos de baterias fora da China nos próximos anos, considerando que as tensões geopolíticas e maiores exigências ambientais poderão dificultar a entrada da oferta chinesa nos EUA e na Europa.

Segundo dados do USGS (2023), em 2022 a China concentrou a maior parte da produção mundial de grafite (mais de 65%), sendo 76% na forma de escamas (*flake*), que é o material processado para produção do grafite esférico purificado revestido aplicado nos ânodos de baterias. Quanto à produção de grafite esférico, também há elevada concentração na China, e um movimento de construção de novas plantas em outros países, a exemplo de projetos nos EUA, Suécia, Canadá e Austrália, conforme Quadro 2.

Quadro 2. Projetos mapeados de grafite para baterias

EMPRESA	PROJETO	LOCALIZAÇÃO
Metals Australia	Lac Rainy Graphite Project	Quebec, Canadá
iTech Minerals	Campoona Graphite Project	Península de Eyre, Sul da Austrália
Leading Edge Materials	Woxna Graphite Anode Project	Gävleborg County, Suécia
Talga Resources	Vittangi Graphite Project	Norte da Suécia
Westwater Resources Inc	Kellyton Graphite Plant	Kellyton, Alabama, EUA
Northern Graphite and Graphex Technologies	Baie-Comeau Anode Material Project	Baie-Comeau, Quebec, Canadá
Syrah Technologies	Vidalia Graphite Plant	Vidalia, Los Angeles, EUA
EcoGraf Limited	Battery Anode Material (BAM) Facility	Rockingham-Kwinana, Austrália Ocidental
Renascor Resources	Siviour Graphite Project	Arno Bay e Port Adelaide, Sul da Austrália

Fonte: Elaboração própria, com base em informações divulgadas pelas empresas.

O Brasil possui a quarta maior produção de grafite natural mundial, de acordo com dados do USGS (2023), com destaque para a empresa Nacional de Grafite, que produz 70 mil toneladas anuais em três plantas localizadas em Minas Gerais, além de projeto avançado da canadense South Star para produção de 25 mil a 30 mil toneladas por ano no sul da Bahia.

Em termos de pesquisa mineral, o Brasil tem 783 autorizações de pesquisa e 130 empresas atuando nessa fase. O país é um relevante produtor de grafite para várias aplicações, reconhecido por suas grandes reservas e produção de alta pureza, no entanto ainda deverá receber os primeiros investimentos em capacidade produtiva de grafite esférico purificado para material ânodo de baterias.

Diante da importância desse elemento mineral na composição das baterias, o grafite tem despertado atenção cada vez maior de governos, sendo alvo direto de políticas públicas para desenvolvimento de capacidade de produção doméstica. Esse é o caso de projetos financiados por programas de governo na Austrália e nos EUA. E a condição do Brasil em termos de reservas e capacidade já instalada para diversos produtos de grafite proporciona ao país a oportunidade de se tornar um grande fornecedor global do material para aplicação em baterias.

Manganês

O manganês é o quarto metal mais utilizado no mundo, principalmente como agente de liga na produção de aços (90% de seu consumo), além de apresentar diversos outros usos, como em componentes de baterias, na agricultura (adubos e fertilizantes) e em químicos. É encontrado na composição de dezenas de minerais, sendo considerado abundante e de baixo custo quando comparado a outros minerais críticos como, por exemplo, o cobalto.

A utilização de manganês em baterias de veículos elétricos é capaz de reduzir o volume de componentes de maior custo ou elevar a densidade energética, por exemplo, em baterias de lítio ferro fosfato (LFP); e sua demanda deverá se elevar conforme participação das composições químicas de cátodos projetada para os próximos anos.

O mercado de manganês é consolidado quanto ao consumo em ligas metálicas, no entanto é esperado um crescimento de outros usos da ordem de 100% no período de 2022 a 2027 (CRU Group International, 2023c).

Por se tratar de mercado consolidado, majoritariamente dedicado à fabricação de ligas metálicas, a produção de minério de manganês experimentará baixo crescimento nos próximos anos, cenário bem distinto dos demais minerais para baterias abordados anteriormente.

Tabela 5. Produção de minério de manganês (kt de manganês contido)

PAÍSES	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
África do Sul	7.159	7.891	8.087	7.917	8.084	8.070	8.143	8.100
Gabão	3.702	4.330	4.616	4.261	4.880	4.810	4.810	4.810
Austrália	3.352	3.406	3.073	3.177	3.379	3.323	3.288	3.232
China	2.649	1.935	1.622	1.600	1.510	1.534	1.476	1.451
Índia	985	912	1.196	1.529	1.404	1.412	1.447	1.646
Gana	763	782	857	1.215	1.214	1.350	1.350	1.350
Brasil	979	743	735	810	846	932	1.024	1.077
Resto do mundo	2.287	2.129	2.032	1.901	2.098	2.127	2.149	2.361

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CRU Group International (2023d).

O Brasil possui grande volume de reservas de manganês, ficando entre as quatro maiores reservas do mundo (USGS, 2023). Após a saída da Vale de seus negócios de manganês e os sucessivos problemas enfrentados pela Buritirama, a Mineração Corumbaense Reunida (MCR), no Mato Grosso do Sul, atualmente subsidiária da J&F, destaca-se como a principal produtora de manganês no país, que totalizou cerca de R$ 490 milhões em produção de manganês em 2022, segundo dados do Anuário Mineral Brasileiro (interativo) da ANM (2023a). Além disso, há outros produtores, principalmente nos estados de Minas Gerais, Pará, Ceará e Mato Grosso, e operações em desenvolvimento na província de Carajás/PA e no estado de Rondônia.

Quanto à pesquisa mineral, o Brasil tem 4.100 autorizações de pesquisa de minério de manganês ou manganês e outras substâncias e 833 empresas atuando nessa fase, conforme consulta em novembro de 2023 aos dados abertos da ANM (2023b).

Apesar de o Brasil ter reservas de manganês consideradas de alto teor, não foram identificados projetos dedicados à produção de transformados de manganês aplicados ao mercado de baterias de veículos elétricos, a exemplo de projetos para produção de sulfato de manganês de alta pureza fora da China, na Austrália, em Botsuana, no Chile e no Canadá. Dessa forma, cabe examinar o potencial das reservas brasileiras de manganês para oferta desses produtos *vis-à-vis* o próprio crescimento da produção de baterias no Brasil e no mundo.

Por fim, a posição do Brasil em termos de volume de produção, reservas e potencial de novos projetos em fase de pesquisa serve de base para futuros

investimentos na produção de manganês e seus transformados como oportunidade de desenvolvimento local, aproveitando as mudanças de mercado que poderão decorrer da expansão de seu uso em baterias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A diversidade geológica, juntamente com suas vantagens em energia limpa, biodiversidade, oportunidades de desenvolvimento social e neutralidade geopolítica, posicionam o Brasil entre os principais atores da transição climática global e da produção de minerais para transição energética e seus transformados com os melhores padrões socioambientais.

O país deve aproveitar essa oportunidade de desenvolver a produção de materiais transformados para baterias, diante não só das vantagens aqui destacadas, mas também do cenário geopolítico atual, que tem resultado na imposição de restrições ao comércio de materiais principalmente entre China e EUA, no âmbito da disputa comercial entre os dois países.

O Brasil tem potencial reconhecido para expansão da produção e desenvolvimento: (i) da cadeia de lítio, incluindo o refino para fabricação de produtos químicos de lítio, sulfato, carbonato ou hidróxido de lítio; (ii) da produção de concentrado e refinados de níquel, inclusive a oferta direta de sulfato de níquel para produtores de cátodos de baterias; e (iii) de novas capacidades de produção de grafite em camadas e do grafite esférico purificado revestido aplicado nos ânodos de baterias. E, ainda, deverá ser mais bem avaliado o potencial das reservas brasileiras de manganês para oferta de produtos de alta pureza para uso em baterias.

Alguns desses elementos estão no centro da disputa entre países pelo desenvolvimento de capacidade doméstica para produção de baterias para veículos elétricos. Os EUA, por meio de seu Departamento de Defesa, entraram em acordo para apoiar com US$ 90 milhões a reabertura de uma mina de lítio, visando aumentar a produção doméstica destinada à cadeia de baterias (United States, 2023).

Por outro lado, de acordo com notícia publicada pelo Center for Strategic and International Studies (CSIS), em 20 de outubro de 2023 a China anunciou

que, a partir de 1º de dezembro de 2023, os exportadores chineses passariam a precisar de permissão para embarcar materiais de grafite sintético de alto desempenho e grafite natural em camadas e derivados (Benson; Denamiel, 2023).

Cabe ainda destacar que a diversidade geológica brasileira nos permite aproveitar também oportunidades em outros minerais e transformados de menor destaque na produção de baterias, que, no entanto, serão bastante demandados para produção de outros componentes dos veículos elétricos, a exemplo do cobre, do alumínio e das terras raras e ímãs permanentes de terras raras utilizados nos motores.

Por fim, os esforços para desenvolver as oportunidades aqui destacadas deverão contemplar maior interação dos agentes de mercado, no sentido de explorar parcerias; identificar potenciais entraves a investimentos; e orientar políticas necessárias para reduzir assimetrias quanto a condições regulatórias e de acesso a capital em comparação aos demais países que buscam avançar nessa cadeia. Nesse sentido, os passos já tomados pelo governo brasileiro para viabilizar condições mais favoráveis para financiamento a investimentos em inovação e transição climática poderão se somar a ações definidas a partir da discussão de oportunidades específicas de investimentos.

REFERÊNCIAS

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Anuário Mineral Brasileiro (interativo). *Gov.br*, Brasília, DF, 2023a. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/producao-mineral. Acesso em: 10 out. 2023.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Sistema de Cadastro Mineiro. *Gov.br*, Brasília, DF, 2023b. Disponível em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/sistema-de-cadastro-mineiro. Acesso em: 7 nov. 2023.

BENNETT, A. Graphite market outlook: five key factors to watch. *Fastmarkets*, [*s. l.*], 15 ago. 2023. Disponível em: https://www.fastmarkets.com/insights/graphite-market-outlook-five-key-factors-to-watch. Acesso em: 17 out. 2023.

BENSON, E.; DENAMIEL, T. China's new graphite restrictions. *Center for Strategic and International Studies – CSIS,* Washington, DC, 23 out. 2023. Disponível em: https://www.csis.org/analysis/chinas-new-graphite-restrictions. Acesso em: 6 nov. 2023.

CRU GROUP INTERNATIONAL. *Battery metals market outlook*. [*S.l.*]: CRU Group International, 2023a.

CRU GROUP INTERNATIONAL. *Lithium market outlook*. [*S.l.*]: CRU Group International, 2023b.

CRU GROUP INTERNATIONAL. *Manganese market outlook*. [*S.l.*]: CRU Group International, 2023c.

CRU GROUP INTERNATIONAL. *Nickel Market Outlook*. [*S.l.*]: CRU Group International, 2023d.

ECGA – EUROPEAN CARBON AND GRAPHITE ASSOCIATION. *Annual report 2022:* advancing the green deal. [*S.l.*]: ECGA, 2022. Disponível em: https://ecga.net/wp-content/uploads/2023/04/ECGA_AR2022_final.pdf. Acesso em: 18 out. 2023.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global supply chains of EV batteries.* [*S.l.*]: IEA, 2022a. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/4eb8c252-76b1-4710-8f5e-867e751c8dda/GlobalSupplyChainsofEVBatteries.pdf. Acesso em: 9 out. 2023.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *The role of critical minerals in clean energy transitions:* world energy outlook special report. [*S.l.*]: IEA, 2022b. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf. Acesso em: 9 out. 2023.

SGB-CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Brazil's geological potential for critical and strategic minerals:* insights for the low carbon transition and agriculture sector. [*S.l.*]: SGB-CPRM, 2023. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/pdac/media/ferreira_pdac2023.pdf. Acesso em: 15 mai. 2023.

STIBBS, J.; PAN, S. Synthetic versus natural grafite debate rages on: 2023 preview. *Fastmarkets*, [*S.l.*], 17 jan. 2023. Disponível em: https://www.fastmarkets.com/insights/synthetic-versus-natural-graphite-debate. Acesso em: 17 out. 2023.

UNITED STATES. U.S. Department of Defense. DoD enters agreement to expand domestic lithium mining for U.S. battery supply chains. *U.S. Department of Defense*, Washington, DC, 12 set. 2023. Disponível em: https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3522657/dod-enters-agreement-to-expand-domestic-lithium-mining-for-us-battery-supply-ch/. Acesso em: 29 jan. 2024.

USGS – U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral commodity summaries 2023*. Virginia: USGS, 2023.

WORLD BANK. *Minerals for climate action*: the mineral intensity of the clean energy transition. World Bank, Washington, DC, 2022.

4

O papel dos biocombustíveis na transição energética da mobilidade

Artur Yabe Milanez
Diego Duque Guimarães
Marcelo Machado da Silva
Vinícius Toshio Pereira Nakano*

* Respectivamente, administrador, economistas e estagiário do Departamento do Complexo Agroalimentar e de Biocombustíveis da Área de Desenvolvimento Produtivo e Inovação do BNDES.

INTRODUÇÃO

É crescente a preocupação mundial com a descarbonização, devido a seus efeitos no meio ambiente. Em 2021, a Conferência do Clima das Nações Unidas, realizada em Glasgow, Escócia, se encerrou com o compromisso de manter o limite de aquecimento global em 1,5°C, além de registrar uma série de compromissos independentes que contribuirão para a redução das emissões de GEE.

O setor de transportes é responsável por parte significativa dessas emissões, por ter seguido um modelo energético global extremamente dependente do uso de recursos naturais não renováveis, notadamente o petróleo. Dessa forma, a preocupação com a descarbonização vem se consubstanciando em estímulos para a redução do uso de combustíveis fósseis e sua substituição por outras fontes renováveis, o que tem acontecido gradualmente, com destaque para os biocombustíveis.

Os biocombustíveis desempenham papel essencial na transformação da matriz energética atual. Genericamente, o termo "biocombustíveis" refere-se a produtos de baixa emissão, de origem animal ou vegetal, renováveis e sustentáveis, destacando-se o etanol e o *biodiesel*, já utilizados em diversos países.

O Brasil sobressai na produção de biocombustível por ter sido pioneiro na implantação do etanol como combustível, ainda na década de 1930, primeiro como aditivo à gasolina (anidro) e, a partir de meados dos anos 1970, em razão do advento do Proálcool, como combustível exclusivo em motores (hidratado) (Nogueira, 2008). Esse histórico permitiu a criação de uma cadeia produtiva que se mostrou bastante inovadora ao longo das décadas. Porém a urgência que o tema da descarbonização vem alcançando nos últimos anos, com a entrada de novos mercados demandando novos produtos, como os setores de aviação e navegação, permite vislumbrar que um novo período de expansão e estruturação aparenta estar se iniciando no segmento de biocombustíveis. Assim, é importante que se utilize o papel de liderança que o país já tem na produção do etanol para manter sua posição e aproveitar as novas oportunidades para expansão e crescimento de nossa economia.

Neste artigo, são exploradas as diversas oportunidades que se apresentam ao mercado de biocombustíveis nos próximos anos. Na primeira parte, há um panorama da situação atual dos variados produtos desse mercado no mundo e das expectativas existentes para os próximos anos. A segunda parte foca na situação brasileira, com especial atenção ao potencial de expansão existente na produção para conseguir atender, seja por disponibilidade de recursos, seja pelo aumento de produtividade, ao aumento de demanda esperado. A terceira parte inicia mostrando o potencial de descarbonização existente no biocombustível gerado a partir da cana-de-açúcar e discute a articulação institucional necessária tanto de políticas públicas quanto de criação de novas instituições que divulguem e promovam a adoção do biocombustível a partir da cana-de-açúcar em outros países. Finalmente, o texto apresenta uma breve conclusão.

O MERCADO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

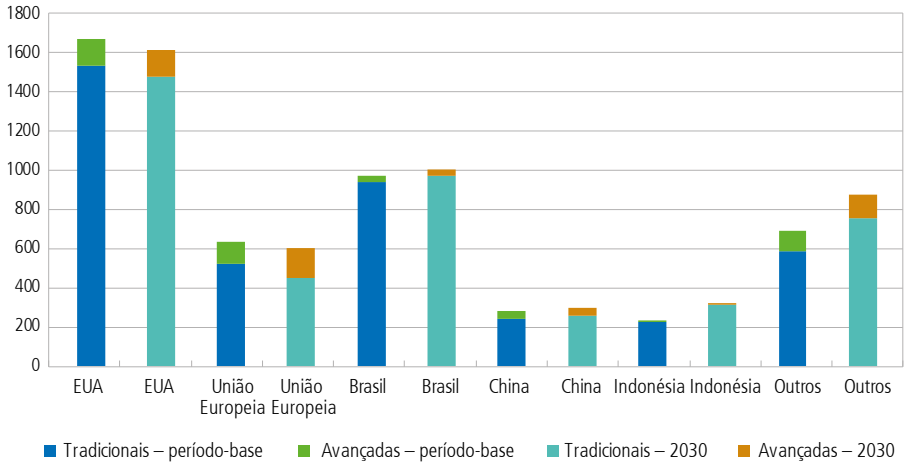
O mercado de biocombustíveis está relacionado à demanda das atividades de transporte, ao preço do petróleo e a políticas públicas que estimulem seu consumo. No Brasil, o principal produto em volume no mercado é o etanol, primeiro a ser introduzido como combustível e adicionado à gasolina em diversos países. Nos próximos anos, é esperado elevado crescimento do *biodiesel*, atualmente segundo principal produto do mercado de biocombustíveis, em razão de novos incentivos que estão sendo implementados em diversos países para estimular seu uso. Esses incentivos também são direcionados ao *diesel* verde, que, diferentemente do *biodiesel*, pode ser adicionado em até 100% ao *diesel* fóssil.[1]

Os principais produtores globais de biocombustíveis são os Estados Unidos da América (EUA) e o Brasil, destacando-se em ambos os produtos. A União Europeia, terceiro maior produtor, concentra-se mais em *biodiesel*, com

1 O *diesel* verde é produzido a partir do processamento de óleos vegetais ou gorduras animais que, por conta de sua composição semelhante ao óleo *diesel* de origem fóssil, pode ser utilizado puro, sem nenhum prejuízo aos motores de ciclo *diesel*. Já o *biodiesel* é obtido a partir da reação de óleos vegetais ou gorduras animais com um álcool, podendo ser adicionado ao óleo *diesel* de origem fóssil em proporções limitadas (Milanez *et al.*, 2022).

China e Indonésia também representando parcelas significativas, conforme mostra o Gráfico 1.

Gráfico 1. Produção mundial de biocombustíveis a partir de matérias-primas tradicionais e avançadas (petajoules)



Fonte: Adaptado de OECD e FAO (2021, p. 207, tradução nossa).
Nota: Matérias-primas tradicionais são aqui definidas como provindas da agricultura e forrageiras. Petajoules = 10^{15} joules.

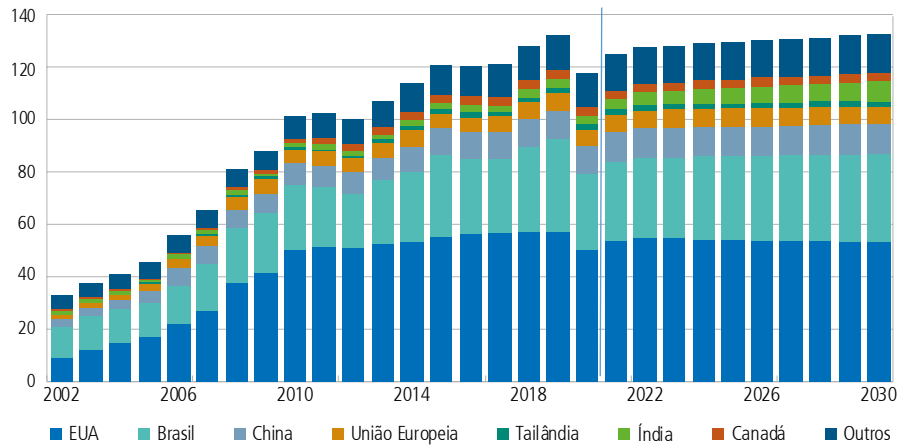
Segundo estimativa da Organização Internacional do Açúcar (OIA), a produção global de etanol em 2022 foi de 109,4 bilhões de litros, volume 2,19% maior que no ano anterior. Estados Unidos e Brasil concentraram a maior parte da produção mundial, produzindo, em média, 59 bilhões e 34,5 bilhões de litros por ano, respectivamente, nos últimos três anos. Ambos os países são referência em produtividade na produção a partir do milho (EUA) e da cana de açúcar (Brasil).

Com relação à demanda internacional de etanol, segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (Unica), atualmente mais de sessenta países já adotam uma mistura de biocombustível para tornar a gasolina mais "verde", visando reduzir o impacto ambiental do setor de transporte. A Índia pretende atingir 20% na mistura de etanol à gasolina até 2025, cinco anos antes da meta anterior. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), até 2030 o setor de transporte precisa triplicar o uso de biocombustíveis como forma de reduzir as emissões de carbono e, para isso, propõe uma mistura padrão de 10% de etanol à gasolina.

Fora as iniciativas mais tradicionais e conhecidas de descarbonização do transporte no modo rodoviário, vale mencionar iniciativa recente da Raízen,[2] que anunciou um acordo de cooperação com a empresa finlandesa Wartsila, líder em motores de propulsão marítimos, para criação de um programa de pesquisas para o desenvolvimento de motores de embarcações movidos a etanol (Raízen, [2023]). A indústria do transporte marítimo estabeleceu metas para reduzir as emissões de carbono em 40% até 2030 e 70% até 2050, podendo aumentar ainda mais a demanda por esse combustível nos próximos anos. Atualmente, apenas poucos navios contam com motores que possam funcionar com algum combustível que não seja à base de petróleo.

Embora esses novos usos possam aumentar a demanda por etanol de primeira geração em longo prazo, para os próximos anos a expectativa é de crescimento lento na demanda, como é possível visualizar no Gráfico 2. Mesmo que em países como Índia e Indonésia a demanda tenda a crescer, em mercados importantes como a União Europeia a demanda tende a diminuir, devido a um declínio nos transportes rodoviários e maior utilização de carros elétricos.

Gráfico 2. Evolução do consumo global de etanol (bilhões de litros)

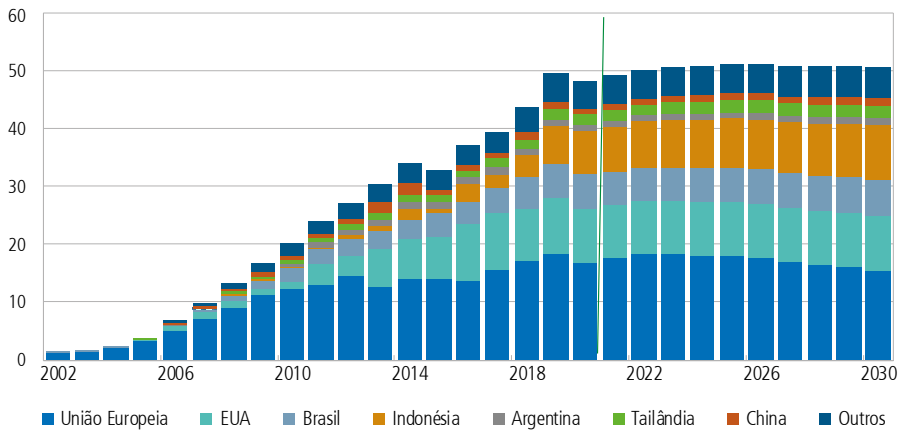


Fonte: Adaptado de OECD e FAO (2021, p. 208, tradução nossa).

2 A Raízen é o maior grupo produtor de etanol do Brasil, atuando desde a produção da cana-de-açúcar até a distribuição do combustível. Tendo como maiores controladoras a Shell e a Cosan, vem investindo bastante em inovação, dominando atualmente a tecnologia do etanol de segunda geração (E2G).

Movimento semelhante vem acontecendo no mercado de *biodiesel*, que cresceu significativamente nos últimos anos e apresenta perspectiva de crescimento lento nos próximos anos. Nesse mercado, a Europa (a partir do óleo de canola) e a Indonésia (a partir do óleo de palma) despontam com protagonismo maior, o que explica a importância de ambos no consumo de *biodiesel* apresentada no Gráfico 3.

Gráfico 3. Evolução do consumo global de *biodiesel* (bilhões de litros)



Fonte: Adaptado de OECD e FAO (2021, p. 208, tradução nossa).

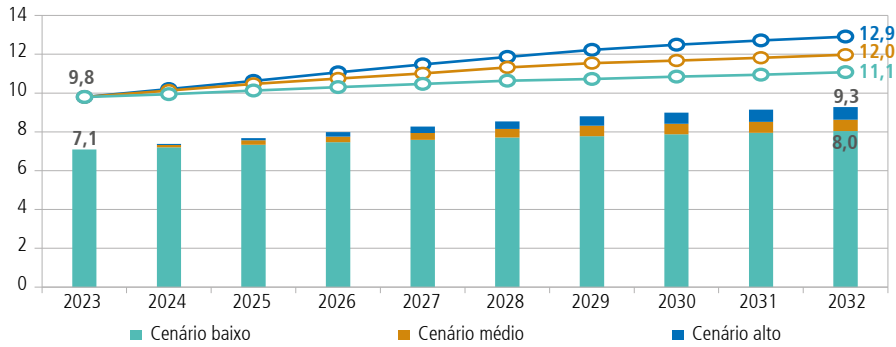
Outros biocombustíveis têm potencial para serem utilizados no mercado no futuro próximo, mesmo que em menor escala, por já terem tecnologia de produção desenvolvida e grande potencial de descarbonização devido ao fato de utilizarem subprodutos da produção do etanol. O biometano, substituto do gás natural já produzido por usinas no estado da arte, é um dos principais exemplos. Ele é obtido a partir da purificação do biogás oriundo da vinhaça residual e pellets de lignina, resíduos não fermentáveis da produção de etanol de segunda geração (E2G), além de dejetos de animais e fontes não agropecuárias, como os resíduos sólidos urbanos.

Embora o biogás possa ter diversas aplicações, inclusive na produção de energia elétrica, há expectativa de que o biometano venha a ser amplamente utilizado pelas usinas como combustível para a própria frota de tratores e caminhões, substituindo assim o *diesel*. O Brasil tem atualmente seis plantas de produção de biometano autorizadas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e outras 11 plantas em processo de autorização para iniciar a produção. A expectativa é de que 81 novas usinas sejam instaladas

no Brasil até 2029, o que poderá levar a produção a cerca de 10% de todo o gás natural consumido atualmente no país.

O Gráfico 4, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), mostra que existe um potencial de aumento de até 82% na produção de biogás no Brasil nos próximos dez anos, considerando um comparativo de cenários apenas com as usinas dos grupos mais eficientes e outro com o potencial total do país.

Gráfico 4. Potencial da produção de biogás no Brasil (bilhões de Nm³)



Fonte: Adaptado de EPE (2022, p. 15).
Nota: No gráfico, as colunas se referem à análise do potencial relativo das usinas dos grupos mais eficientes economicamente do setor, e as linhas, ao potencial total.

Recentemente, foi aprovada pelo Governo Federal a Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024 (Brasil, 2024a), apelidada de Combustível do Futuro, um conjunto de iniciativas que visam promover a mobilidade sustentável de baixo carbono, com o objetivo de adequar a economia brasileira ao atingimento das metas internacionais de redução das emissões de GEE. Entre as principais propostas, estão o incentivo à produção e ao uso do combustível sustentável de aviação (SAF), pelo aumento gradual da mistura de SAF ao querosene de aviação fóssil, e o Programa Nacional do Diesel Verde (PNDV), que também promoverá uma incorporação gradativa do *diesel* verde à matriz de combustíveis do país, contribuindo para a redução da dependência externa de *diesel* derivado de petróleo.

O papel do setor de aviação na demanda por biocombustível não pode ser subestimado, embora os SAFs possam ser definidos como combustíveis não fósseis produzidos de forma sustentável, pois podem ser produzidos de fontes não renováveis, como resíduos de materiais plásticos ou pneus, e as principais

matérias-primas têm origem animal ou vegetal, tais como óleos e gorduras e outros subprodutos da produção agroindustrial ou de resíduos sólidos urbanos.

No Brasil, a ANP regulamentou as rotas autorizadas a serem utilizadas e os limites de mistura permitidos, conforme o Quadro 1.

Quadro 1. Rotas e mistura de biocombustíveis autorizados pela ANP

ROTA	PRINCIPAIS MATÉRIAS-PRIMAS	MISTURA
HEFA	Óleos naturais (animais e vegetais)	50%
Fischer-Tropsch (FT)	Biomassas – resíduos agrícolas e sólidos urbanos	50%
HFS–SIP	Açúcares fermentados	10%
Alcohol to Jet (ATJ)	Álcoois, como etanol	50%

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Brasil (2019).

O Brasil está bem posicionado para viabilizar o escalonamento industrial de ambas as rotas tecnológicas, tanto pela capacidade de ampliação da oferta de óleo vegetal, principalmente de soja, quanto pela maior oferta de etanol, como será detalhado neste artigo posteriormente. Com relação à soja, segundo estimativas da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (Abiove), o Brasil processou, em 2022, pouco mais de 30% da safra de soja (como óleo ou farelo), o que demonstra elevado potencial para ampliar os investimentos na transformação industrial do grão.

Adicionalmente, o Brasil apresenta grande disponibilidade de resíduos da produção agroindustrial que podem ser usados como matéria-prima para produção de SAF. Um estudo da Roundtable on Sustainable Biomaterials, realizado em conjunto com a Agroicone (RSB; Agroicone, 2021), estimou que o Brasil tem potencial para produzir até 9 bilhões de litros de SAFs com base em seus resíduos, um volume significativo, considerando que o máximo de querosene de aviação já demandado no país foi de 7,4 bilhões de litros, em 2014. Foram identificados como matérias-primas potenciais bagaço e palha de cana-de-açúcar, resíduos de madeira, óleo de cozinha usado, sebo bovino e gases de aciaria. Bagaço e palha de cana-de-açúcar podem ser processados pelas rotas FT e ATJ, sendo que a segunda é mais eficiente, produzindo quantidade maior de SAF. A oferta de matéria-prima foi estimada conforme o Quadro 2.

Quadro 2. Resíduos e potencial máximo de produção de SAFs no Brasil

MATÉRIA-PRIMA	RESÍDUOS ESTIMADOS	VOLUME DE SAF (BILHÕES DE LITROS)
Bagaço e palha de cana-de-açúcar	61,0 milhões de toneladas	6,48
Resíduos de madeira	21,0 milhões de toneladas	1,9
Sebo bovino	0,53 milhão de toneladas	0,36
Óleo de cozinha usado	0,21 milhão de toneladas	0,11
Gases de aciaria	2,823 milhões de metros cúbicos normais	0,23

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de RSB e Agroicone (2021).

Destaca-se que apenas com os resíduos de cana-de-açúcar e de madeira, utilizando a rota ATJ, seria possível ofertar, respectivamente, 90% e 30% da demanda total por combustíveis de aviação no Brasil. Tendo em vista que as misturas autorizadas de SAF são de, no máximo, 50%, o volume potencial de SAFs poderia suprir toda a demanda interna por biocombustível.

Os SAFs podem contribuir para uma significativa redução na emissão de GEE. Calcula-se que os SAFs derivados de biomassa, resíduos e outras matérias-primas podem reduzir em até 94% as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida dos combustíveis (RSB; Agroicone, 2021). Existe uma demanda internacional por SAFs decorrente da necessidade desses combustíveis para o atingimento das metas acordadas por diversos países e companhias aéreas.

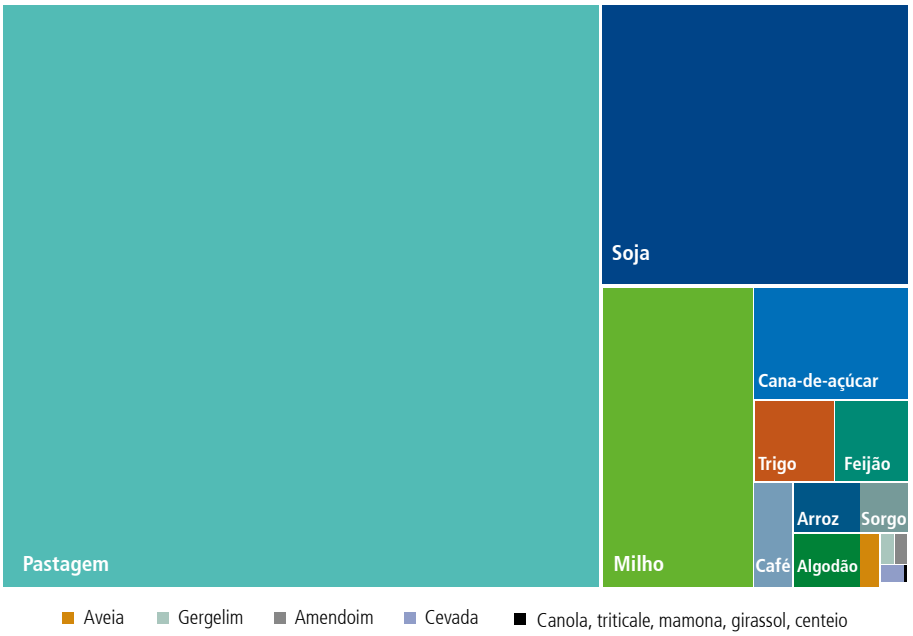
CAPACIDADE PRODUTIVA BRASILEIRA E POTENCIAL DE CRESCIMENTO

Segundo relatório consolidado do Observatório da Cana, na safra 2021/2022 o Brasil produziu 32,5 bilhões de litros de etanol, o que corresponde a aproximadamente 30% da produção global. Essa posição de destaque no mercado coloca o país como um dos principais *players* do setor e contribui para a economia brasileira, gerando empregos, divisas e impulsionando o

desenvolvimento nacional. Segundo o NovaCana (c2024), há 100 grupos no país com capacidade de moagem superior a 1 milhão de t/ano.

No entanto, a área utilizada pelos produtores nacionais para alcançar essa produção significativa representa apenas 3,3% da área total dedicada à atividade rural no país (8,3 de 248,6 milhões de hectares), segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Considerando que 66% da área produtiva é composta de pastagens, sendo que, destas, 34 milhões de hectares são áreas degradadas, não seria complicado para o Brasil aumentar significativamente a área plantada de cana para atender a um crescimento acelerado de demanda nos próximos anos, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1. Área utilizada pela agropecuária – safra 2021/2022



Fonte: Elaboração própria, com base em dados da Conab ([202-]) – área plantada da safra 2021/2022 – e do MapBiomas (2023) – área de pastagem em 2022.

Porém o aumento da produção não deverá vir unicamente do aumento da área de plantio; novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas e aplicadas tanto na cultura da cana quanto na produção de biocombustíveis, as quais podem permitir aumento significativo na produtividade.

As principais tecnologias com alto potencial disruptivo na produção de cana-de-açúcar são as sementes de cana e as tecnologias de informação e comunicação (TIC). As sementes estão sendo desenvolvidas pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), e possibilitarão a expansão da produção e o aumento da produtividade dos canaviais brasileiros por tornar desnecessária a reserva de áreas para viveiros de mudas. De acordo com dados da Conab, isso representaria a liberação de cerca de 3% da área cultivada de cana. O projeto do plantio a partir de sementes já ultrapassou a etapa de bancada de laboratório e implantou áreas de cultivo da semente em usinas experimentais em 2022, podendo vir a mercado em breve.

Já as TIC vêm sendo implantadas aos poucos nas fazendas, devido à pouca cobertura de internet banda larga nas áreas rurais brasileiras. Entretanto, dado que os equipamentos atuais já possuem essa tecnologia embarcada nas máquinas de plantio e colheita, que permitem melhor aproveitamento das ferramentas de agricultura de precisão com ganhos de eficiência no consumo de *diesel* (menor emissão de carbono) e no uso de insumos, o retorno do investimento em expansão do sinal vem aumentando, tendendo a ampliar a área de cobertura nos próximos anos.

Em relação às tecnologias de processamento, duas delas se destacam: a produção de E2G e a de biogás, que utilizam subprodutos da produção do etanol, bagaço e palha, principalmente. Essa característica de reaproveitar resíduos agroindustriais permite que esses produtos tenham significativo potencial de descarbonização, o que deverá aumentar sua demanda no futuro. Além disso, esse reaproveitamento gera, ao menos no caso do E2G, um valor agregado mais elevado em seu preço. O E2G já é uma realidade; a Raízen conta com duas unidades operando e tem planos de atingir vinte unidades até 2032, com expectativa de chegar a um custo de produção inferior ao do etanol de primeira geração e potencial de aumentar em até 50% o volume de biocombustível produzido por hectare plantado.

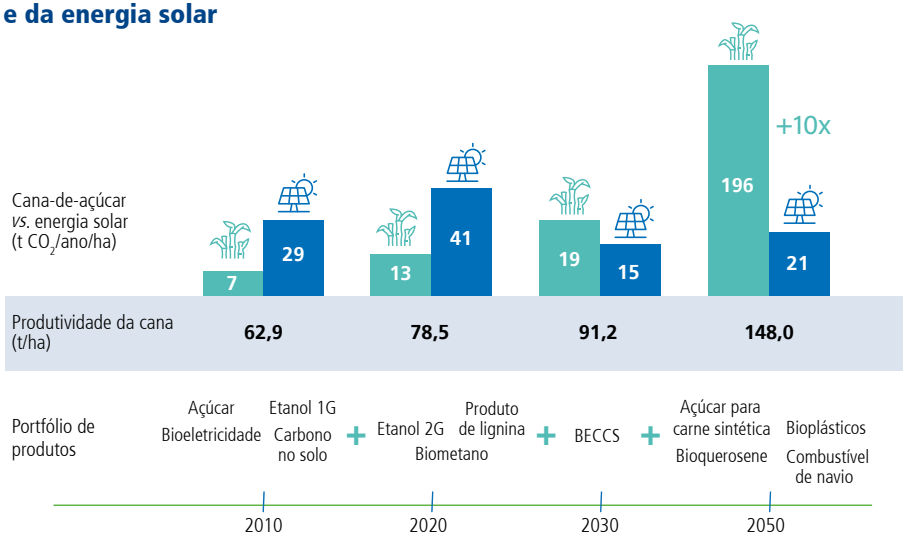
O McKinsey Global Institute (2020) estimou que em 2050 a produtividade da cana-de-açúcar pode chegar a 148 toneldas por hectare, o que, comparado às atuais 80 toneladas por hectare, significaria um crescimento médio da produtividade de aproximadamente 2% ao ano num período de trinta anos.

Além da cana-de-açúcar, também cabe destacar o importante crescimento do uso do milho para produção de etanol, sobretudo nos estados com elevada disponibilidade do chamado milho-safrinha, cuja produção é normalmente feita em consórcio com outras culturas. Diante desse cenário de rápido aumento da produtividade e da área disponível no Brasil para expansão da produção, a oferta não tende a ser uma barreira de longo prazo ao crescimento da demanda por biocombustíveis derivados da cana-de-açúcar, incluindo a produção por meio de outros produtos agropecuários.

VISÃO DE FUTURO PARA AS POLÍTICAS: AMPLIAÇÃO DO MERCADO DOMÉSTICO E INSERÇÃO INTERNACIONAL

Segundo Kovarsky e outros (2022), o potencial de descarbonização pelo aumento da produtividade agrícola e expansão do uso dos biocombustíveis é significativo, podendo atingir em 2050 uma eficiência por hectare dez vezes maior do que a geração fotovoltaica (196 t CO_2/ha *versus* 21 t CO_2/ha).

Figura 2. Comparativo dos potenciais de descarbonização da cana-de-açúcar e da energia solar



Fonte: Adaptado de Kovarsky e outros (2022).

Para realizar todo esse potencial, será necessária uma combinação de políticas públicas que estimulem o consumo e o desenvolvimento tecnológico do setor. Isso implica uma articulação político-institucional dos atores interessados, com o objetivo de fomentar o crescimento do mercado doméstico e o desenvolvimento de tecnologias no país, aumentando o protagonismo do Brasil na nova economia baseada em biocombustíveis.

Nesse sentido, Silva, Bomtempo e Alves (2019) apresentam um estudo sobre o sistema setorial de inovação brasileiro do mercado de biocombustíveis, que, buscando encontrar as cinco principais oportunidades de inovação do setor, concluiu que a atuação institucional para a definição de políticas públicas é fundamental em cogeração, biogás e novos produtos, sendo as duas últimas as que apresentam maior potencial de transformar a indústria, embora tenham também as barreiras mais fortes à inovação.

É importante destacar que – no mundo contemporâneo de economias globalmente conectadas e poucos produtores globais que, após suas escolhas tecnológicas, incorrem num alto custo de oportunidade para mudá-las – esse trabalho de articulação institucional precisa também ser feito em nível internacional. Assim, já foram criadas duas instituições com apoio brasileiro para trabalhar pela expansão do uso dos biocombustíveis no mundo.

A primeira foi a Plataforma para o Biofuturo, lançada em 2016 para liderar ações globais que acelerem o desenvolvimento, a expansão e a implantação de alternativas sustentáveis de base biológica aos combustíveis, produtos químicos e materiais de origem fóssil. Atualmente é presidida pelo Departamento de Energia dos EUA e tem sua governança atrelada à Agência Internacional de Energia, reunindo 22 países em um fórum para diálogo político e colaboração entre os principais países, organizações, o meio acadêmico e o setor privado. Tem, entre seus objetivos estratégicos, o papel de promover: consenso sobre sustentabilidade, disponibilidade e governança da biomassa; as melhores práticas políticas e convergência; mecanismos de financiamento; e cooperação em políticas, regulamentações e tecnologias.

Mais recentemente, em julho de 2023, na reunião da Cúpula do G20, foi lançada a Aliança Global pelos Biocombustíveis, presidida pela Índia, que desenvolveu um ambicioso programa de biocombustíveis. Criada conjuntamente por Índia, Brasil e EUA, essa aliança reúne 19 países e 12 organizações internacionais,

tendo como objetivo promover colaboração e cooperação internacional para a aceitação e a utilização de biocombustíveis.

O protagonismo brasileiro nos biocombustíveis foi objeto do relatório *Renewables 2023*, elaborado pela Agência Internacional de Energia (AIE), que destaca o Brasil, em conjunto com outras economias emergentes, na liderança do crescimento da oferta de biocombustíveis. O documento aponta que o país, isoladamente, contribuirá com 40% da expansão global de biocombustíveis até 2028, respaldado por políticas robustas nesse setor (Brasil, 2024b).

CONCLUSÃO

A demanda de biocombustíveis tende a crescer significativamente nas próximas décadas devido à necessidade dos diversos setores de transporte de se adequarem aos limites de emissão de dióxido de carbono (CO_2). Mesmo que atualmente mais de sessenta países já adotem uma mistura de biocombustível à gasolina e ao *diesel*, o IPCC estima que, até 2030, o setor de transporte precisará triplicar o uso de biocombustíveis como forma de reduzir as emissões de carbono. Esse mesmo processo é esperado para diversos outros modais de transporte, como navegação e aviação, que ainda estão nos estágios iniciais de adoção.

O aumento de produção e eficiência tanto da cana-de-açúcar quanto do processo industrial pode levar o biocombustível a ser mais eficiente para a descarbonização do que a geração fotovoltaica já na próxima década, podendo chegar a ser dez vezes mais eficiente até 2050.

O Brasil já tem posição de destaque na produção tanto de etanol quanto de *biodiesel*, não apenas pelo volume, mas pela liderança na tecnologia desenvolvida na produção de cana-de-açúcar, a mais eficiente do mundo, e em seu processamento, com aproveitamento dos subprodutos gerados no processo produtivo. Essa liderança foi obtida pela adoção, ao longo de décadas, de políticas de estímulo ao consumo de etanol no setor rodoviário e de desenvolvimento de tecnologias produtivas, como o E2G, que atraíram investidores inovativos e de grande porte para o mercado.

Como o aumento esperado da demanda para as próximas décadas virá principalmente dos novos biocombustíveis, o país precisará de um novo ciclo de políticas de apoio a esses investimentos que permitam o pleno aproveitamento das vantagens

competitivas já conquistadas no período anterior. O SAF se destaca, atualmente, como a próxima oportunidade a ser explorada, juntamente com o biometano e o *diesel* verde. A criação de parcerias internacionais e a participação de representantes brasileiros nessas iniciativas de fomento ao setor, assim como o programa Combustível do Futuro, são ações recentes que mostram a disposição do país em manter sua posição de destaque e em contribuir para a ampliação do mercado internacional de biocombustíveis, que constituem uma alternativa de rápida implementação para o atendimento das metas de descarbonização no Brasil e no mundo.

REFERÊNCIAS

BRASIL. *Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024*. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono [...]. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2024a. Disponível em: https:// www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14993-8- outubro-2024-796443-publicacaooriginal-173317-pl.html. Acesso em: 5 dez. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Relatório da AIE reforça o protagonismo do Brasil no cenário internacional*. Ministério de Minas e Energia. Brasília, DF, 12 jan. 2024b. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/relatorio-da-aie-reforca-o-protagonismo-do-brasil-no-cenario-internacional. Acesso em: 19 mar. 2024.

BRASIL. Resolução nº 778, de 5 de abril de 2019. Estabelece as especificações do querosene de aviação [...]. *Diário Oficial da União*: edição 67, seção 1, Brasília, DF, p. 40, 8 abr. 2019. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/70491356/do1-2019-04-08-resolucao-n-778-de-5-de-abril-de-2019-70491250. Acesso em: 19 mar. 2024.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safras. *Conab*, Brasília, DF, [202-]. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras?view=default. Acesso em: 16 jan. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Cenários de oferta de etanol e demanda de ciclo Otto 2023-2032*. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-255/topico-653/NT-EPE-DPG-SDB-2022-06_Cenarios_de_oferta_de_etanol_2032.pdf. Acesso em: 22 jan. 2024.

KOVARSKY, P. *et al.* Como os países tropicais podem acelerar seu protagonismo na economia net zero. *MIT Sloan Management Review,* Cambridge, v. 4, n. 13, p. 50-57, 2022.

MAPBIOMAS BRASIL. Mapas e Dados. MapBiomas Brasil, [*s. l.*], 2023. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/08/TABELA-GERAL-MAPBIOMAS-COL8.0-BIOMASxESTADOS-1.xlsx. Acesso em: 16 jan. 2024.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. *The Bio Revolution*: Innovations transforming economies, societies, and our lives. McKinsey Global Institute, [*s. l.*], 2020. Disponível em: https://www.mckinsey.com/industries/life-sciences/our-insights/the-bio-revolution-innovations-transforming-economies-societies-and-our-lives. Acesso em: 20 mar. 2024.

MILANEZ, Artur Yabe *et al*. *Biodiesel* e *diesel* verde no Brasil: panorama recente e perspectivas. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, set. 2022, p. [41]-71. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22585/1/PRArt215696_Biodiesel%20e%20diesel%20verde%20no%20Brasil.pdf. Acesso em: 20 mar. 2024.

NOGUEIRA, L. A. H. *Bioetanol de cana-de-açúcar*: energia para o desenvolvimento sustentável. BNDES e CGEE. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

NOVACANA. Ranking das usinas do Brasil por capacidade de moagem. *NovaCana*, [*s.l.*], c2024. Disponível em: https://www.novacana.com/usinas_brasil/ranking/moagem. Acesso em: 20 mar. 2024.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT; FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030*. Paris: OECD Publishing, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1787/19428846-en. Acesso em: 20 mar. 2024.

RAÍZEN. Raízen e Wärtsilä assinam acordo para acelerar a sustentabilidade no setor marítimo com navios movidos a etanol. Raízen, [*s.l.*], [2023]. Disponível em: https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-e-waertsilae-assinam-acordo-para-acelerar-a-sustentabilidade-no-setor-maritimo-com-navios-movidos-a-etanol. Acesso em: 19 mar. 2024.

RSB – Roundtable on Sustainable Biomaterials; AGROICONE. *Disponibilidade de matéria-prima para combustível de aviação no Brasil*: desafios e oportunidades – relatório 2021. Geneva: RSB, 2021. Disponível em: https://rsb.org/wp-content/uploads/2021/10/RSB-jetfuel-saf-factsheets_versao_portugues_compactado.pdf. Acesso em: 15 jan. 2024.

SILVA, D. D. F. S.; BOMTEMPO, J. V.; ALVES, F. C. Innovation opportunities in the Brazilian sugar-energy sector. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 218, p. 871-879, 2019.

5

Os ônibus elétricos e a descarbonização da mobilidade urbana

Filipe de Oliveira Souza
Clarissa Taquette Vaz*

* Respectivamente, arquiteto e engenheira do Departamento de Mobilidade Urbana e Logística da Área de Infraestrutura do BNDES.

INTRODUÇÃO

Inundações, deslizamentos de terra, avanço do nível do mar, ciclones, altas temperaturas, secas e incêndios são exemplos das ameaças que o aquecimento global e os eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes impõem à atividade econômica e à rotina do cidadão. Para mitigar esses riscos, são necessárias ações para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e promover a adaptação às mudanças climáticas. No senso comum, a associação entre poluição causada pelo trânsito e efeito estufa é automática. Logo, a possibilidade cada vez mais tangível de uso em grande escala de veículos elétricos parece uma excelente solução, que combina eficiência climática com alta tecnologia, conforto e qualidade para o usuário.

O objetivo deste artigo é fornecer uma visão geral sobre os ônibus elétricos, sua importância como política de investimento e seu papel na descarbonização da mobilidade urbana. Para isso, o texto está organizado em quatro seções. A primeira é uma introdução ao tema. A segunda seção trata da descarbonização da mobilidade urbana, chamando atenção para a sobrevalorização do plano de eletrificação dos transportes e a subestimação da estratégia de priorização do transporte público em relação ao transporte individual. A terceira apresenta um panorama sobre os ônibus elétricos: o mercado mundial, os benefícios, os desafios, o potencial brasileiro e as ações do BNDES. A quarta seção é uma conclusão, com sugestões de caminhos para a implementação dos ônibus elétricos.

A DESCARBONIZAÇÃO DA MOBILIDADE URBANA

A mobilidade urbana no contexto das mudanças climáticas

O Acordo de Paris, adotado em 2015 como parte da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), é atualmente o principal pacto global para a descarbonização. Os países signatários se

comprometeram a limitar o aumento da temperatura média global a 2ºC acima dos níveis pré-industriais, com esforços para não ultrapassar 1,5ºC. Para atingir esse objetivo, o Brasil estabeleceu a meta de reduzir suas próprias emissões de GEE em 48,4% até 2025 e em 53,1% até 2030, em relação ao patamar de emissões de 2005 (Federative Republic of Brazil, 2023). A meta se refere a uma significativa redução de 1.320 $MtCO_2e$, perante as 2.319 $MtCO_2e$ emitidas em 2022, segundo cálculos do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (Seeg, c2024).

Tabela 1. Emissões brasileiras de GEE em 2022

SETOR	$MtCO_2e$	PARTICIPAÇÃO (%)
Mudança de uso da terra e florestas	1.120	48
Agropecuária	617	27
Processos industriais	91	4
Resíduos	78	3
Energia	412	18
Transporte	217	9
Outros subsetores de energia	196	8
Total	**2.319**	**100**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do Seeg (c2024).

Os maiores contribuintes para as emissões brasileiras são os setores de "mudança de uso da terra e florestas" e "agropecuária", responsáveis por 75% do total. A atividade dos transportes responde por 9% (ver Tabela 1). A parcela exclusiva dos ônibus pode ser inferida, grosso modo, a partir de duas publicações. O *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários* (Brasil, 2014), apesar de muito defasado, mostra que os ônibus urbanos participam com aproximadamente 8,6% das emissões do modo rodoviário (ver Tabela 2). Já o *Balanço Energético Nacional* (EPE, 2022) informa que o modo rodoviário corresponde a quase todo o consumo energético do setor de transportes (94%), que ainda contempla as modalidades aérea, ferroviária e hidroviária. Considerando que todas as emissões de transporte sejam hipoteticamente alocadas ao modo rodoviário para efeito de simplificação, pode-se concluir que os ônibus em operação no transporte público urbano representam não mais que 0,8% das emissões de GEE do Brasil, cerca de 18 $MtCO_2e$.

Tabela 2. Participação nas emissões de CO_2 de escapamento por veículo rodoviário

VEÍCULOS RODOVIÁRIOS	PARTICIPAÇÃO (%)
Caminhões	39,7
Automóveis	28,3
Comerciais leves	11,5
Motocicletas	10,7
Ônibus urbanos	8,6
Ônibus rodoviários	1,3
Total	**100,0**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Brasil (2014).

Diferentemente do que se pode imaginar, os dados mostram pouca relevância relativa do transporte, sobretudo dos ônibus, perante o grande desafio climático brasileiro. Mesmo na estratificação setorial, nota-se o maior impacto do transporte de carga e do transporte individual privado. Como se verá adiante neste texto, para uma maior efetividade, é necessária uma abordagem integrada para toda a mobilidade. A estratégia passa por estímulo ao uso de modos sustentáveis, como o transporte coletivo e o não motorizado. Os ônibus elétricos, em razão de suas amplas externalidades, desempenham um papel importante, para além dos benefícios climáticos.

A estratégia para descarbonização da mobilidade urbana

Se por um lado os ônibus são pouco significativos no total de emissões do país, por outro, eles representam 86% do transporte público coletivo (ANTP, 2020). Alguns benefícios dessa modalidade são inclusão social e redução do consumo de energia, dos acidentes e dos congestionamentos. Apesar disso, os dados mostram que ano após ano o transporte coletivo perde usuários para modos privados como carros e motocicletas (ANTP, 2020), antes mesmo do impacto da pandemia de Covid-19. A tendência só será revertida mediante investimento na qualidade da prestação do serviço. Portanto, a oferta de ônibus elétricos deve ser celebrada, antes de tudo, como a promoção do transporte coletivo.

A redução dos efeitos negativos dos sistemas de transporte normalmente é alcançada com três medidas: diminuição de viagens desnecessárias, substituição modal ou melhoria tecnológica. Quedas bruscas e inesperadas na quantidade de viagens só acontecem em casos extraordinários, como ocorreu durante a pandemia. Portanto, as medidas mais efetivas e imediatas de redução das emissões de GEE da mobilidade urbana têm sido: incentivo ao uso de modos mais sustentáveis, como transporte coletivo, caminhadas e bicicleta; e eletrificação dos veículos em geral.

Do ponto de vista estritamente climático, nota-se que os veículos que transportam mais pessoas são mais eficientes, ainda que usem combustível fóssil. Em outras palavras, atrair as pessoas dos automóveis particulares para o transporte coletivo, mesmo que para os ônibus a *diesel*, é uma eficaz forma de descarbonização, pois um carro emite cinco vezes mais GEE por passageiro do que um ônibus (98,2 *versus* 19,5 gCO_2e/pass.km). A emissão seria ainda menor se essas pessoas passassem a usar ônibus elétrico ou, principalmente, metrô (ver Tabela 3). Evidentemente, o transporte de alta capacidade não se aplica a qualquer situação, pois requer alta demanda concentrada para ser viável financeira e operacionalmente. A mensagem que se pretende transmitir é a de necessidade de um planejamento urbano integrado, que considere as condições de cada área da cidade para o funcionamento de uma rede otimizada de transporte, com melhor relação entre benefícios e custos.

Tabela 3. Fator de emissão por modo de transporte

MODO DE TRANSPORTE	FATOR DE EMISSÃO gCO_2e/km (A)	OCUPAÇÃO MÉDIA PASSAGEIROS (B)	FATOR DE EMISSÃO POR PASSAGEIRO gCO_2e/pass.km (A/B)
Carro	118	1,2	98,2
Ônibus a *diesel*	1.173	60,0	19,5
Ônibus elétrico	158	60,0	2,6
Metrô	2.149	1.500,0	1,4

Fonte: Elaboração própria, a partir da Calculadora do Fundo Clima (https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/clima/emissoes-evitadas-e-removidas) e de dados de operadores metroferroviários.

Para demonstrar o efeito das medidas citadas, o Institute for Transportation and Development Policy (ITDP, 2022) estimou o impacto de quatro cenários possíveis para a mobilidade urbana:

i) manutenção da conjuntura atual: preserva a tendência de aumento de emissões;

ii) alta substituição modal: quando os usuários de carros e motos passam a usar transporte coletivo, bicicletas e fazer caminhadas após ações de planejamento urbano e priorização;

iii) intensa eletrificação: inclui os veículos públicos e privados na proporção que são atualmente utilizados; e

iv) combinação de substituição modal e eletrificação.

Segundo o estudo, para atender à meta de limitar o aumento da temperatura a 1,5ºC, o transporte urbano no planeta não pode emitir mais do que 65 $GtCO_2e$ até 2050. O único cenário compatível com esse limite é o que combina substituição modal e eletrificação, pois emite 60 $GtCO_2e$.

Quadro 1. Emissões e impactos dos cenários de descarbonização da mobilidade

CENÁRIOS	EMISSÕES ($GtCO_2e$)	IMPACTOS POSITIVOS	IMPACTOS NEGATIVOS
Manutenção da conjuntura atual	119	–	» Muitas mortes no trânsito. » Alto custo público e privado. » Pouca acessibilidade a pessoas de baixa renda. » Expansão urbana excessiva. » Poluição sonora e do ar.
Eletrificação de veículos	75	» Menos poluição sonora e do ar.	» Muitas mortes no trânsito. » Alto custo público e privado. » Pouca acessibilidade a pessoas de baixa renda. » Expansão urbana excessiva.
Substituição modal	86	» Menos mortes no trânsito. » Mais acessibilidade a pessoas de baixa renda. » Mais saúde física e mental pelo aumento de caminhadas e uso de bicicletas.	» Pouca redução da poluição sonora e do ar se comparada ao cenário de eletrificação.

(Continua)

(Continuação)

CENÁRIOS	EMISSÕES ($GtCO_2e$)	IMPACTOS POSITIVOS	IMPACTOS NEGATIVOS
Substituição modal + eletrificação	60	» Menos mortes no trânsito. » Mais acessibilidade a pessoas de baixa renda. » Mais saúde física e mental pelo aumento de caminhadas e uso de bicicletas. » Menos poluição sonora e do ar.	–

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de ITDP (2022).

Como se observa no Quadro 1, é válido adotar medidas nas duas direções: por um lado, fomentando a substituição do uso de automóveis e motocicletas pelo transporte público e o não motorizado, e, por outro, eletrificando os veículos. Os ônibus elétricos conjugam ambos os fatores. Além disso, podem ter um papel-chave no impulso inicial da eletrificação do transporte em geral. Citam-se algumas razões: são veículos de uso intensivo, o que melhora a viabilidade econômica pela boa relação Opex/Capex; substituem o *diesel*, extremamente emissor de material particulado, prejudicial à saúde; permitem concentrar investimento na infraestrutura de recarga em poucas garagens ou terminais; e são serviços regulados pelo poder público.

O ÔNIBUS ELÉTRICO NO TRANSPORTE PÚBLICO

Mercado global

Existem diversas tecnologias de ônibus elétricos no mercado. Essa categoria contempla desde os antigos trólebus (alimentados por cabos de energia aéreos) até os modernos ônibus a bateria, passando pelos híbridos (combinam motores elétricos com combustível convencional) e mais recentemente pelos ônibus a células de combustível (têm motorização elétrica e são abastecidos a hidrogênio). Para os objetivos deste texto, quando o assunto for adoção de ônibus elétricos, trata-se sobretudo dos veículos a bateria para o transporte público municipal.

O mercado de ônibus elétricos tem crescido significativamente nos últimos anos, com vários países e cidades empregando-os como parte de seus esforços para reduzir as emissões de GEE e melhorar a qualidade do ar nas áreas urbanas. O principal estimulador das vendas tem sido a ação governamental, por meio de restrições e incentivos, mas a evolução da tecnologia e a diminuição dos custos de baterias também têm contribuído para a viabilização dos investimentos. A frota de ônibus elétricos cresce impulsionada pelo forte mercado chinês, responsável por 96% da frota global. A Europa segue como segundo mercado, com lenta substituição e redução dos ônibus a motor de combustão interna. O conjunto dos demais países ainda apresenta crescimento da frota a combustão.

Tabela 4. Frota global de ônibus municipais (unidades)

TIPOLOGIA POR PAÍS	2018	2019	2020	2021E*	2022E*	2023E*	(% FROTA PAÍS)
Ônibus elétricos	382.954	416.678	449.843	487.929	531.754	577.533	(36%)
China	379.092	410.231	440.012	474.166	512.882	552.621	(86%)
Europa	2.238	3.888	5.593	7.698	9.969	12.648	(7%)
Outros	1.624	2.559	4.238	6.065	8.903	12.264	(2%)
Combustão interna	1.067.121	1.063.458	1.056.097	1.044.682	1.026.889	1.009.577	(64%)
China	186.841	171.990	158.072	139.187	115.581	90.766	(14%)
Europa	187.521	187.628	186.516	184.890	183.021	180.767	(93%)
Outros	692.759	703.840	711.509	720.605	728.287	738.044	(98%)
Total	**1.450.075**	**1.480.136**	**1.505.940**	**1.532.611**	**1.558.643**	**1.587.110**	**(100%)**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de BNEF (2020, 2023).
Nota: * Dados estimados na época dos estudos.

As cidades se tornaram protagonistas dessa agenda por meio de incentivos financeiros e regulações restritivas municipais, contando na maior parte das vezes com apoio do governo central de cada país. A China é o grande destaque, sendo Shenzhen a primeira cidade do mundo a eletrificar, em 2017, 100% de sua frota de 16.400 ônibus. Na Europa, a maior frota pertence a

Londres, que anunciou em 2023 seu milésimo ônibus elétrico. A cidade tem uma política para melhorar a qualidade do ar em que taxas de congestionamento de veículos poluentes ajudam a financiar a expansão da frota elétrica.

A América Latina se tornou palco de importantes iniciativas. Atualmente, 4.020 ônibus elétricos a bateria estão em operação em países da região, com destaque para Chile e Colômbia (ver Tabela 5). Santiago se vale de uma política nacional de promoção da eletromobilidade e conta com dois mil ônibus elétricos em operação, a maior frota de ônibus elétricos fora da China, equivalente a 26,9% do total de ônibus da cidade (7.427). Bogotá inovou o modelo de negócio da prestação do serviço de transporte público, com compra e operação dos ônibus sob contratos distintos, que ampliou a quantidade e a viabilidade dos ônibus elétricos, com 1.486 veículos em operação, 16,5% do total de ônibus da cidade (9.003).

Tabela 5. Frota de ônibus elétricos da América Latina (unidades)

PAÍS	TRÓLEBUS	A BATERIA	TOTAL
Chile	30	2.013	2.043
Colômbia	–	1.590	1.590
México	525	129	654
Brasil	302	142	444
Barbados	–	49	49
Uruguai	–	36	36
Argentina	77	22	99
Equador	85	21	106
Guatemala	–	8	8
Peru	–	8	8
Paraguai	–	2	2
Venezuela	45	–	45
Total	**1.064**	**4.020**	**5.084**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do E-bus Radar (c2024).

Benefícios econômicos, sociais e ambientais

Além da redução das emissões de GEE, os ônibus elétricos oferecem diversos outros benefícios ambientais e socioeconômicos tanto para quem está dentro do veículo quanto para quem está do lado de fora. Em termos de poluição atmosférica, os motores a óleo *diesel*, padrão de ônibus e caminhões, são grandes emissores de material particulado. Essas pequenas partículas dispersas no ar têm um impacto significativo na qualidade do ar e estão associadas a diversas doenças dos sistemas respiratório e cardiovascular. A substituição por motores elétricos também contribui para reduzir a emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) e óxidos de enxofre (SOx). Esses componentes também afetam a saúde humana e o aquecimento global e têm efeitos na formação de chuva ácida, que pode gerar corrosão em edifícios, estruturas metálicas e monumentos históricos, além de prejudicar a biodiversidade quando precipita sobre corpos hídricos, solos e vegetação.

Os ônibus elétricos são extremamente silenciosos, contribuindo para diminuição dos níveis de poluição sonora no ambiente urbano. A exposição constante a níveis elevados de ruído pode levar a estresse crônico, ansiedade, distúrbios do sono e hipertensão arterial, que impactam saúde física e mental, além de produtividade no trabalho. O motorista, cujo posto de trabalho se localiza ao lado de um motor a combustão no ônibus tradicional, é um dos grandes beneficiários da substituição pelo veículo elétrico, pois passa a ser menos exposto a riscos à saúde como insônia, transtornos do humor, perdas auditivas e lesões nos membros devido ao calor, ao ruído e às vibrações. Para os usuários, a mudança é radical. Eles passam a contar com um serviço com maior qualidade, conforto e menor intensidade de calor e vibração, que são vantagens do motor elétrico em comparação ao motor a *diesel*. No fim das contas, a introdução de ônibus elétricos torna o transporte público mais atrativo, incentivando mais pessoas a migrarem para esse meio de transporte sustentável.

Desafios para a implantação dos ônibus elétricos

A tecnologia de ônibus elétricos ainda enfrenta entraves para uma implementação em massa. Seu histórico operacional é limitado. Logo, costuma enfrentar resistência por parte dos operadores. Podem ser listados como desafios de natureza operacional: garantir o correto funcionamento da infraestrutura de recarga, incluindo dimensionamento da rede elétrica; montar um plano de carregamento adequado, uma vez que o processo de recarga pode demorar horas; limitações de autonomia, apesar dos avanços na tecnologia, o que pode ser um problema em rotas mais longas; qualificações e treinamento de mão de obra; e fornecimento de peças de reposição.

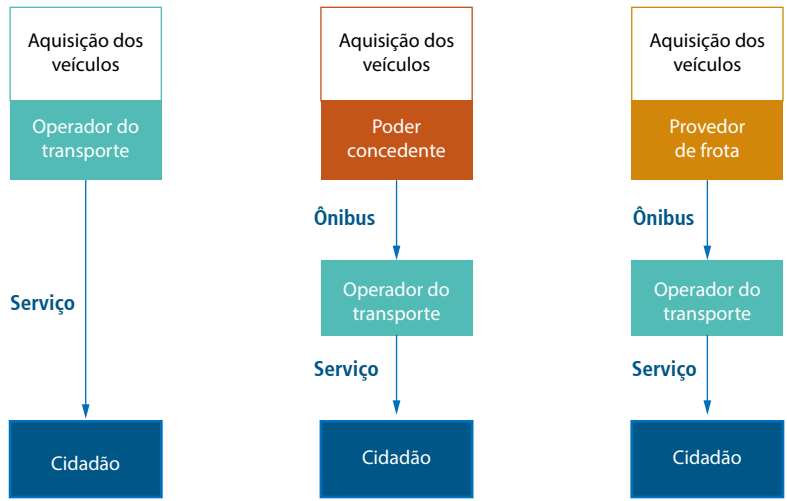
Do ponto de vista financeiro, algumas novas questões são impostas. A principal delas é o alto investimento, já que os ônibus elétricos a bateria são aproximadamente 3,5 vezes mais caros do que seus equivalentes a *diesel*. Fazem piorar essa conta a ausência do valor de revenda dos ônibus elétricos e a necessidade de investimento adicional nas garagens dos operadores para adequar *layout*, carregadores e rede elétrica. Embora os ônibus elétricos envolvam maiores custos iniciais de investimento, eles se destacam por custos operacionais e de manutenção mais baixos. No entanto, um estudo conduzido pela iniciativa Zero Emission Bus Rapid-Deployment Accelerator (Zebra) (Eufrásio; Daniel; Delgado, 2022), baseado em um piloto com vinte linhas de ônibus municipais em São Paulo, revelou que, em geral, o TCO[1] dos ônibus elétricos, apesar de próximo, ainda é mais alto do que o TCO dos ônibus a *diesel*, ou seja, a economia prevista na fase de operação ainda não compensa o alto investimento. Entre as medidas que auxiliariam a equiparação dos TCOs, podem ser citadas: redução das taxas de juros de financiamento, aumento do prazo das concessões e, sobretudo, subvenções governamentais.

1 O *total cost of ownership* (TCO) – ou custo total de propriedade – reflete o valor presente líquido das despesas totais, incluindo investimentos em capital, operação e manutenção de ônibus e infraestrutura de abastecimento durante sua vida útil. É importante salientar que a análise do TCO é altamente sensível às condições de mercado, tais como os preços dos ônibus, do *diesel*, da energia elétrica, as taxas de câmbio, as taxas de desconto e as condições de financiamento.

Mesmo com subsídios públicos, a obtenção de financiamento tende a ser outra barreira. Visto que se trata de uma empreitada com altos custos iniciais a serem compensados ao longo do tempo de operação, o crédito se mostra um instrumento bastante efetivo. Entretanto, muitos operadores e municípios não atendem aos requisitos bancários de porte, governança e saúde financeira. Estruturas financeiras sofisticadas têm sido propostas pelos diversos atores para viabilizar o financiamento, baseadas em alternativas do modelo de aquisição dos ônibus.

Estão mapeadas resumidamente três possibilidades de propriedade dos veículos: (i) do operador do ônibus; (ii) do ente público; e (iii) de um terceiro designado especificamente para prover a frota. A partir dessa estrutura básica, podem existir variações. Por exemplo, no primeiro modelo, o poder concedente pode aportar recursos à concessão para apoiar a aquisição. No terceiro, o ônibus pode ser alugado por uma empresa operando livremente em mercado ou fornecido por meio de concessão pública. Qualquer que seja a solução, o modelo de negócios e o contrato de concessão precisam ser compatibilizados.

Figura 1. Possibilidades de propriedade dos veículos



Fonte: Elaboração própria.

Potencial brasileiro

O Brasil tem 444 ônibus elétricos, sendo 302 da antiga tecnologia trólebus que ainda operam no estado de São Paulo. Os 142 ônibus a bateria foram adotados em operações-piloto de 13 municípios e três sistemas metropolitanos onde operam linhas intermunicipais. Destes, 73 foram produzidos pela BYD e 69 pela Eletra. Embora os números ainda não sejam significativos, há planos de expansão em diversos municípios e estados. Para atender a essa crescente demanda, o Novo PAC – programa de investimentos do Governo Federal – abriu seleção de projetos para a modalidade de renovação de frota para transporte público, que prevê apoio à adoção de ônibus elétricos.

Tabela 6. Frota de ônibus elétricos operante nas cidades brasileiras (unidades)

LOCALIDADES	TRÓLEBUS	MIDI A BATERIA*	CONVENCIONAL A BATERIA	ARTICULADO A BATERIA	TOTAL
São Paulo	201	–	68	–	269
São Paulo – intermunicipal	95	–	–	1	96
Salvador – intermunicipal	–	–	20	–	20
São José dos Campos	–	–	–	12	12
Salvador	–	–	8	–	8
Santos	6	1	–	–	7
Brasília	–	–	6	–	6
Diadema	–	–	6	–	6
Guarujá	–	–	4	–	4
Vitória – intermunicipal	–	–	4	–	4
Maringá	–	1	2	–	3
Volta Redonda	–	–	3	–	3
Bauru	–	–	2	–	2
Mauá	–	–	2	–	2
São Bernardo do Campo	–	–	1	–	1
Sorocaba	–	–	1	–	1
Total	**302**	**2**	**127**	**13**	**444**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do E-bus Radar (c2024).

Nota: * Midiônibus são modelos de tamanho intermediário, menores que os ônibus convencionais e maiores que os micro-ônibus.

As iniciativas de maior porte que mais avançaram e chegaram a publicar procedimento de manifestação de interesse e/ou edital de licitação de concessão foram as de Goiás, com 114 ônibus; as de Campinas, com duzentos; e as de São José dos Campos, com quatrocentos, embora ainda não tenham conseguido atrair interessados. Em Curitiba, o BNDES foi recentemente contratado para estruturar a concessão de ônibus na região metropolitana, com metas progressivas de eletrificação da frota, atualmente em 1.543 ônibus, atingindo 33% até 2030 e 100% até 2050.

A grande e concreta possibilidade de incremento atualmente está na cidade de São Paulo. A Lei Municipal 16.802, de 17 de janeiro de 2018, determinou a eliminação das emissões de CO_2 fóssil e a redução de 95% nas emissões de NOx e material particulado até 2038. Isso implica a eletrificação de toda a frota, atualmente composta por cerca de 13 mil ônibus. O programa de metas da prefeitura prevê a inserção de pelo menos 2.600 ônibus elétricos até 2024.

O sucesso de São Paulo será fundamental para o amadurecimento do mercado. A demanda da cidade, por si, é capaz de gerar escala mínima de produção para estabilidade no fornecimento, com redução de preços, ampliação dos serviços e estabelecimento de plataforma de exportação. Atentos a esse potencial, quatro fabricantes – BYD, Eletra, Marcopolo e Mercedes-Benz – se tornaram aptos a produzir no país. Estima-se que a capacidade produtiva atual do Brasil esteja em quatro mil ônibus elétricos por ano. À medida que a demanda nacional e da América Latina aumenta, espera-se que outros fabricantes que já produzem ônibus convencionais no Brasil, como MAN, Volvo e Scania, passem a produzir os elétricos.

A frota total brasileira de ônibus urbanos é estimada em 107.000 unidades (NTU, 2023). Em 2023, a indústria nacional produziu 13,9 mil ônibus urbanos, sendo 13,3 mil para o mercado interno e 633 destinados à exportação (Fabus, 2024). Um exercício estimativo de aumento gradual da participação de ônibus elétricos nas vendas internas de ônibus indica um mercado potencial entre R$ 5,2 bilhões e R$ 34,7 bilhões em 2033, a depender do cenário[2] adotado.

2 No cenário conservador, 15% dos ônibus vendidos ao fim de dez anos são elétricos; no otimista, 50%; e no disruptivo, 100%.

Tabela 7. Estimativa de vendas de ônibus elétricos (R$ milhões)

CENÁRIOS	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Conservador	190	2.416	2.462	2.554	3.004	3.071	3.459	3.867	4.294	4.740	5.206
Otimista	238	2.899	3.754	4.418	6.009	7.676	9.433	11.280	13.214	15.237	17.353
Disruptivo	381	4.251	7.220	10.309	13.520	16.888	20.438	24.172	28.079	32.167	34.707

Fonte: Elaboração própria.

Medidas de transição energética no BNDES

O BNDES vem se empenhando na busca de novas soluções, instrumentos e formas de atuar. Entre as medidas já tomadas, pode-se citar que em 2019 o Banco definiu uma política de conteúdo nacional progressiva específica para o credenciamento de veículos de baixo carbono e baterias em sua base de itens financiáveis, que podem ser adquiridos com recursos da instituição. O fabricante é incentivado a se instalar no país devido à baixa exigência inicial de conteúdo local e precisa aumentar seus índices de nacionalização gradualmente ao longo dos anos. Como resultado, hoje quatro fabricantes estão credenciados e são capazes de produzir ônibus elétricos de origem nacional, conforme mencionado anteriormente.

Em paralelo, o BNDES ajustou sua política operacional para que as taxas de juros mais baixas se apliquem a ônibus elétricos nas suas principais linhas de financiamento (Finem, Finame e Fundo Clima). Além disso, o Banco começou a fomentar, junto a operadores, investidores privados e entes públicos, operações de crédito com estruturas financeiras mais complexas, fora dos modelos mais tradicionais, para aquisição de ônibus. Em 2023, por exemplo, foi aprovada uma operação de crédito de R$ 2,5 bilhões para o município de São Paulo, na qual o BNDES financia uma subvenção para investimento na concessão equivalente à diferença de valores entre o ônibus a *diesel* e o elétrico a ser adquirido pelos operadores.

Entre as ações em andamento, podem ser mencionadas: financiamento ao primeiro BRT elétrico do Brasil; estudos de pré-viabilidade para implementação de ônibus elétricos nas cidades de Curitiba e Salvador em parceria

com o KfW (banco de desenvolvimento alemão); e estruturação da nova concessão de ônibus na Rede Integrada de Transporte de Curitiba com vistas à eletromobilidade. Além disso, estão em perspectiva novos financiamentos à aquisição de frotas pelo país e aumento do *funding* para ônibus elétricos no Fundo Clima.

CONCLUSÃO

A implementação dos ônibus elétricos gera muitos benefícios climáticos, mas não se limita a esse aspecto. Para ter seus efeitos amplificados, deve fazer parte de uma abrangente estratégia para a mobilidade urbana, que inclui investimento em planejamento urbano, serviços e infraestrutura para pedestres, ciclistas e transporte público em geral. Tais iniciativas são capazes de atrair o usuário do automóvel privado para os modos mais sustentáveis, o que já é uma ação de descarbonização. Uma estratégia que combine substituição modal e eletrificação é a contribuição mais eficaz que o setor pode oferecer para o atendimento às metas do Acordo de Paris.

Como mencionado, diversos desafios são impostos à implantação dos ônibus elétricos. Com o desenvolvimento da tecnologia, a principal questão passou a ser de ordem financeira, o que mostrou ser essencial a participação dos governos. Para tanto, é preciso planejamento e compreensão dos impactos fiscal, financeiro e operacional demandados por essa mudança perante os benefícios estimados. Os avanços em São Paulo, em particular por seu porte e visibilidade, servem de exemplo e aceleram a adoção país afora. Mas, dada a diversidade nacional, a solução empregada e a velocidade de implantação da nova tecnologia serão específicas para cada localidade.

Conforme mostrado, o incentivo do BNDES a um mercado nascente como o dos ônibus elétricos ocorre tanto pelo lado da oferta – estimulando fabricantes a instalarem linhas de produção no país – quanto pelo lado da demanda – por meio da estruturação de novos projetos, de linhas de financiamento a custos reduzidos e de fomento de novas operações com operadores, investidores e entes públicos. O Banco tem buscado atuar de forma proativa com todos os instrumentos de que dispõe, sempre alertando os gestores públicos para a necessidade de planejamento e avaliação prévia

dos impactos. A nova tecnologia impõe desafios, mas muitos podem ser contornáveis em razão do alto impacto que os ônibus elétricos geram para o desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS. *Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Públicos – Simob/ANTP*: relatório geral 2018. São Paulo: ANTP, 2020. Disponível em: http://files.antp.org.br/simob/sistema-de-informacoes-da-mobilidade--simob--2018.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

BNEF – BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. *Long-Term Electric Vehicle Outlook 2020*. New York: BNEF, 2020. Disponível em: https://www.bnef.com/insights/23133/. Acesso em: 25 jan. 2024.

BNEF – BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. *Long-Term Electric Vehicle Outlook 2023*. New York: BNEF, 2023. Disponível em: https://www.bnef.com/insights/31517. Acesso em: 25 jan. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013 – ano-base 2012*: relatório final. Brasília, DF: MMA, 2014. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviarios_2013.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

E-BUS RADAR. Ônibus elétricos América Latina. *E-bus Radar*, [*s. l.*], c2024. Disponível em: https://www.ebusradar.org/. Acesso em: 25 jan. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço energético nacional 2022*: ano base 2021. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

EUFRÁSIO, A. B. R.; DANIEL, J.; DELGADO, O. *Análise da implantação de ônibus zero emissão na frota de um operador de ônibus da cidade de São Paulo*. São Paulo: Conselho Internacional de Transporte Limpo, 2022. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/11/brazil-hvs-ZEBRA-analise-operacion-onibus-eletricos-Sao-Paulo-nov22-1.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

FABUS – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE ÔNIBUS. Produção das associadas: mapas de produção 2024. *Fabus*, São Paulo, 2024. Disponível em: https://www.fabus.com.br/producao-das-associadas/. Acesso em: 25 jan. 2024.

FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL. *Nationally Determined Contribution (NDC) to the Paris agreement under the UNFCCC*. Brasília, DF: Federative Republic of Brazil, 2023. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-11/Brazil%20First%20NDC%202023%20adjustment.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

ITDP – INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO. O cenário de cidades compactas eletrificadas. *ITDP*, Rio de Janeiro, 25 out. 2022. Disponível em: https://itdpbrasil.org/o-cenario-de-cidades-compactas-eletrificadas/. Acesso em: 25 jan. 2024.

NTU – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. *Os grandes números da mobilidade urbana*: cenário nacional – atualizado em dezembro/2023. Brasília, DF: NTU, 2023. Disponível em: https://www.ntu.org.br/novo/ckfinder/userfiles/files/NTU-Grandes%20números%20do%20setor%20v12_3.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES. *Seeg*, [*s. l.*], c2024. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/. Acesso em: 25 jan. 2024.

6

Descarbonização no transporte de cargas: alteração estrutural da matriz logística *versus* ganhos de eficiência nos modos de transporte

Felipe Borim Villen
Tiago Toledo Ferreira
Bernardo Furtado Nunes
Edson José Dalto
Marco Aurélio Cabral Pinto
Paulo Marcelo Machado Costa*

* Respectivamente, superintendente da Área de Infraestrutura (AINFRA) do BNDES; e chefe, economista e engenheiros do Departamento de Transportes e Logística da AINFRA.

INTRODUÇÃO

O transporte de cargas em longa distância no Brasil, realizado predominantemente por caminhões, é responsável por importante parcela de emissão de poluentes e gases de efeito estufa. De acordo com o Balanço Energético de 2023 (EPE, 2023), o setor de transporte representa 50% do total de dióxido de carbono (CO_2) emitido no Brasil entre os diversos usos de energia.[1] O transporte rodoviário apresenta elevado consumo de *diesel*, gerando mais emissões por tonelada de carga transportada do que outros sistemas mais eficientes, como o ferroviário, o aquaviário e o dutoviário. Nesse sentido, uma questão que se coloca é saber quais alternativas de investimento melhor contribuiriam no esforço de descarbonização e aumento da eficiência energética dos transportes: uma alteração estrutural na matriz de transporte, com a transferência de cargas da rodovia para outros modos mais eficientes, ou um aprimoramento nas tecnologias intrínsecas a cada modo de transporte? Este artigo advoga em favor da primeira alternativa, comparando o impacto marginal no ganho de cada solução e mostrando quanto uma matriz de cargas mais equilibrada pode afetar o aumento da eficiência e a redução de emissões, *vis-à-vis* algumas alternativas de aprimoramento intrínsecas a cada meio de transporte. Naturalmente, não se trata de escolha entre alternativas excludentes, sendo o esforço por ganhos em eficiência e redução de emissão em cada meio de transporte uma meta a ser perseguida, porém com contribuição inferior quando comparado ao potencial de migração de carga da rodovia para modos mais eficientes.

O GHG Protocol[2] propõe que os esforços de mitigação de emissões para atingimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris em um nível empresarial devem iniciar pelo mapeamento das atividades econômicas em que essas emissões acontecem. Para tanto, propõe a segmentação das atividades empresariais nos escopos 1, 2 e 3. O escopo 1 engloba emissões provenientes diretamente do processo produtivo da empresa, com utilização de recursos

1 Os usos de energia correspondem a 23,2% das emissões de gases de efeito estufa (BRASIL, 2022). As demais fontes são processos industriais e uso dos produtos (6,1%), agropecuária (28,5%), mudança do uso da terra e florestas (38,0%) e resíduos (4,2%).

2 GHG Protocol, ou Protocolo de Gases com Efeito Estufa, é um conjunto de padrões de caráter global para que empresas e organizações mensurem e gerenciem emissões de gases de efeito estufa.

do próprio negócio. Já o escopo 2 refere-se a emissões associadas ao consumo de energia adquirida pela companhia, enquanto o escopo 3 abrange emissões indiretas, que acontecem ao longo da cadeia de valor, contemplando clientes e fornecedores da empresa, incluindo o transporte das mercadorias. As oportunidades de ganho no escopo 3 podem chegar a 5,5 vezes os esforços realizados nos dois primeiros escopos.

No entanto, as soluções usualmente adotadas por organizações em relação ao transporte próprio ou de terceiros restringem-se a ganhos de eficiência no uso do caminhão, sem considerar a possibilidade de migração de suas cargas para sistemas de transporte mais eficientes, como o ferroviário ou o aquaviário, o que pode estar subestimando os ganhos potenciais de redução de emissões. Porém, nem sempre essa mudança é possível ou economicamente viável. Grande parte do esforço pela mudança na matriz de transportes provém da iniciativa pública de planejamento e incentivo aos operadores para que essa transformação aconteça.

Tendo isso em mente, este artigo apresenta um exercício de estimação do impacto das emissões do transporte de carga no Brasil se houvesse uma mudança na matriz de transporte do modo rodoviário para outros de menor emissão. Além desta introdução, na segunda seção, apresentam-se as emissões médias por modo de transporte, enquanto a terceira seção elenca algumas alternativas de redução das emissões. Já a quarta seção traz o panorama atual da matriz de transporte brasileira, um cenário para 2035 com a demanda total por transporte de diferentes tipos de carga, além de uma reconfiguração da matriz de transporte para atender essa demanda. Por fim, são apresentadas as conclusões.

CONSUMO RELATIVO E EMISSÃO DOS MODOS DE TRANSPORTE DE CARGA

Uma maneira muito direta de observar a eficiência relativa dos modos de transporte e o nível de emissões consiste em comparar o consumo médio e o nível de emissão por TKU[3] de carga transportada. Para esse propósito, o conjunto de cargas

3 TKU é a sigla para "tonelada quilômetro útil", que representa o somatório da multiplicação de toneladas de carga efetivamente transportada pela distância de viagem de cada frete.

pode ser subdividido em quatro grandes categorias: carga geral, granéis minerais, granéis agrícolas e granéis líquidos. Na categoria de carga geral, de acordo com os critérios da Fundação Dom Cabral (FDC), enquadram-se os alimentos e bebidas processadas, manufaturados e outros. Em granéis minerais estão o minério de ferro, outros minerais e cimento. Em granéis agrícolas estão compreendidos principalmente soja e milho em grãos e farelo de soja. Granéis líquidos englobam combustíveis líquidos, petroquímicos e químicos (Resende; Cesar, 2019e). A Tabela 1 resume essas informações para os diferentes modos de transporte e tipos de cargas.

Tabela 1. Emissões de CO_2 e consumo de combustível por modo de transporte e tipo de carga

MODO DE TRANSPORTE	EMISSÕES (KG CO_2/MIL TKU)				FATOR DE EMISSÃO (G CO_2/L)	CONSUMO MÉDIO (L/MIL TKU)			
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral		Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral
Rodoviário	59,2	37,3	57,2	54,4	2,37	25,0	15,7	24,1	23,0
Ferroviário	8,7	16,6	7,2	23,8	2,37	3,7	7,0	3,0	10,0
Cabotagem	4,4	4,4	4,8	9,1	2,95	1,5	1,5	1,6	3,1
Hidroviário	2,7	2,8	4,8	7,4	2,95	0,9	0,9	1,6	2,5

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de EPL e Iema (2021).

Nota: Considerou-se, para os modos rodoviário e ferroviário, o uso exclusivo de *diesel* B10; e para o aquaviário, a mistura de 67% de óleo combustível e 33% de *diesel* B0. Os fatores de emissão são 2,37 g de CO_2/l para o *diesel* B10 e 2,95 para a mistura considerada.

A metodologia proposta por EPL e Iema (2021) é bastante detalhada e criteriosa, e as emissões são estabelecidas em faixas de valores. A Tabela 1 reflete uma média simples do intervalo de valores das emissões para cada modo de transporte e tipo de carga transportada. O cálculo do consumo é resultado de uma relação entre as emissões e o fator de emissão.

Os diferentes valores de emissão e consumo médio de combustível para cada tipo de carga são explicados principalmente pelo fato de o equipamento de transporte variar segundo o tipo de carga transportada. Por exemplo, caminhões se distinguem de acordo com a capacidade de carga que são capazes de transportar (leves, pesados, bitrem etc.), e cada um é mais utilizado para determinado tipo de carga, afetando o consumo e as emissões médias.

O mesmo raciocínio vale para o tamanho de uma composição ferroviária ou para o número de balsas hidroviárias.

É fácil observar na Tabela 1 que, em ordem crescente de eficiência e decrescente de emissões, o modo rodoviário é o menos eficiente e o maior emissor por TKU transportada, seguido pelo ferroviário, pela cabotagem e, em melhores condições, pelo hidroviário, com menor emissão relativa e melhor desempenho.

Além disso, a Tabela 1 revela que o transporte rodoviário emite mais do que o dobro do ferroviário por TKU no transporte de carga geral e cerca de sete vezes mais no transporte mineral, em que a inserção da ferrovia é consideravelmente maior. Comparado à cabotagem e ao hidroviário, o transporte rodoviário emite cerca de 6 a 13 vezes mais e de 7 a 22 vezes mais, respectivamente.

Pode-se concluir, a partir dessa comparação, como a migração de cargas da rodovia para modos mais eficientes e, consequentemente, menos emissores poderia contribuir substancialmente para o esforço de descarbonização do transporte de cargas. Seria necessário um esforço muito grande de eficiência, ou uma mudança de paradigma tecnológico (como eletrificação da frota), para que o transporte rodoviário atingisse os padrões de emissão dos demais modos.

ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO_2 NO SEGMENTO DE TRANSPORTES

A literatura enumera um conjunto extenso de alternativas para redução de emissões, a maioria com ênfase em tecnologia de motores e fontes de energia. Branco e outros (2023) apresentam algumas delas:

- aumento do uso de veículos elétricos ou híbridos;
- ampliação da participação dos biocombustíveis de baixa emissão líquida de carbono;

- redução do consumo energético dos veículos de transporte (ganhos de eficiência);
- redução do congestionamento e da demanda por viagens;
- ampliação e melhor integração da infraestrutura intermodal de transporte (diminuindo a quilometragem que a carga viaja pelo modo rodoviário e ampliando-a nos modos menos emissores);
- desenvolvimento e disseminação do uso de sistemas inteligentes de transporte para maximizar a utilização da capacidade de carga dos veículos por meio de uma melhor coordenação entre as cargas que devem ser transportadas e o tráfego dos veículos;
- disseminação de sistemas que permitem maior compartilhamento de informações entre usuários e fornecedores de serviços de transporte;
- campanhas para disseminação de medidas comportamentais e tecnologias de assistência a condutores para estimular a condução de veículos de forma a minimizar o consumo de combustíveis (*ecodriving*);
- maior uso de telemetria e equipamentos de navegação por GPS para ganhos de eficiência e redução da quilometragem e do tempo de circulação dos veículos;
- criação de incentivos e subsídios baseados em eficiência e emissões de CO_2;
- mensuração da emissão de CO_2 das operações de transporte e ampla divulgação dos dados por meio de *benchmarking* para estimular a migração para modos com menor impacto ambiental;
- construção de corredores de transporte eficientes para fluxos de longa distância e exportação;
- melhoria da logística de entrega de cargas nos grandes centros urbanos (*last mile logistics*); e
- fomento a pesquisa e inovação tecnológica voltadas para o desenvolvimento de sistemas logísticos e de transporte sustentáveis.

Entre as alternativas apresentadas, Branco e outros (2023) analisam um conjunto restrito de soluções, apontadas como as mais promissoras para o Brasil na redução de emissões de CO_2, a serem implantadas em um horizonte de dez anos, resumidas no Quadro 1. Para esse conjunto são estimadas a redução

marginal, medida em porcentagem por TKU transportada, e a redução potencial, medida em milhões de toneladas, avaliadas para um agrupamento restrito, mas factível, da frota considerada, no horizonte de dez anos.

Quadro 1. Alternativas para redução da emissão de CO_2 e potencial de mitigação

REDUÇÃO ESTIMADA NA EMISSÃO DE CO_2			
Ações	**Ganho marginal (%/TKU)**	**Ganho potencial (milhões de t)**	**Racional para redução**
1) Ampliação do transporte intermodal de cargas	59 a 95	22,0	Diminuição da quilometragem transportada pelo modo rodoviário e ampliação pelos modos menos emissores
2) Estímulo ao uso de sistemas inteligentes de transporte para aumentar a ocupação da capacidade de carga dos veículos	8 a 9	8,6	Ganhos de escala no transporte, reduzindo o total de veículos necessários
3) Aumento da frota de caminhões com tecnologias de baixo consumo de combustível	30	7,5	Melhoria da *performance* energética dos caminhões, principalmente com tecnologia de motores e combustíveis
4) Aumento do transporte de cargas em veículos de maior capacidade	14	7,5	Substituição de caminhões de menor por de maior capacidade nas rotas inter-regionais
5) Aumento do uso de combustíveis alternativos com menor emissão de CO_2	41	6,4	Substituição do *diesel* pelo biometano em uma abordagem *well-to-wheel*
6) Diversas medidas para redução da emissão de CO_2 no transporte ferroviário	41	0,1	Melhora da *performance* do material rodante; implantação de treinamento e sistemas de *ecodriving* para os maquinistas; uso de sistemas para controle de tráfego e melhoria das operações de manobras dos trens

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Branco e outros (2023).

Para a primeira ação, o ganho marginal é estimado a partir das informações da Tabela 1, ou seja, cada TKU de carga transferida da rodovia para modos eficientes representa uma redução entre 55% e 95% de emissões. O ganho potencial total decorre da análise da transferência de cargas entre os diversos modos de transporte e tomou como base os investimentos em um *pipeline* de projetos apresentados no Plano Nacional de Logística – PNL 2025 (EPL, 2018). Primeiramente, estimou-se

a matriz de cargas para as condições do ano-base (2015), segmentada por tipo de carga e modo de transporte, e projetou-se a matriz para o ano de 2025, considerando o crescimento da TKU e a implantação dos projetos propostos. Na sequência, avaliou-se a emissão total para a distribuição modal do ano-base com a TKU de 2025 e comparou-se a emissão total de 2025 com a divisão modal de 2025. Nas projeções do PNL, essa redução é avaliada em 22 milhões de toneladas.

Resumidamente, a ação 2 consiste no aumento da ocupação média dos caminhões utilizados no transporte inter-regional de carga de 50% para 55% em três diferentes categorias de veículos. A ação 3 considera uma melhora na *performance* energética de 30% para os caminhões, utilizando uma taxa de renovação de frota de 15%. A ação 4 propõe a substituição de caminhões de menor capacidade pelos de maior capacidade de carga nas rotas inter-regionais, na proporção de 20%. Para a ação 5, considera-se a substituição do *diesel* pelo biometano até um limite de 30% da frota. A sexta e última ação avaliada considera a redução das emissões no sistema ferroviário de cargas, que compreende um amplo conjunto de medidas adotadas na Europa, como melhora da *performance* do material rodante, implantação de treinamento e sistemas de *ecodriving* para os maquinistas, uso de sistemas para controle de tráfego e melhoria das operações de manobras dos trens.

Pela análise do Quadro 1, conclui-se que tanto o ganho marginal quanto o potencial obtido pela transferência de carga da rodovia para modos eficientes proporcionam redução de emissão de CO_2 substancialmente superior a qualquer medida de mitigação intrínseca adotada individualmente nos sistemas de transporte.

ANÁLISE DO POTENCIAL E DOS IMPACTOS DE MIGRAÇÃO DE CARGAS DA RODOVIA PARA MODOS MAIS EFICIENTES DE TRANSPORTE

Nesta seção apresentam-se características da matriz brasileira de transporte de carga – particularmente sua predominância rodoviária *vis-à-vis* outros países e a própria infraestrutura existente –, além de um cenário otimizado para 2035 e o potencial de redução de emissões contido nele.

Matriz de transporte nacional e cenário para 2035

A matriz de transportes brasileira, como é de amplo conhecimento, apresenta um desequilíbrio em favor do transporte rodoviário. Tal constatação advém da comparação com outros países ou regiões de grande extensão territorial, bem como da análise da possibilidade da migração de carga da rodovia para outros modos de transporte mais econômicos e menos agressivos ao ambiente.

A comparação da matriz logística brasileira com a de outras regiões de grande extensão territorial é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Matriz de transporte comparando países de grande extensão territorial (%)*

PAÍS	MODO DE TRANSPORTE			
	Rodoviário	Ferroviário	Aquaviário	Dutoviário
Brasil	57	24	17	3
Argentina	88	4	8	0
Índia	79	21	0	0
México	75	25	0	0
União Europeia	65	14	18	3
Japão	51	5	44	0
Estados Unidos	42	35	10	12
China	35	14	48	3
Austrália	28	58	14	0
Canadá	27	45	6	22
Rússia	6	61	2	31

Fonte: OECD ([2024]), Eurostat (2024), Resende e Cesar (2019e) e ITF (2020).**

Notas: * Os valores percentuais são obtidos a partir da carga transportada em toneladas multiplicada pela distância de transporte dentro de cada modo. No caso brasileiro, além da FDC (Resende; Cesar, 2019e), há outras duas referências de matriz de transportes: o PNL 2035 e o Instituto Ilos. Para o PNL, a proporção do rodoviário é de 66%, e para o Ilos, 62% – ambos superiores aos 57% propostos pela FDC. ** A maior parte das informações foi extraída da base de dados da OECD para o ano de 2018. São exceções: todos os valores para Índia e aquaviário para Austrália, que são da mesma fonte, mas relativos ao ano de 2017; os dados do Canadá, que também são da mesma fonte, porém o dutoviário é de 2015 e o aquaviário é de 2013; os dados da União Europeia, extraídos da Eurostat, referentes a 2021, último ano que registra valores para todos os modos e primeiro ano estatístico pós-Brexit; os números do Brasil, cuja fonte é Resende e Cesar (2019e); e os valores da Argentina, cuja fonte é o ITF (2020).

Na distribuição percentual entre os diferentes modos de transporte, a Rússia é, de longe, a que concentra seu transporte nos modos mais eficientes, dedicando apenas 6% para o rodoviário. Também é o país que proporcionalmente aloca maior carga para as ferrovias (61%) e dutovias (31%), em razão das longas distâncias e elevada presença de *commodities* na matriz de cargas, como carvão, petróleo e gás natural. Também merece destaque o caso da Austrália, que conta com uma extensão de trilhos um pouco maior que a do Brasil (37 mil km) e forte presença de *commodities* transportadas em longas distâncias.

Para o caso brasileiro, avaliando-se a possibilidade de migração de carga para sistemas mais eficientes, cabe inicialmente analisar o perfil dos produtos movimentados internamente. A Tabela 3 revela, para cada tipo de produto, o volume total transportado em toneladas úteis (TU) e sua participação relativa, o total em TKU e sua participação relativa, além da distância média de transporte.

Tabela 3. Tipologia de produtos, TU e TKU transportados e distância média de transporte

TIPO DE CARGA	TU (BILHÕES DE T)	TU (%)	TKU (TRILHÕES DE T X KM)	TKU (%)	DISTÂNCIA MÉDIA (KM)
Carga geral	0,671	36,5	0,747	45,2	1.113,3
Granéis minerais	0,704	38,3	0,488	29,6	693,2
Granéis agrícolas	0,192	10,4	0,196	11,9	1.020,8
Granéis líquidos	0,272	14,8	0,220	13,3	808,8
Total	**1,839**	**100,0**	**1,651**	**100,0**	897,8*

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e).

Nota: *Média ponderada da distância de transporte pelo % em TU.

Os granéis minerais, líquidos e agrícolas são predominantemente *commodities* voltadas à exportação, e a elevada participação desse grupo no conjunto de mercadorias transportadas internamente em longas extensões reflete a distância entre as áreas produtoras e o litoral do país. Assim, tais cargas requerem fretes reduzidos para serem competitivas no mercado global; logo, elas buscam modos de transporte com menores custos unitários, conforme aponta a Tabela 4.

Tabela 4. Divisão modal para cada tipo de carga

TIPO DE CARGA	RODOVIÁRIO (% TKU)	FERROVIÁRIO (% TKU)	AQUAVIÁRIO (% TKU)	DUTOVIÁRIO (% TKU)	TOTAL TKU (BILHÕES)
Carga geral	82,4	4,6	13,0	0,0	747,11
Granéis minerais	15,0	62,6	17,0	5,4	488,12
Granéis agrícolas	65,0	19,3	15,7	0,0	196,44
Granéis líquidos	54,0	4,5	33,7	7,8	220,47
Total	**56,6**	**23,5**	**17,3**	**2,6**	**1.652,14**

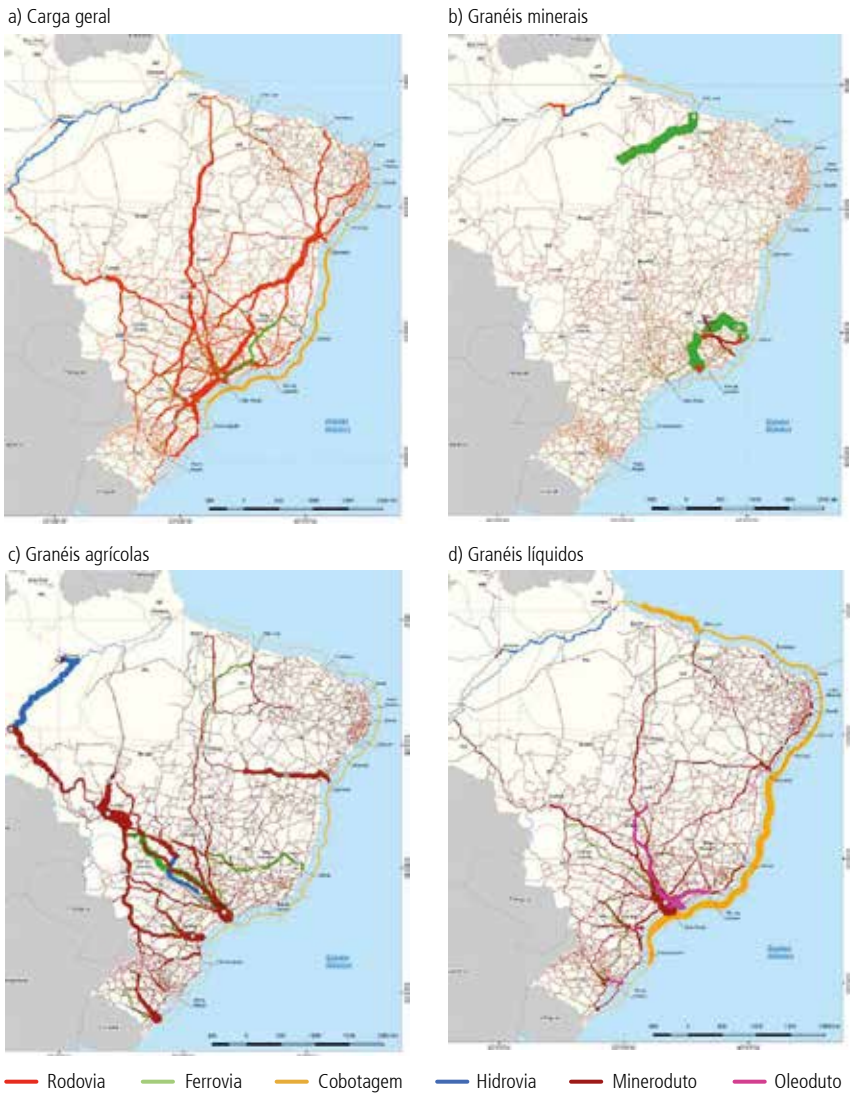
Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e).

Como se observa na Tabela 4, mais de 80% da carga geral viaja pelas rodovias, com 13% no transporte aquaviário, sendo muito incipiente a inserção da carga geral na ferrovia. Já os granéis minerais concentram-se na ferrovia, mas suas participações rodoviária e aquaviária não são desprezíveis, tendo também alguma presença no transporte dutoviário (principalmente minério de ferro). Granéis agrícolas são mais presentes na rodovia, com 65%, porém com participação relevante em ferrovia (19,3%) e sistemas aquaviários (15,7%). Finalmente, os granéis líquidos viajam predominantemente na rodovia e em modos aquaviários, tendo alguma inserção em dutos e uma menor na ferrovia.

A análise comparada entre as tabelas 3 e 4 leva à conclusão de que existe um potencial razoável de migração de cargas para sistemas de menores custos unitários, particularmente para as mercadorias que viajam longas distâncias e para as *commodities* que podem ser consideradas cativas de modos mais eficientes. Também deve ser considerado que muitas fontes de matérias-primas são inexploradas ou subexploradas em razão da ausência de uma linha ferroviária mais próxima, como se pode constatar pelas diversas solicitações de autorização de construção de linhas férreas para acesso a jazidas minerais pelo interior do país (ANTT, [2024]), o que foi viabilizado pela promulgação do novo marco regulatório ferroviário – Lei 14.273, de 23 de dezembro de 2021 (Brasil, 2021). Esse é também o caso das jazidas da Bahia Mineração (Bamin), na região de Caetité/BA (Revista Ferroviária, 2021), que estão subexploradas devido à obra ainda não concluída do trecho 1 da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (Fiol) e do Porto Sul em Ilhéus/BA.

Explorando agora a possibilidade de migração de cargas da rodovia para modos eficientes de transporte, o conjunto de mapas da Figura 1 mostra a distribuição espacial das rotas por tipologia de carga no Brasil e ajuda a constatar visualmente os deslocamentos das mercadorias pelos diferentes modos de transporte, as distâncias de viagem e as principais rotas utilizadas.

Figura 1. Alocação dos diversos tipos de carga na rede de transportes



Fonte: Resende e Cesar (2019a, p. 26, 2019b, p. 26, 2019c, p. 26, 2019d, p. 26).
Nota: A alocação apresentada reflete um mapeamento efetuado para o ano de 2015.

A transferência da carga geral da rodovia para a ferrovia acarretaria um ganho expressivo no esforço de descarbonização dos transportes, dado que esse segmento representa 37% da TKU brasileira, e há uma sobreposição razoável das rotas rodoviárias principais com a malha ferroviária existente no país. Para tornar essa mudança viável, seriam necessárias a recapacitação da malha e a construção de alguns trechos faltantes, além da proposição de um serviço ferroviário que oferecesse aumento da velocidade de transporte e confiabilidade nos prazos de entrega. A carga industrial exige maior previsibilidade e menores estoques ao longo da cadeia de suprimentos. Nesse sentido, deve haver uma programação de trens ágeis e menores, com agenda regular de paradas em estações e pátios de transbordo (Dalto; Castro; Passos, 2023).

Outra oportunidade expressiva encontra-se no incremento do transporte de cabotagem, que poderia absorver parte considerável da carga rodoviária de longa distância entre as cidades mais próximas da costa, sendo necessário melhorar o serviço com mais navios e maior frequência de escala nos portos, incluindo transporte porta a porta com perna rodoviária, além de fretes mais competitivos.

Acredita-se que haja também um potencial muito grande de migração da carga agrícola rodoviária (cerca de 8% da TKU total) para o modo ferroviário, por ser sua vocação natural (grandes volumes e longas distâncias). Além disso, grande parcela dos investimentos em realização nas ferrovias visa capturar esse tipo de carga prioritariamente. Destacam-se nesse sentido a expansão de capacidade do conjunto Malha Paulista e Malha Norte da Rumo e a expansão desta última até Lucas do Rio Verde/MT; a construção da Fiol, especialmente em seu segundo trecho de Caetité/BA até Barreiras/BA; e a construção da Ferrovia de Integração Centro-Oeste (Fico), entre Água Boa/MT e Mara Rosa/GO em seu primeiro trecho, onde se conecta com a Ferrovia Norte-Sul.

Considerando essas oportunidades de migração de cargas para modos de transporte eficientes, uma abordagem que pode ser empregada é aquela adotada pela FDC (Resende; Cesar, 2019e). Ela projeta o crescimento de cada tipo de carga do cenário-base de 2015 para 2035, adiciona os novos investimentos previstos na infraestrutura de transportes e faz a realocação das futuras cargas na infraestrutura disponível, de acordo com os novos custos unitários de deslocamento e restrições de capacidade da infraestrutura projetada.

Assim, a nova infraestrutura reflete um cenário otimizado, que, de acordo com Resende e Cesar (2019e, p. 10), "simula um portfólio ampliado com projetos selecionados para romper gargalos e inserir ligações faltantes na rede até 2035". A nova realocação dos fluxos de carga na infraestrutura projetada para 2035 proporciona uma nova configuração para a matriz logística, conforme mostrado na Tabela 5.

A nova matriz de transportes projeta uma participação agregada do modo rodoviário em 47,7%, do ferroviário em 36,7%, do aquaviário em 12,6% e do dutoviário em 3,0%. Isso representa uma redução de 8,9 pontos percentuais (p.p.) de participação do transporte rodoviário (menos eficiente) em benefício dos demais modos (considerados mais eficientes). O que mais cresce em participação é o ferroviário, com acréscimo de 13,2 p.p. O dutoviário ganha participação marginal em 0,4 p.p., porém o aquaviário perde 4,7 p.p. na nova configuração. A nova matriz pode ser considerada equilibrada, pois apresenta distribuição semelhante entre a TKU rodoviária e a dos demais modos eficientes, com ligeira vantagem para estes, em 52,3% contra 47,7%.

Analisando-se a segmentação por tipologia de cargas, as maiores alterações relativas são registradas em granéis agrícolas, que perdem participação nas rodovias em 24,7 p.p., migrando principalmente para ferrovias, que ganham expressivos 31,5 p.p. de participação. Granéis líquidos perdem 12,6 p.p. de participação rodoviária e 17,2 p.p. do modo hidroviário, migrando fortemente para o ferroviário, que ganha 27,0 p.p. de inserção nesse tipo de carga. Dutoviário também ganha participação no granel líquido, porém sua inserção é baixa nesse modo de transporte. Carga geral e granéis minerais sofrem pouca alteração na transição intermodal, porém migram principalmente para ferrovias. Para os granéis minerais, a migração segue uma lógica natural, já que a ferrovia é um modo cativo para esse tipo de carga. Quanto à carga geral, embora a transferência percentual seja tímida (redução de 2,7% na rodovia e acréscimo de 4% na ferrovia), a TKU da carga geral representa 43% da totalidade, a maior entre os tipos de carga. Além disso, poderia haver uma política pública de maior incentivo à migração desse tipo de carga da rodovia para a ferrovia, dado que já existe uma sobreposição razoável entre as maiores rotas rodoviárias e as ferrovias existentes e projetadas; contudo, essa diretriz não é inserida no modelo de simulação.

Tabela 5. **Matriz logística projetada para 2035 segmentada por tipo de carga e modo de transporte**

TIPO DE CARGA	TOTAL TKU (BILHÕES T X KM)		RODOVIÁRIO (%)			FERROVIÁRIO (%)			AQUAVIÁRIO (%)			DUTOVIÁRIO (%)		
	2015	2035	2015	2035	Δ%	2015	2035	Δ%	2015	2035	Δ%	2015	2035	Δ%
Carga geral	747,11	1.034,88	82,4	79,7	-2,7	4,6	8,6	4,0	13,0	11,7	-1,3	0,0	0,0	0,0
Granéis minerais	488,12	765,11	15,0	9,7	-5,3	62,6	71,5	8,9	17,0	13,6	-3,4	5,4	5,2	-0,2
Granéis agrícolas	196,44	286,53	65,0	40,3	-24,7	19,3	50,8	31,5	15,7	8,9	-6,8	0,0	0,0	0,0
Granéis líquidos	220,74	303,81	54,0	41,4	-12,6	4,5	31,5	27,0	33,7	16,5	-17,2	7,8	10,5	2,7
Total	**1.652,41**	**2.390,33**	**56,6**	**47,7**	**-8,9**	**23,5**	**36,7**	**13,2**	**17,3**	**12,6**	**-4,7**	**2,6**	**3,0**	**0,4**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e).

Emissões evitadas como resultado da matriz de transporte mais equilibrada

Uma vez determinado um cenário para a demanda por transporte de carga em 2035, o cálculo das emissões evitadas pode ser feito mediante uma comparação com o ano-base de 2015. Inicialmente, é necessário construir um cenário-base de comparação, ou seja, o total da TKU projetado para o ano de 2035, com a reprodução da distribuição modal de 2015. Logo, o cenário-base representa uma situação hipotética do aumento da TKU em decorrência do crescimento econômico, sem que haja alteração na matriz de transportes. A seguir, projeta-se o total de TKU para 2035 com a repartição modal estimada por Resende e Cesar (2019e), denominado cenário projetado. A comparação entre os dois cenários reflete as diferenças na redistribuição das cargas pelos modos de transporte, apresentadas na Tabela 6.

O próximo passo consiste na determinação das emissões de CO_2 por modo de transporte e tipo de carga. Essa estimação foi apresentada na Tabela 1, porém faltam algumas adaptações para que se possa traduzir diretamente a relação entre TKU e emissões. Inicialmente, a divisão modal trata agregadamente o transporte aquaviário, enquanto a Tabela 1 segmenta as emissões entre cabotagem e hidroviário. De forma simplificada, considerou-se que, entre os modos aquaviários, as cargas minerais e agrícolas viajam predominantemente por hidrovias; os granéis líquidos, por cabotagem; e a carga geral se distribui igualmente entre hidrovias e cabotagem. Nesse sentido, considera-se, para as cargas minerais e agrícolas, apenas a emissão hidroviária. Para líquidos, considera-se a emissão da cabotagem; e, para a carga geral, a média simples entre as emissões hidroviária e da cabotagem. A Tabela 1 também omite as emissões do modo dutoviário. Considerou-se, para esse modo, o mesmo valor de 3,9 kg de CO_2/mil TKU[4] para todos os tipos de cargas (Branco; Bartholomeu; Vettorazzi, 2020).[5]

4 Branco, Bartholomeu e Vettorazzi (2020) apresentam um valor de emissão de 3,9 g de $CO_2/m^3.km$. Considerou-se para todos os efeitos que 1 m^3 corresponde a 1 t.

5 Embora as simplificações adotadas para estimação das emissões aquaviária e dutoviária mereçam críticas, elas representam pouco impacto no balanço das emissões.

Tabela 6. **Total de TKU para 2015 e 2035, segmentado por modo de transporte**

TIPO DE CARGA	TOTAL TKU (BILHÕES T X KM)		RODOVIÁRIO (%)			FERROVIÁRIO (%)			AQUAVIÁRIO (%)			DUTOVIÁRIO (%)		
	2015	2035	TKU 2035 com matriz de 2015	TKU 2035 com matriz de 2035	Δ%	TKU 2035 com matriz de 2015	TKU 2035 com matriz de 2035	Δ%	TKU 2035 com matriz de 2015	TKU 2035 com matriz de 2035	Δ%	TKU 2035 com matriz de 2015	TKU 2035 com matriz de 2035	Δ%
Carga geral	747,11	1.034,88	852,74	824,80	-27,94	47,60	89,00	41,40	134,53	121,08	-13,45	-	-	-
Granéis minerais	488,12	765,11	114,77	74,22	-40,55	478,96	547,05	68,09	130,07	104,05	-26,01	41,32	39,79	-1,53
Granéis agrícolas	196,44	286,53	186,24	115,47	-70,77	55,30	145,56	90,26	44,99	25,50	-19,48	-	-	-
Granéis líquidos	220,74	303,81	164,06	125,78	-38,28	13,67	95,70	82,03	102,38	50,13	-52,26	23,70	31,90	8,20
Total	**1.652,41**	**2.390,33**	**1.317,81**	**1.140,26**	**-177,55**	**595,54**	**877,31**	**281,78**	**411,97**	**300,77**	**-111,21**	**65,01**	**71,69**	**6,67**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e).

As emissões evitadas e acrescidas por modo de transporte e tipo de carga são obtidas pela simples multiplicação das emissões unitárias (Tabela 1, com os complementos citados) e a variação de TKU entre o cenário-base e o projetado (Tabela 6). O resultado é mostrado na Tabela 7, cujos números negativos representam emissões evitadas, enquanto os positivos revelam as acrescidas.

Tabela 7. Balanço de emissões por modo de transporte e tipologia de cargas

MODO DE TRANSPORTE	BALANÇO DE EMISSÕES (MIL T CO_2)				
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral	Total
Rodoviário	-27%	-30%	-25%	-17%	-8.742,61
Ferroviário	16%	41%	16%	27%	3.662,40
Aquaviário	-14%	-11%	-52%	-23%	-485,30
Dutoviário	-23%	0%	123%	0%	26,02
Total	**-1.882,36**	**-1.191,61**	**-1.820,03**	**-645,48**	**-5.539,48**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e), EPL e Iema (2021) e Branco, Bartholomeu e Vettorazzi (2020).
Nota: A leitura da tabela deve ser feita da seguinte maneira: por exemplo, a emissão do granel mineral pelo modo rodoviário é 27% multiplicado por -8.742,61. Nesse caso, o resultado é negativo; portanto, trata-se de emissão evitada na comparação entre o cenário-base e o projetado.

Constata-se que o rebalanceamento da matriz de transporte proporciona que se evite a emissão de 5,54 milhões de toneladas de CO_2 na atmosfera por ano, uma redução de 7,1% no total de emissões.

Outra conclusão interessante que pode ser extraída é o ganho marginal em emissões na transferência de cargas da rodovia para modos eficientes, ou seja, quanto cada TKU transferida do caminhão para outros modos de transporte significa em percentual de redução de emissões. Esse resultado pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8. Ganho marginal na transferência de cada TKU da rodovia para os demais modos de transporte (%)

RELAÇÃO ENTRE MODOS DE TRANSPORTE	EMISSÕES			
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral
Rodo/ferro	85,3	55,4	87,5	56,3
Rodo/hidro	95,4	92,6	91,7	86,5
Rodo/cabotagem	92,6	88,2	91,6	83,3
Rodo/duto	93,4	-	93,2	-

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e), EPL e Iema (2021) e Branco, Bartholomeu e Vettorazzi (2020).

Observa-se na Tabela 8 que a transferência de 1 TKU da rodovia para a ferrovia representa 56,3% em redução de emissões no pior dos casos (carga geral), ou 95,4% no melhor dos casos (transferência de granel mineral da rodovia para a hidrovia). Dito de outro modo, cada TKU de carga geral transferida da rodovia para a ferrovia emite 2,3 vezes menos CO_2 até o limite de 21,9 vezes na transferência do granel mineral da rodovia para a hidrovia. Isso reforça o grande potencial de reduções que se tem na transferência entre modos de transporte, sendo muito difícil atingir o mesmo patamar de mudança apenas com ganhos de eficiência intramodais.

CONCLUSÃO

A proposta deste artigo foi mostrar como uma mudança estrutural na matriz de transporte brasileira, traduzida pela transferência de carga do setor rodoviário para outros modos de transporte mais eficientes, pode resultar em ganhos substancialmente superiores àqueles proporcionados pelas melhorias intrínsecas aos modos de transporte no esforço de descarbonização. Tanto os ganhos marginais quanto os ganhos potenciais da proposta de migração de cargas são largamente superiores aos esforços das medidas intrínsecas.

O artigo explora também o potencial de migração de cargas da rodovia para modos eficientes de transporte, utilizando estudos desenvolvidos por Resende e Cesar (2019e), que partem de uma matriz de transporte originalmente mais equilibrada e, portanto, com menor potencial de transferência de carga para sistemas mais eficientes. A escolha por esses estudos fundamenta-se no fato de serem mais detalhados na segmentação por modo e tipo de carga do que o PNL 2025 (EPL, 2018). Além disso, nos estudos de Resende e Cesar (2019e), o potencial de mitigação anual de CO_2 fica em torno de 5,5 milhões de toneladas por ano, a ser atingido em um horizonte de vinte anos, enquanto o resultado do PNL aponta um potencial de 22 milhões de toneladas a ser obtido em dez anos, o que parece menos plausível.

Apesar da divergência quanto ao ganho potencial entre os dois estudos, é importante ressaltar que o espaço para mitigar a emissão de CO_2 em cada TKU transferida do caminhão para os demais sistemas de transporte é superior aos esforços de redução derivados de aprimoramento de motores, substituição de

fontes de propulsão ou qualquer outra iniciativa de incremento de eficiência intrínseca ao modo de transporte. Além disso, o potencial de transferência de cargas pode ir muito além daquele proporcionado pela implantação de um *pipeline* de projetos mapeados, como parecem mostrar os dados de países como Rússia, Canadá, Austrália, China e Estados Unidos.

Naturalmente, a ênfase na transferência de cargas do rodoviário para os demais modos não deve ser perseguida como única solução para o desafio da descarbonização do transporte de cargas. Ganhos de eficiência intrínsecos a cada modo de transporte podem ter impactos relevantes no conjunto de alternativas, particularmente quando aplicados ao transporte rodoviário, que tem participação superior na matriz de transportes e eficiência energética substancialmente inferior. Além disso, nos espaços urbanos, o uso de caminhões de pouca (ou mesmo zero) emissão é uma demanda cada vez mais comum em favor da saúde pública. Não se pode omitir, no entanto, soluções mais factíveis e menos custosas, ainda que com contribuição mais limitada, como, por exemplo, a utilização do gás natural, especialmente biometano, para os motores; o uso intensivo de tecnologias da informação para gerar mais eficiência nos trajetos; aprimoramentos nos equipamentos de transporte que gerem menor arrasto; entre outras.

Adiciona-se que as alternativas de descarbonização não podem ser pensadas dissociadas do custo de implantação. O fato de o transporte rodoviário ter maior participação na matriz logística decorre principalmente do custo de implantação, expansão e manutenção ser menor que o dos demais modos, principalmente o ferroviário. Além disso, nos investimentos rodoviários, o custo do equipamento (caminhão) não onera o projeto, diferentemente do investimento ferroviário, em que a infraestrutura não é dissociada da operação. Ademais, o transporte rodoviário é muito mais flexível em termos de escala e escopo. Pequenos volumes, curtas distâncias e qualquer tipo de carga podem ser facilmente atendidos por caminhões, diferentemente dos demais transportes, que só são competitivos quando operam em grande escala, além de apresentarem menor flexibilidade nos tipos de cargas que podem ser transportadas.

Por fim, cabe destacar que, embora o esforço por melhorias intrínsecas aos modos de transporte para ganho de eficiência e redução de emissões seja

prioritariamente uma contribuição da iniciativa privada, o principal agente na transformação estrutural do transporte no Brasil em benefício do meio ambiente é a iniciativa pública, que executa o trabalho de planejamento e regulação com incentivo aos operadores para que essa transformação aconteça. O poder público é quem melhor pode equacionar o conjunto de benefícios diretos e externalidades *vis-à-vis* seus custos de implantação, assumindo eventuais custos afundados, riscos de projeto, provendo *funding* e estruturando o financiamento de longo prazo.

REFERÊNCIAS

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Autorizações ferroviárias. *ANTT*, Brasília, DF, [2024]. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOTQ2MGM4MDUtMmVlYi00MGNmLWFiYjAtMDY0OTJkZWI4OTNiIiwidCI6Ijg3YmJlOWRlLWE4OTItNGNkZS1hNDY2LTg4Zjk4MmZiYzQ5MCJ9. Acesso em: 18 jan. 2024.

BRANCO, E. H. *et al*. Ações e políticas para redução da emissão de CO_2 no transporte de cargas do Brasil. *Transportes*, [*s.l.*], v. 31, n. 2, p. e2415, 2023. DOI: 10.58922/transportes.v31i2.2415. Disponível em: https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2415. Acesso em: 23 jan. 2024.

BRANCO, J. E. H.; BARTHOLOMEU, D. B.; VETTORAZZI, A. C. Avaliação das emissões de CO_2 na etapa de transporte do etanol: aplicação de um modelo de otimização. *Transportes*, [*s.l.*], v. 28, n. 1, p. 63-80, 2020. DOI:10.14295/transportes.v28i1.1856. Disponível em: https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1856. Acesso em: 23 jan. 2024.

BRASIL. *Lei nº 14.273 de 23 de dezembro de 2021*. Estabelece a Lei das Ferrovias; altera o Decreto-Lei nº 3.365, de 21 de junho de 1941, e as Leis nºs 6.015, de 31 de dezembro de 1973, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.636, de 15 de maio de 1998, 10.233, de 5 de junho de 2001, 10.257, de 10 de julho de 2001, 10.636, de 30 de dezembro de 2002, 12.815, de 5 de junho de 2013, 12.379, de 6 de janeiro de 2011, e 13.448, de 5 de junho de 2017; e revoga a Lei nº 5.917, de 10 de setembro de 1973. Brasília, DF: Presidência da República, 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14273.htm#:~:text=Art.,associadas%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAncias. Acesso em: 23 jan. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. 6ª edição. Brasília, DF: MCTI, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf. Acesso em: 1º jul. 2024.

DALTO, E. J.; CASTRO, N. T. de S.; PASSOS, P. dos. Shortlines: o desafio de implantá-las no Brasil. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 29, n. 57, p. [5]-71, mar. 2023. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/23092/1/PRArt_BS%2057_Shortlines_215858.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

EPE – EMPRESA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. *Balanço Energético Nacional*: Relatório Síntese 2023. Brasília, DF: EPE, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

EPL – EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA; IEMA – INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. *Metodologia EPL-IEMA para emissões de GEE e poluentes locais.* São Paulo: Iema, 2021. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/produto/metodologia-epl-iema-para-emissoes-de-gee-e-poluentes-locais#:~:text=Metodologia%20EPL-IEMA%20para%20emissões%20de%20GEE%20e%20poluentes%20locais,-Veja%20dados%20da&text=Apresenta%20estimativas%20realizadas%20pelo%20IEMA,Logística%202025%20(PNL%202025). Acesso em: 27 out. 2023.

EPL – EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA. – *Plano Nacional de Logística PNL – 2025*: relatório executivo. [*S.l.*]: EPL, 2018. Disponível em: https://www.ppi.gov.br/wp-content/uploads/2023/01/plano-nacional-de-logisticapnl.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

EUROSTAT. EUROPEAN COMMISSION. Database. *Eurostat*, [Luxemburgo], 2024. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database. Acesso em: 23 jan. 2024.

ITF – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. *Decarbonising Argentina's Transport System*: Charting the Way Forward. ITF, Paris, 2020.

OECD – ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. OECD.Stat. OECD, [*s.l.*], [2024]. Disponível em: https://stats.oecd.org/. Acesso em: 23 jan. 2024.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. D*iagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no Brasil*: cenário otimizado. Foco no transporte de carga geral. Belo Horizonte: FDC/Plataforma de Infraestrutura Logística de Transportes – PILT, 2019a. Disponível em: https://nucleos.fdc.org.br/logistica/pilt/. Acesso em: 23 jan. 2024.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. *Diagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no Brasil*: cenário otimizado. Foco no transporte de granéis líquidos. Belo Horizonte: FDC/Plataforma de Infraestrutura Logística de Transportes – PILT, 2019b. Disponível em: https://nucleos.fdc.org.br/logística/pilt/. Acesso em: 23 jan. 2024.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. *Diagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no Brasil*: cenário otimizado. Foco no transporte de granéis sólidos agrícolas. Belo Horizonte: FDC/Plataforma de Infraestrutura Logística de Transportes – PILT, 2019c. Disponível em: https://nucleos.fdc.org.br/logistica/pilt/. Acesso em: 23 jan. 2024.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. *Diagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no Brasil*: cenário otimizado. Foco no transporte de granéis sólidos não agrícolas. Belo Horizonte: FDC/Plataforma de Infraestrutura Logística de Transportes – PILT, 2019d. Disponível em: https://nucleos.fdc.org.br/logistica/pilt/. Acesso em: 23 jan. 2024.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. *Diagnóstico e projeções para a infraestrutura em logística de transportes no Brasil*: cenário otimizado. [Belo Horizonte]: Fundação Dom Cabral, 2019e. Disponível em: https://ci.fdc.org.br/AcervoDigital/Relatórios%20de%20Pesquisa/Relatórios%20de%20Pesquisa%202019/Diagnóstico%20e%20projeções%20para%20a%20infraestrutura%20em%20logistca%20de%20tranportes%20no%20Brasil.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

REVISTA FERROVIÁRIA. Bamin vence leilão de ferrovia e plano é investir R$ 14 bilhões. *Revista Ferroviária*, [*s. l.*], 9 abr. 2021. Disponível em: https://revistaferroviaria.com.br/2021/04/bamin-vence-leilao-de-ferrovia-e-plano-e-investir-r-14-bilhoes/. Acesso em: 23 jan. 2024.

PRESIDENTE DA REPÚBLICA
Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTRO DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
Geraldo José Rodrigues Alckmin Filho

DIRETORIA DO BNDES

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

Editado pelo Departamento de Relacionamento da
Área de Relacionamento, Marketing e Cultura
2025

BNDES

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO,
INDÚSTRIA, COMÉRCIO
E SERVIÇOS

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO