
**Agenda 2050:
propostas para
descarbonizar e
(neo)industrializar
o Brasil**

Outubro/2025

www.lcaconsultores.com.br

Ficha Técnica do Relatório:

Agenda 2050: propostas para descarbonizar e
(neo)industrializar o Brasil

Equipe Técnica:

Fernando Camargo
Bráulio Borges
Maria Gabriela Mazoni
João Queiroz
Rafael Pacheco
Thaís Monello

Sumário

1.	Contextualização: Cadeia eólica no Brasil	4
2.	<i>Powershoring, nearshoring, friendshoring</i> : estratégias de localização e vantagens competitivas	15
3.	Posicionamento competitivo do Brasil.....	22
3.1.	Novos demandantes intensivos: Data Center.....	24
3.1.1.	IAG e demanda por energia renovável.....	24
3.1.2.	O mercado de Datacenters (DC) no Brasil, grandes números.....	25
3.1.3.	Datacenters, IA e Criptomoedas - Demanda Energética.....	27
3.2.	Datacenters, IAG e criptomoedas – panorama brasileiro	28
3.2.1.	Datacenters, IA e criptomoedas – análise de competitividade.....	29
3.2.2.	Datacenters, IA e Criptomoedas – medidas para assegurar a competitividade	30
3.2.3.	Datacenters, IA e Criptomoedas - Demanda Energética.....	31
3.3.	Novos demandantes intensivos: Eletrificação da mobilidade	32
3.3.1.	Eletrificação da mobilidade gerará demanda adicional de energia.....	32
3.4.	Hidrogênio de Baixo Carbono: H2V e rotas alternativas.....	36
3.4.1.	Demanda atual de H2	36
3.4.2.	H2 Verde: principal rota dos projetos presentes no Brasil	37
3.4.3.	Aplicações potenciais do H2 de Baixo Carbono: o caso do H2V	38
3.4.4.	Panorama internacional	39
3.4.5.	Potenciais demandantes H2V no Brasil.....	46
3.4.5.1.	Indústrias potencialmente demandantes do H2V – Siderurgia	47
3.4.5.2.	Potenciais usos industriais: Fertilizantes	49
3.4.5.3.	Utilização potencial de H2V em transportes de longo curso	52
3.5.	Projeções.....	57
3.5.1.	Caminhos da demanda por energia renovável.....	57
3.5.1.1.	Demanda direta por energia elétrica	57
3.5.1.2.	Demanda por energia elétrica via H2V.....	57
3.5.2.	Demanda potencial.....	57
3.5.3.	Projeções de demanda por energia renovável.....	62
3.5.3.1.	Demanda por energia renovável – descarbonização total.....	64
3.5.3.2.	Demanda por energia renovável – descarbonização moderada	65
3.5.3.3.	Demanda por energia renovável – descarbonização marginal.....	66

3.5.4. Projeções LCA e outros estudos.....	70
3.5.5. Cenários recentes para a produção de H2 no mundo até 2050.....	71
3.5.6. Riscos ao desenvolvimento da produção de H2 no mundo até 2050.....	72
4. Impactos econômicos.....	75
4.1. Estimativa dos Impactos Econômicos.....	76
4.2. Impactos econômicos – principais premissas.....	78
4.2.1. CAPEX (Bilhões R\$ de 2023) – Descarbonização total.....	79
4.2.2. PIB Adicional Anual (R\$ bilhões de 2023) – Descarbonização total.....	80
4.2.3. Empregos – Descarbonização total.....	81
4.3. CAPEX (Bilhões R\$ de 2023) – Descarbonização moderada.....	82
4.3.1. PIB Adicional Anual (R\$ bi de 2023) – Descarbonização moderada.....	83
5. Políticas Públicas – recomendações.....	90
5.1. Políticas Públicas - Princípios e programas orientadores.....	90
5.2. Políticas Públicas - Eixos das recomendações de curto e longo prazos.....	94
5.2.1. Fundo Clima, exigências de conteúdo local e <i>funding</i>	95
5.2.2. EcoInvest, política de importação:.....	97
5.2.3. Apoio a exportações de serviços de engenharia e equipamentos:.....	97
5.2.4. Garantir que a regulamentação da Lei do Hidrogênio de Baixo Carbono privilegie baixas emissões de GEE e maior adensamento das cadeias locais:.....	99
5.2.5. Apoio a novas demandas por digitalização e Datacenters:.....	100
5.2.6. Compras governamentais e contratação de energia elétrica:.....	100
5.2.7. Apoio à neointustrialização (cadeias demandantes de novos combustíveis):.....	101
5.2.8. Outros itens de financiamento à pesquisa e ao desenvolvimento regional:.....	102
Anexo I: Estudos e documentos Internacionais: tabelas resumo.....	103
Anexo II: Cenário Macro.....	105

1. Contextualização: Cadeia eólica no Brasil

O Brasil consolidou, na última década, uma cadeia de fabricação de equipamentos, partes e peças, soluções de engenharia de projetos e instalação, geração e operação de energia eólica bastante relevante, sendo um dos países com maior destaque global neste segmento.

- É o sexto país no mundo em capacidade instalada de energia eólica e foi o terceiro em acréscimo anual de capacidade em 2023, com investimentos da ordem de US\$ 49 bilhões de 2012 a 2023¹.
- Cada US\$ 1 gera US\$ 2,9 graças à criação de empregos e renda e a seus efeitos indiretos e induzidos, graças ao fato de até cerca de 80% dos equipamentos, partes e peças serem produzidos localmente².
- O PIB das regiões que contam com investimentos da cadeia eólica cresce 21,1% acima da média das regiões sem a presença da cadeia; o IDHM avança relativamente 20% mais³.

Há ainda impactos positivos expressivos ao meio ambiente: cerca de 3MM ton. de emissão de CO₂ evitada por mês, cerca de 38MM de certificados de energia renovável transacionados em 2023, contribuindo significativamente para a descarbonização da economia.

Entretanto, por uma série de razões que serão avaliadas em seguida, o setor padece da ausência de novos contratos de fabricação de equipamentos desde 2023!

¹ Fonte: BloombergNEF, 2023.

² Fonte: Bráulio Borges, LCA/IBRE-FGV, 2023.

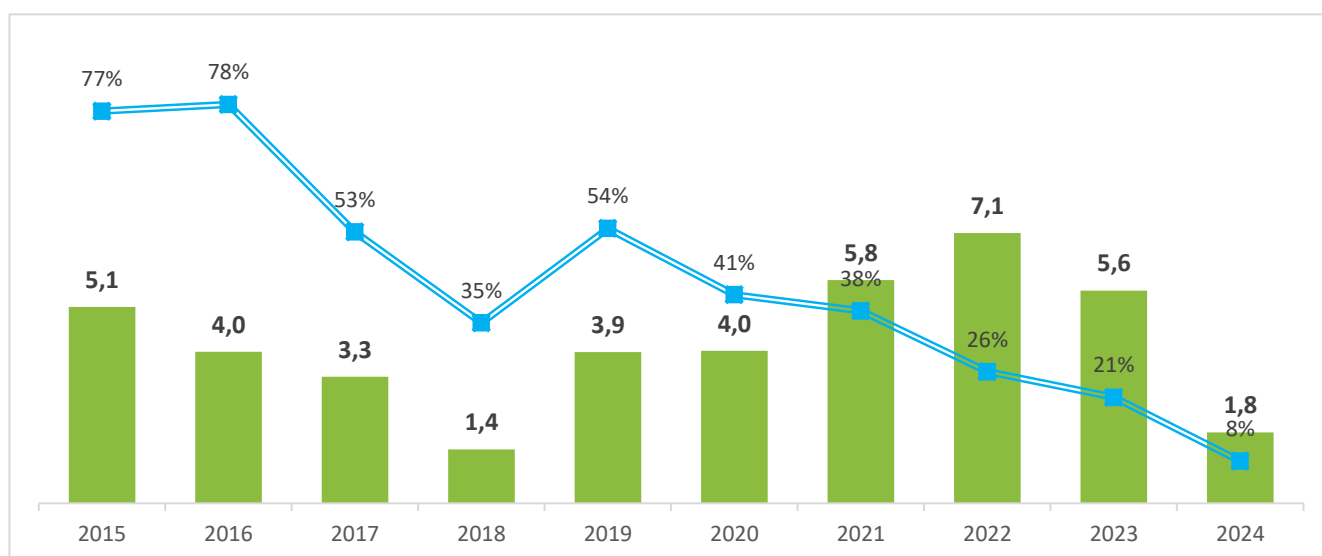
³ Fonte: GO Associados, 2023.

Situação atual da cadeia eólica no Brasil

Não obstante tenha se consolidado nas últimas décadas e seja uma fonte importante de inovação e geração de produto, empregos e tributos, o setor de energia eólica vem perdendo espaço nos últimos anos, apresentando volumes reduzidos de contratação desde 2022, movimento que se acentuou fortemente no período 2023-25. O gráfico abaixo sintetiza com clareza a redução do volume de contratação e do *share* de eólicas relativamente às demais fontes renováveis ao longo dos anos.

Representatividade da eólica em relação aos investimentos em renováveis

(em USD 2015-24 e em % das renováveis, Brasil).



FONTE: BNEF, 2024.

De fato, as condições atuais de operação da cadeia eólica no Brasil estão bastante adversas sobretudo por conta de **desequilíbrio entre oferta e demanda desencadeado pelo crescimento expressivo de sistemas de Mini e Microgeração Distribuída (MMGD) à base de painéis solares fotovoltaicos.**

Como consequência, houve cortes nas receitas de geração que totalizaram R\$ 5,2 bilhões (ou 28,3 TWh) entre 01/10/2021 e 31/10/2025 apenas para os parques eólicos (Fonte: Volt Robotics)⁴.

Apenas em 2025 estas perdas (*curtailment*) para eólicas atingiram de R\$ 2,4 bilhões⁵ (janeiro a agosto de 2025). Diante desse cenário, algumas empresas da cadeia produtiva do setor se movimentaram:

- Em 2023, Siemens Gamesa (aerogeradores) hibernou operações de fábrica em Camaçari/BA; a WEG paralisou linha de montagem e a Nordex decidiu reduzir a produção; outras empresas estudam suspender a produção;
- Em 2022, GE Renewable (aerogeradores) interrompeu a produção de turbinas eólicas no Brasil (posteriormente, em 2024, anuncia venda de sua planta na Bahia para a chinesa Goldwind);
- Entre 2023 e 2024, a Aeris Energy (fabricante de pás) demitiu cerca de 3000 funcionários em sua fábrica no Pecém (CE) e descomissionou linhas que abasteciam a Siemens Gamesa e GE Renewable.
- Em 2024, a Torres Eólicas do Nordeste (TEN), fabricante de torres eólicas, suspendeu suas atividades, em função da baixa demanda e das condições atuais do mercado;
- Em fevereiro de 2025, a GE Vernova fechou a fábrica da LM Wind Power em Suape (PE)⁶ por baixa demanda, enquanto a Aeris Energy, líder nacional no setor, enfrenta crise com mais de 700 demissões e prejuízos

⁴ Estudo elaborado por Volt Robotics para a Abeeólica, 2025.

⁵ Fonte: Estudo encomendado pela Abeeólica junto a Volt Robotics.

⁶[GE Vernova to close wind turbine blades plant in Brazil as demand falls | Reuters](#)

recordes.⁷

A falta de contratos para novas plantas de energia eólica resultou em um período de hibernação de diversas plantas da cadeia produtiva. O setor se preocupa com o risco de que as fábricas abandonem o Brasil, após anos de construção de uma cadeia complexa que levou mais de uma década para estruturar-se com foco no mercado local e sul-americano⁸.

Levantamento obtido junto à Abeeólica com base em dados identificados pelos fabricantes – Vestas, Nordex-Acciona, WEG, GE Vernova, Siemens Gamesa e GoldWind – revela um movimento preocupante de desligamentos:

OEMs (Fabricantes de Aeroogeradores e Pás)

Etapa de fabricação	Situação Atual	Demissões (2024-25)
Fabricantes de Pás	Redução de produção e fechamento de fábrica	~6.000
Fabricante de Aeroogerador	Redução de produção e fechamento de fábrica	~1.500
Total estimado de demissões em OEMs: + de 7.500		

Fornecedores de componentes, partes e peças variados

Etapa de fabricação	Situação Atual	Demissões (2024-25)
Fabricante de Torres	Suspensão de atividades	~1.500
Outros elementos (fixação, rolamentos, resinas, sistemas hidráulicos e outros)	Diversas situações (suspensão de atividades, redução de produção/descomissionamento de linhas produtivas)	~2.000
Total estimado de demissões em fornecedores: ~3.500		
Perda total estimada de empregos diretos no setor eólico entre 2024/25 = ~11.000		

⁷Crise na Aeris: prejuízo e demissões ameaçam futuro

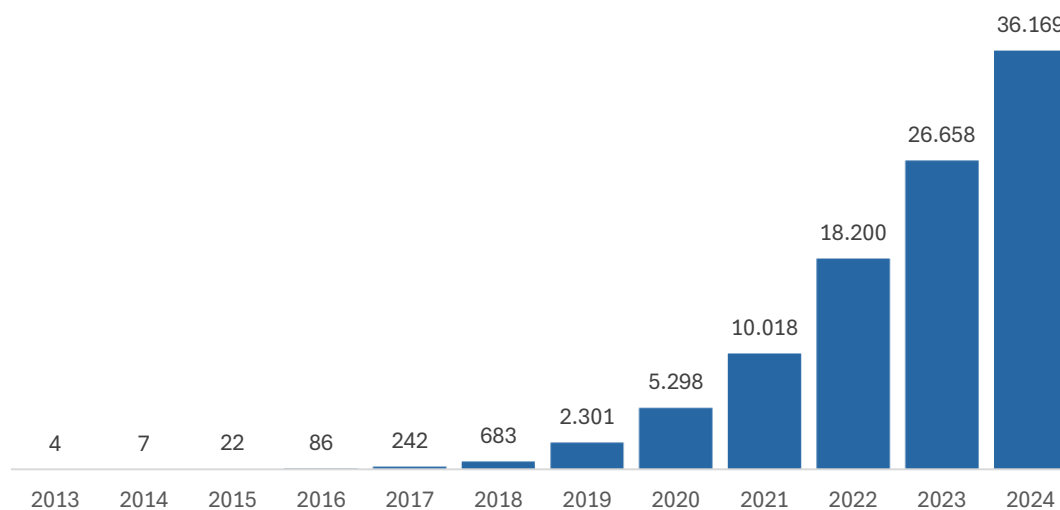
⁸ <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2024/04/16/desindustrializacao-do-setor-eolico-acende-alerta.ghtml>

Desequilíbrio entre oferta e demanda desencadeado pela geração distribuída

Como observado acima, o setor elétrico brasileiro vive um momento de sobreoferta em grande medida devido à expansão avassaladora da geração distribuída⁹, sobretudo da fonte solar fotovoltaica.

- Em fevereiro de 2025, o Brasil ultrapassou a marca de 5 milhões de unidades consumidoras (UCs) no segmento de geração distribuída* (GD), com mais de 3 milhões de sistemas conectados à rede elétrica e uma potência instalada próxima de 37,6 GW (Gráfico 1).
- A energia solar fotovoltaica domina o setor, representando mais de 99% das conexões (Gráfico 2)¹⁰.

Gráfico 1 - Capacidade instalada acumulada de geração distribuída (em MW)

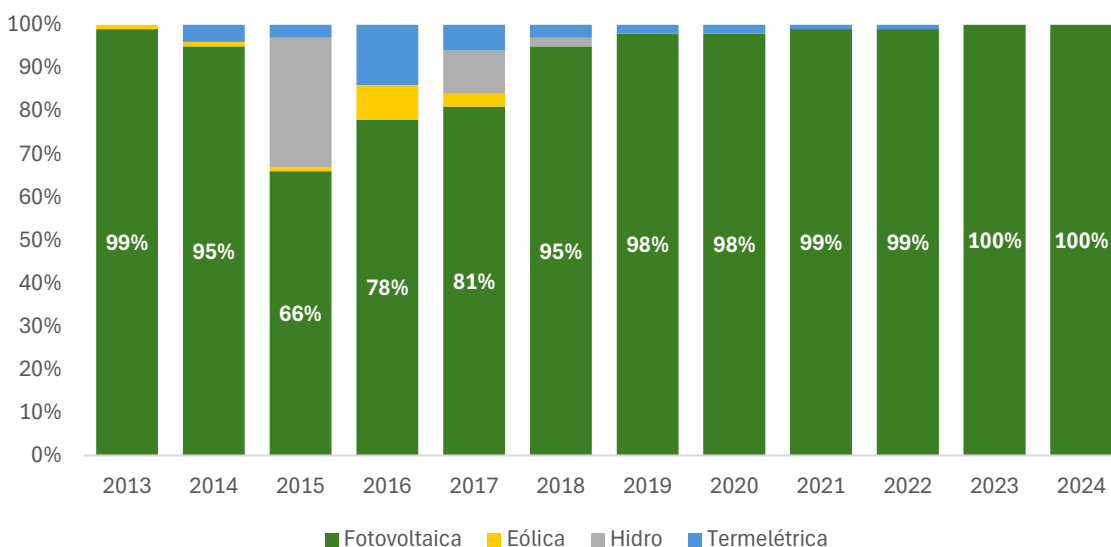


Fonte: [Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída EPE](#). Elaboração própria.

⁹ Geração Distribuída é a produção de energia elétrica de forma descentralizada, próxima ao ponto de consumo. A GD permite que consumidores, como residências, comércios e indústrias, gerem sua própria energia, normalmente por meio de fontes renováveis, como painéis solares fotovoltaicos, pequenas turbinas eólicas, biogás, ou pequenas centrais hidrelétricas. Essa energia é gerada em menor escala e, quando excede a demanda local, pode ser injetada na rede elétrica, resultando em redução na conta de luz do consumidor

¹⁰ [Geração distribuída ultrapassa 5 milhões de UCs no Brasil](#)

Gráfico 2 - Participação em potência de geração distribuída, por fonte



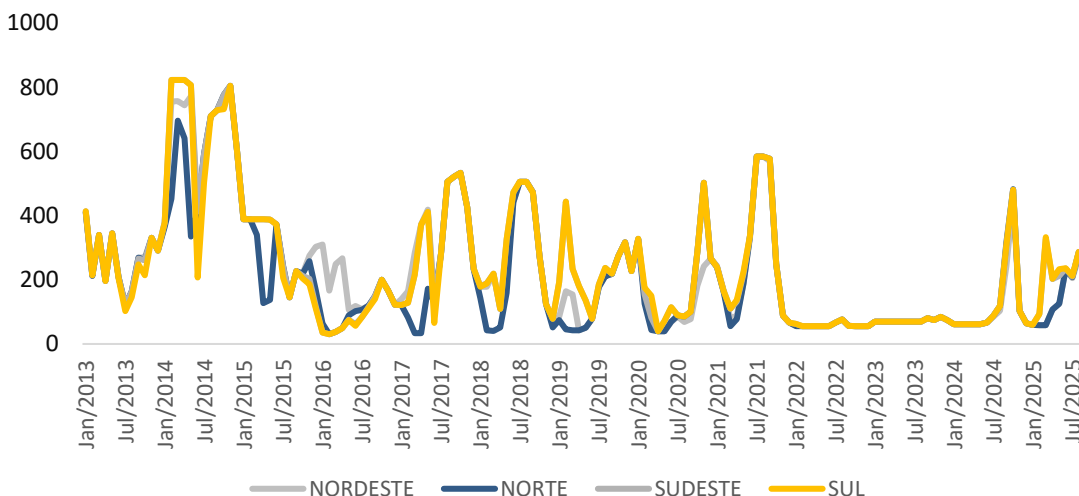
Fonte: [Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída](#) EPE. Elaboração própria.

Desequilíbrio entre oferta e demanda desencadeado pela geração distribuída: impactos sobre PLD

- Desde novembro de 2021, todos os submercados apresentaram queda significativa do PLD, que saiu da faixa de R\$250/MWh para R\$88, patamar mantido baixo desde então;
- Efeito hidrológico: reservatórios cheios reduziram a volatilidade do PLD desde meados de 2022, afetando por sua vez a oportunidade de expansão da oferta via eólicas;
- Mesmo o PLD médio tendo subido em 2025 por conta do período seco (R\$182/MWh em jan-set/25, acima da média de R\$126/MWh de 2024)¹¹, não há sustentação suficiente para a contratação das fonte eólica ou solar centralizada a longo prazo, que requerem compromissos de preços a médio ou longo prazos. Com isso, não há contratos para essas fontes desde 2023.

¹¹ Fonte: [Preço de Liquidação das Diferenças - Organizações - Dados CCEE](#)

Gráfico 3 - Histórico PLD média mensal (em R\$/MWh)

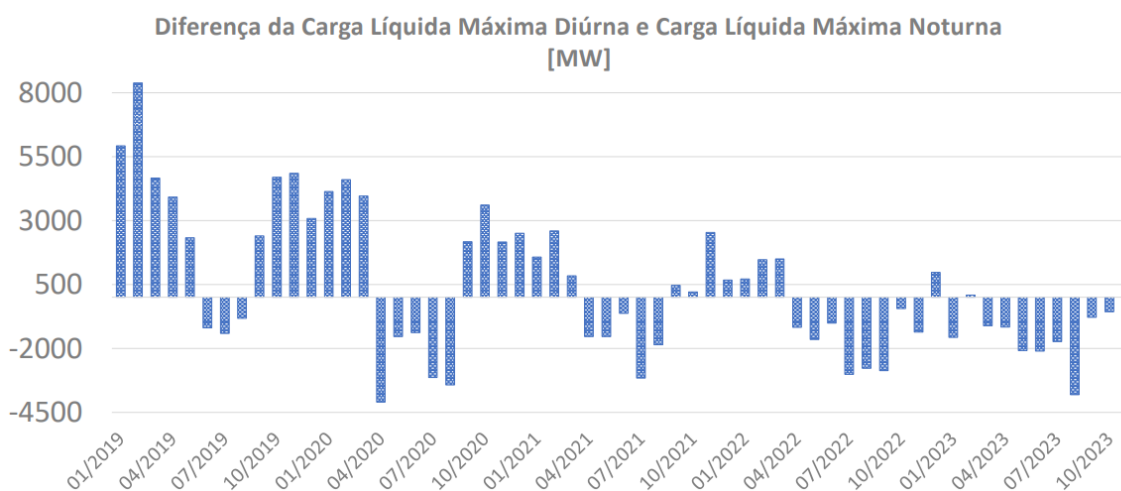


Fonte: [PLD_MEDIA_MENSAL - Conjunto de dados - Dados CCEE](#). Elaboração própria.

Mais evidências de desequilíbrio desencadeado pela geração distribuída

A diferença entre carga líquida máxima diurna e a carga líquida máxima noturna nos últimos anos ilustra a relevância da MMGD: diferença expressa volume injetado pela GD solar.

Figura 1: Diferença de Carga Líquida Máxima (diurna e noturna)



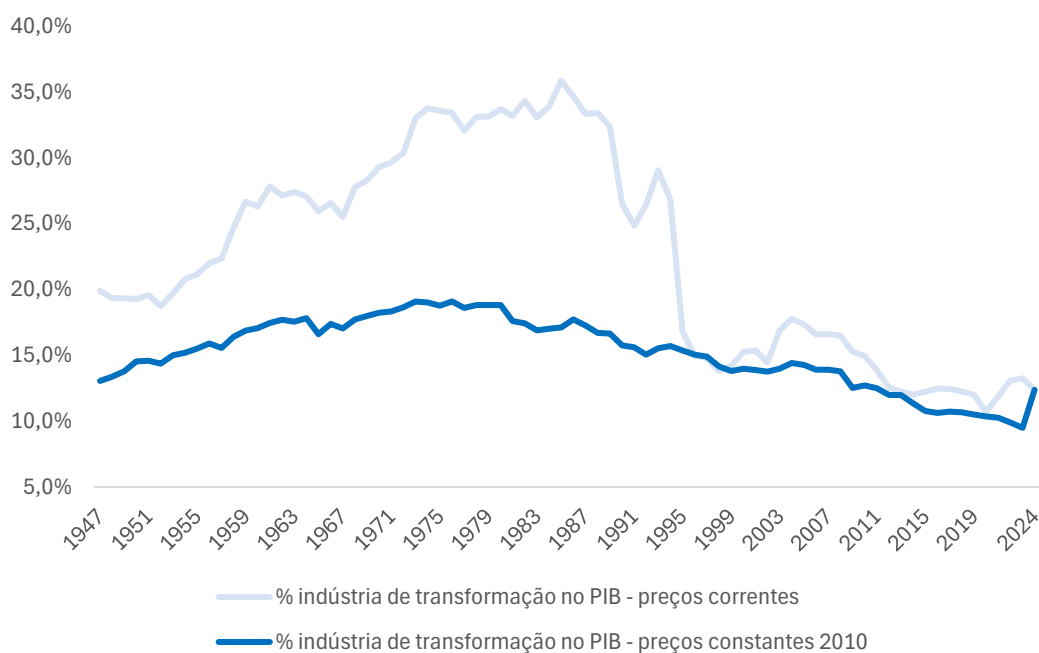
[PowerPoint Presentation \(ons.org.br\)](#)

Falta de competitividade da produção industrial brasileira

Uma breve análise da dinâmica da indústria brasileira dos últimos anos evidencia uma preocupação recorrente de nossos formuladores de política: a indústria brasileira vem perdendo espaço cada vez mais na economia como um todo e na pauta de exportações, ao passo que segue como um importador crescente de produto industrializados de alto valor agregado e tecnologia embarcada. Os números baixo evidenciam:

- Queda do share da indústria de transformação no valor adicionado total (37% em 1985, 14% em 2024);
- Queda do share das exportações industriais na pauta exportadora (75% em 1997, 53% em 2024)

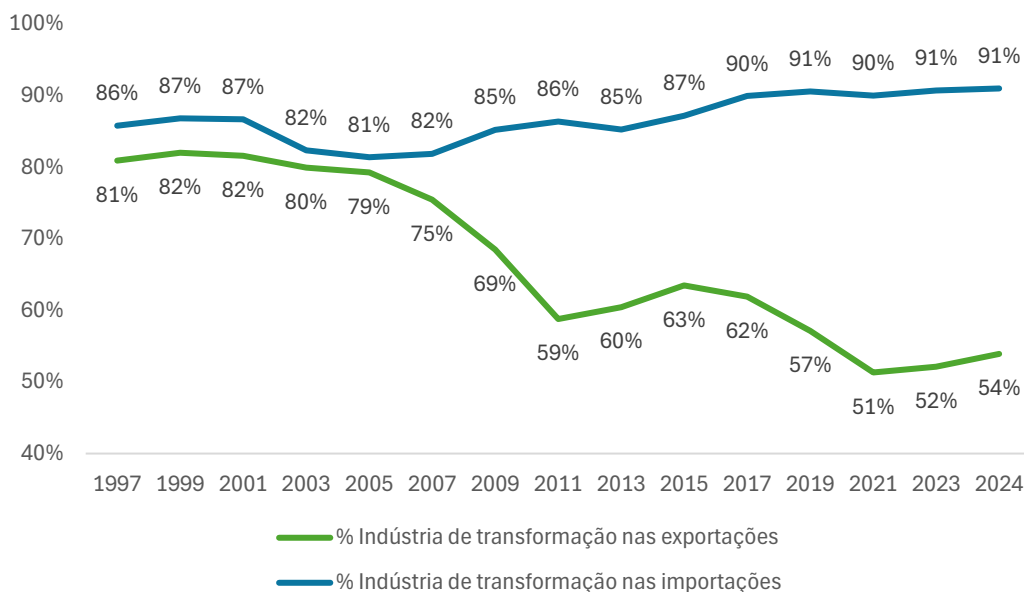
Gráfico 4 - Participação indústria de transformação no PIB (preços correntes x preços constantes 2010)



Fonte:

IBGE, Contas Nacionais e IPEADATA. Elaboração própria.

Gráfico 5 - Participação da indústria de transformação nas Exportações e Importações – em %

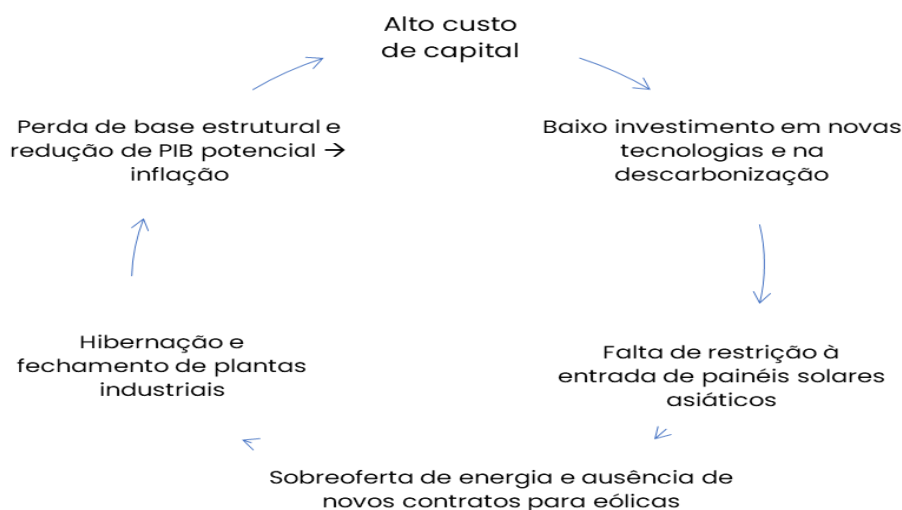


Fonte:

Fonte: MDIC ([Comex Stat - Dados Gerais](#)). Elaboração própria.

Fatores como elevado custo de capital; desvantagem tributária e redução importante dos instrumentos de apoio às exportações; escassez de mão-de-obra qualificada, entre outros, estão na base da falta de competitividade de nossa indústria.

Figura 2: Determinantes da falta de competitividade da indústria brasileira



Fonte: LCA, com base em Gesel – Estruturas de Financiamento para projetos de hidrogênio verde e derivados.

Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2024/06/TDSE-125-Financ-H2V.pdf>

Momento é crucial para capturar vantagens competitivas num futuro próximo

➤ Há um movimento intenso de valorização de fatores produtivos disponíveis no Brasil de forma competitiva, o que pode permitir ao país articular-se de forma vigorosa em novas fronteiras tecnológicas emergentes apoiadas em energia renovável e reformular suas bases produtivas a partir da renovabilidade;

➤ Mudanças em curso indicam que mercado de energias renováveis em geral, incluindo eólicas, será fortemente demandado a médio e longo prazos;

➤ É crucial manter a cadeia local ativa e robusta para potencializar este movimento:

- Os **grandes projetos eletrointensivos** em amadurecimento (que serão abordados nos capítulos seguintes) **irão requerer volumes expressivos de energia que, por sua vez, irão precisar de plantas locais que lhes atendam com agilidade, prioridade e especificidade;** não se pode correr o **risco de desmobilizar o parque local e, com isso, perder prioridade perante decisões estratégicas de suas matrizes,** voltadas a outros mercados com características diversas e volumes de demanda também crescentes. **É fundamental preservar a capacidade produtiva da cadeia eólica local;**

- Para além das prováveis dificuldades de atendimento, priorização e especificidade, **equipamentos e insumos importados terão mais carbono embarcado do que se seguissem fabricados no país** (dadas as matrizes elétricas menos renováveis fora do Brasil);

- Redução do poder multiplicador da cadeia e das externalidades positivas derivadas do ciclo de alta dos investimentos.

➤ Medidas que reponham a competitividade da cadeia eólica são cruciais para

assegurar a capacidade brasileira de comandar seu processo de descarbonização:

- Medidas se justificam pela forte presença de produção local, ameaçada em boa medida por razões conjunturais – e bastante agravada por fatores sistêmicos que já há um tempo vêm gerando distorções, como a expansão acelerada da geração distribuída;

- Medidas podem ainda mitigar, em parte, a concorrência representada por incentivos oferecidos por economias avançadas, o que agrava ainda mais a situação de desvantagem competitiva brasileira.

2. Powershoring, nearshoring, friendshoring: estratégias de localização e vantagens competitivas

Powershoring: Contexto global

Onda de investimentos em descarbonização e avanço tecnológico

- Governos e empresas de todo mundo empenhados em vultosos investimentos em descarbonização e digitalização de processos
 - EUA e UE têm programas bilionários (US\$ 369 bi e €\$ 1 tri, respectivamente) já em curso de incentivo a diversas iniciativas de produção local de itens ligados à transição energética (painéis solares, baterias para estocagem e para veículos, eletrolisadores, hidrogênio verde, biocombustíveis para aviação, navios etc.);
 - Escassez de energia e outros insumos renováveis são gargalos relevantes para suas ambições, o que pode levar a uma tendência de elevação da demanda acima da capacidade de oferta por um período considerável;
 - Conexão segura e disponibilidade de fontes renováveis de energia são principais gargalos.

Ainda assim, decisão dos governos de países desenvolvidos será priorizar a produção local (EUA e China), com intensificação de rivalidades e disputa acirrada por liderança;

A União Europeia adota a mesma estratégia, mas admite maior dependência de oferta global, dadas as limitações de insumos e recursos naturais. Espanha e Itália têm despontado como potenciais ofertantes, mas há limitações competitivas.

Em resumo, mundo se volta para dentro de suas fronteiras:

- Países centrais agindo para reconquistar protagonismo econômico e tecnológico em nível global, com produção local (*reshoring*);
- Disputas geopolíticas, conflitos armados, eventos climáticos e sanitários extremos evidenciam riscos do modelo de produção regionalmente concentrado, orientado somente pela minimização de custos no curto prazo e por elevadas escalas;
- Reação ao excesso de concentração na Ásia sob forte influência da China (menor resiliência a choques) tem levado governos a fomentarem produção local com subsídios e protecionismo explícitos;
- Cenário tem exigido posicionamento assertivo de Governos parceiros para assegurar padrões competitivos e atrair investimentos.

Estas tendências definem as novas estratégias de localização produtiva, que vêm se firmando em função das principais necessidades para as novas demandas: necessidade de energia, proximidade geográfica e parceria comercial – *powershoring*, *nearshoring* e *friendshoring* surgem como alternativas aos desafios produtivos contemporâneos:

- *Nearshoring* e *friendshoring*: realocação da produção em direção a geografias próximas aos centros de consumo e/ou alicerçada em relacionamento comercial e estratégico;
- *Powershoring*: realocação da produção em direção a países próximos e “amigos” e que possuem energia renovável, competitiva e confiável;

Assim, locais que conjuguem oferta segura e competitiva de energia renovável,

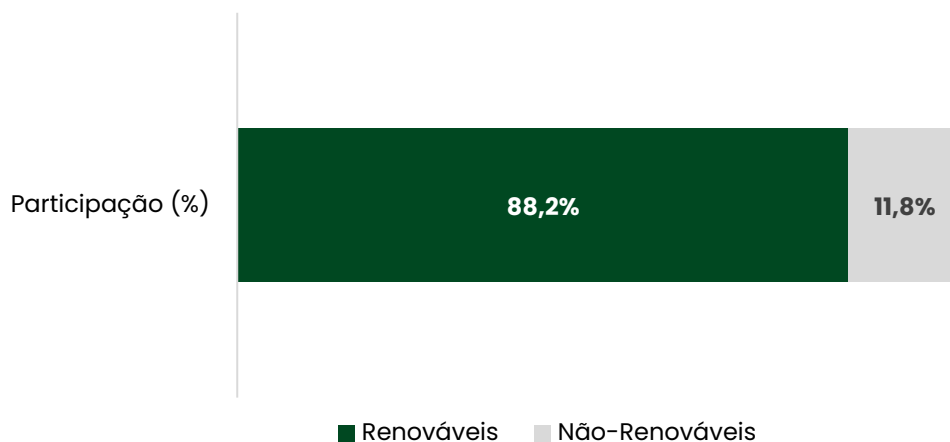
infraestrutura de interligação elétrica, regulação e ambiente de negócios estáveis e previsíveis podem atrair volumes relevantes de investimentos diretos.

Powershoring: Contexto local

O Brasil apresenta uma série de vantagens competitivas relevantes na definição das estratégias de localização de novos investimentos baseados em energia renovável:

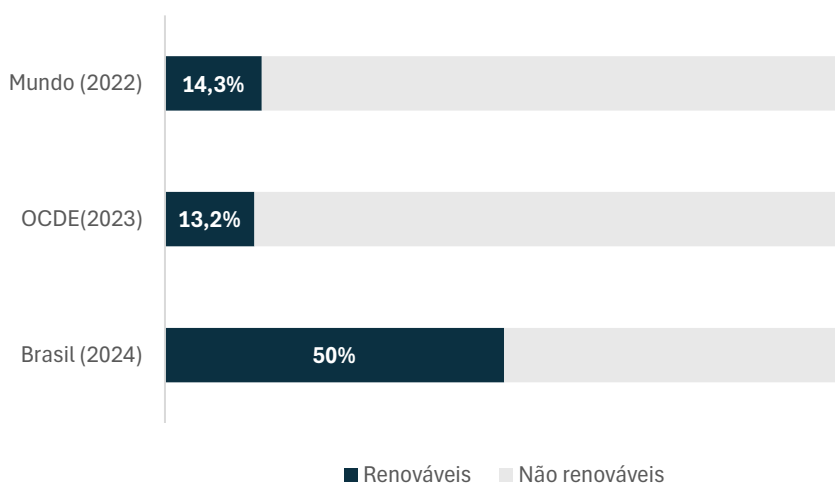
- Matriz elétrica e energética com elevado conteúdo renovável;
- Recursos naturais, matérias-primas e resíduos de origem renovável abundantes;
- Cadeias produtivas de energia renovável estabelecidas;
- Setor bioenergético expressivo (etanol, biodiesel, biometano; potencial relevante para produção de SAF e outros novos bioenergéticos);
- Posição geográfica privilegiada para as principais fontes de energia, sobretudo na região Nordeste, para atender mercados demandantes na Europa, costa leste dos EUA, América Latina;
- **Multiplicador de investimentos no Brasil permite que incentivos às novas cadeias de energia renovável gerem externalidades econômicas positivas substanciais, com geração de empregos, renda e tributos.**

Gráfico 6 - Matriz Elétrica Brasileira (2024)*



(*) 2025, jan-ago.

Gráfico 7 - Matriz Energética – Oferta Interna de Energia (OIE)



Fontes: EPE, ANEEL, OIE. Elaboração: LCA Consultores.

No entanto, há outras questões cruciais que requerem ações públicas coordenadas, necessárias para atrair e viabilizar investimentos numa estratégia bem-sucedida de *powershoring*. Entre outras questões – que serão tratadas mais adiante em seção específica para sugestões de política pública –, vale destacar algumas mais relevantes:

- Necessidade de avançar no estabelecimento de marcos regulatórios estáveis e claros com incentivos a segmentos de fronteira (a exemplo do Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, que, no entanto, ainda carece de regulamentação; e da Lei do Combustível do Futuro, em início do processo de regulamentação);
- Regramento básico do programa de apoio ao segmento de **datacenter**; marco regulatório para exploração de **eólicas offshore**; estabelecimento de limites de emissão e estruturação básica do **mercado regulado de crédito de carbono**; programa de apoio a investimentos em **mineração e beneficiamento de minerais sensíveis para a transição energética** e para a **produção de baterias**, programa de apoio a investimentos em **descarbonização de processos industriais** relevantes (que requerem maiores modificações para a descarbonização, como siderurgia, fertilizantes, química e petroquímica, cimento, minerais não metálicos etc.), entre outros;
- Criar tempestivamente as condições normativas e regulatórias para viabilizar a **conexão e a expansão do grid**, com estratégias para antecipar investimentos para que a conexão não se torne gargalo a investimentos que requerem altas cargas de energia elétrica;
- (Re)Ativar relacionamento comercial e estratégico de alto nível com países centrais para atrair investimentos, particularmente em segmentos intensivos em energia;
- Apoiar e promover a exportação de serviços de engenharia e equipamentos para permitir a ocupação eficiente da capacidade produtiva local;

- Apoiar a internalização de novas cadeias produtivas (eletrolisadores, centros de desenvolvimento de IA, data centers, mineração e refino para produção de baterias);
- Avançar na regulação de novas frentes para a produção de energia renovável, a exemplo do marco das eólicas *offshore*, que serão necessárias para o potencial de suprimento das novas cargas emergentes;

Brasil: primeira e próxima sede de acordos globais sobre mudanças climáticas

- 1992, **Rio 92**: Introduz as mudanças climáticas no rol de preocupações globais;
- 1997, **Protocolo de Kyoto**: Traz as primeiras metas quantitativas de redução das emissões de GEEs;
- 2015, **Acordo de Paris**: Grandes avanços com o (i) estabelecimento das NDCs (do inglês *Nacional Determined Contributions*, ou Contribuições Nacionais Determinadas) e (ii) criação do mercado de carbono para compensações entre emissores e poupadores líquidos (Art. 6). O Brasil comprometeu-se a reduzir suas emissões em 43% até 2030, além de reflorestar 12 milhões de hectares de florestas;
- 2021, **COP 26**: Realizada em Glasgow, na Escócia, teve como principal meta limitar o aquecimento global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Também se estabeleceu um consenso sobre as regras básicas para o funcionamento dos instrumentos de mercado de carbono previstos no artigo 6 do Acordo de Paris;
- 2023, **COP 28** (Dubai): Primeiro acordo global a prever a redução gradual da utilização de combustíveis fósseis e implementação da transição energética; compromisso de 193 países em triplicar a produção de renováveis até 2030;

-
- 2024, **COP 29** (Baku): Definição do **Novo Objetivo Coletivo Quantificado de Financiamento Climático (NCQG)**, estabelecido em US\$ 300 bilhões; início de negociação para o estabelecimento de metas e compromissos de redução do consumo de combustíveis fósseis.
 - 2025, **COP 30**: Será a primeira COP realizada em um Estado da Amazonia (**Belém/PA**). Dentre os **principais temas** estarão: **1) soluções de funding e financiamento para ações climáticas em países em desenvolvimento; 2) investimentos em resiliência e adaptação frente a eventos extremos; 3) tornar os Planos Nacionais de redução das emissões mais ambiciosos; e proteção da natureza e transformação dos sistemas alimentares.**

3. Posicionamento competitivo do Brasil

Metas ambientais, descarbonização e neoindustrialização:

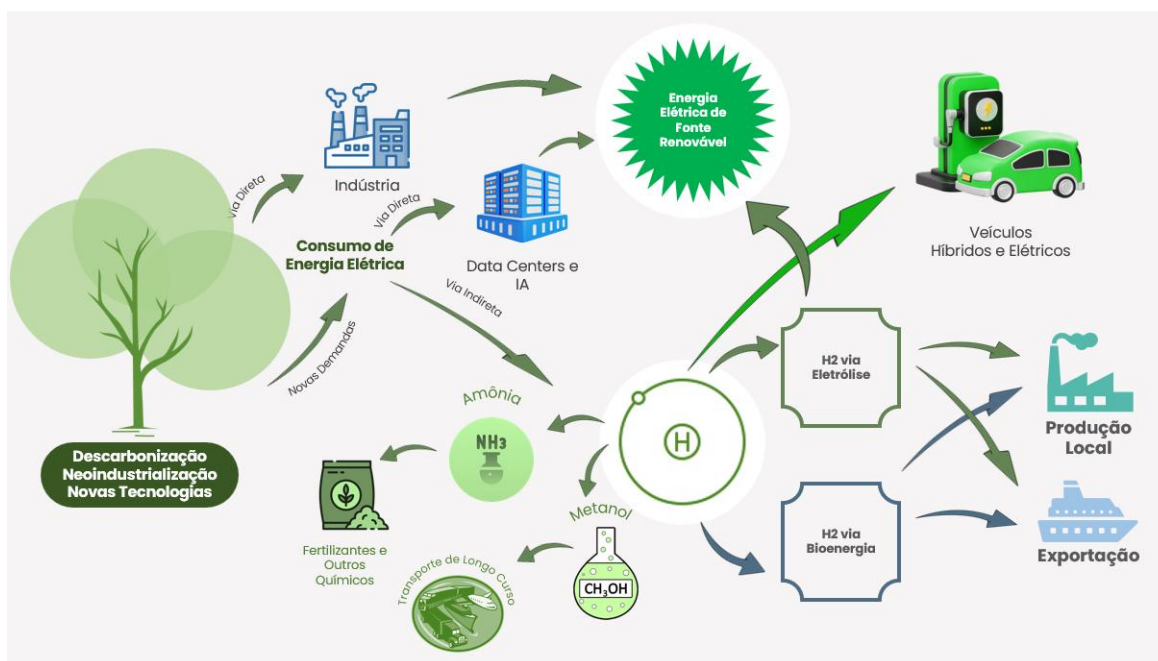
- Metas ambientais estabelecidas em acordos internacionais devem impulsionar a demanda por energia renovável;
- Principais companhias de setores como mineração, siderurgia, fertilizantes, veículos e transportes de longo curso posicionam-se com relação às suas estratégias de descarbonização;
- Caminhos identificados:
 - Veículos: bioeletrificação (híbridos-leves, híbridos-full e híbridos plug-in) com presença ainda modesta, mas crescente, de elétricos 100% à bateria para veículos e caminhões leves; biocombustíveis para pesados, potencial de H2BC e derivados para longas distâncias (caminhões, trens, navios e aviões);
 - Indústria: movimento inicial de eletrificação direta em alguns processos industriais (aquecimento, caldeiraria) e número crescente de projetos intensivos em energia elétrica – data-center, digitalização, projetos para produção de H2BC e amônia – para substituir combustíveis fósseis;

A viabilização destes caminhos, sobretudo nos setores de difícil redução das emissões (*hard to abate*), irá requerer incentivos que reduzam o custo dos investimentos na adaptação ou substituição de processos industriais ou o diferencial de custo do produto descarbonizado, enquanto não houver mecanismos equivalentes a um prêmio pelo produto renovável – papel do mercado de crédito de carbono ou de impostos seletivos sobre produtos com

elevada pegada de carbono.

Assim, por ora, é necessário contar com programas de incentivo para investimentos em boa parte dos segmentos disruptivos para os quais há diferenças relevantes entre o preço do bem convencional x o custo estimado do bem em processos sem emissão de carbono, sobretudo quando países desenvolvidos subsidiam pesadamente a produção em suas fronteiras para compensar suas desvantagens competitivas.

Mapa da demanda por energia renovável



Novas cargas para energia elétrica renovável

Uma nova onda de demanda potencial por energia elétrica renovável vem se formando, vinda de diversos *drivers*, alguns na agenda já há alguns anos – mas num momento bastante dinâmico por conta da relevância e urgência cada vez maior de ações para promover a descarbonização dos processos –, outros ainda incipientes, mas com elevado potencial de transformar a forma como consumimos energia no mundo. Destacamos a seguir os principais *drivers*, que

serão foco das análises e projeções a serem apresentadas nas próximas seções:

- **Data-centers** para nuvem e Inteligência Artificial Generativa (IAG): perspectivas (Fonte: projeções próprias a partir de mídia especializada, players do setor/fornecedores das Big Techs, ABDI/MDIC);
- Estações de **recarga de bateria** para veículos elétricos (Fonte: projeções próprias a partir de publicações especializadas e conversas com players do setor);
- **Eletrificação direta da indústria** (Fonte: projeções próprias a parte de conversas com fornecedores de serviços, sistemistas e players do setor, incluindo montadoras);
- **Hidrogênio de baixo carbono** (Fonte: projeções próprias a partir de material de consultorias especializadas, players globais e potenciais investidores).

3.1. Novos demandantes intensivos: Data Center

3.1.1. IAG e demanda por energia renovável

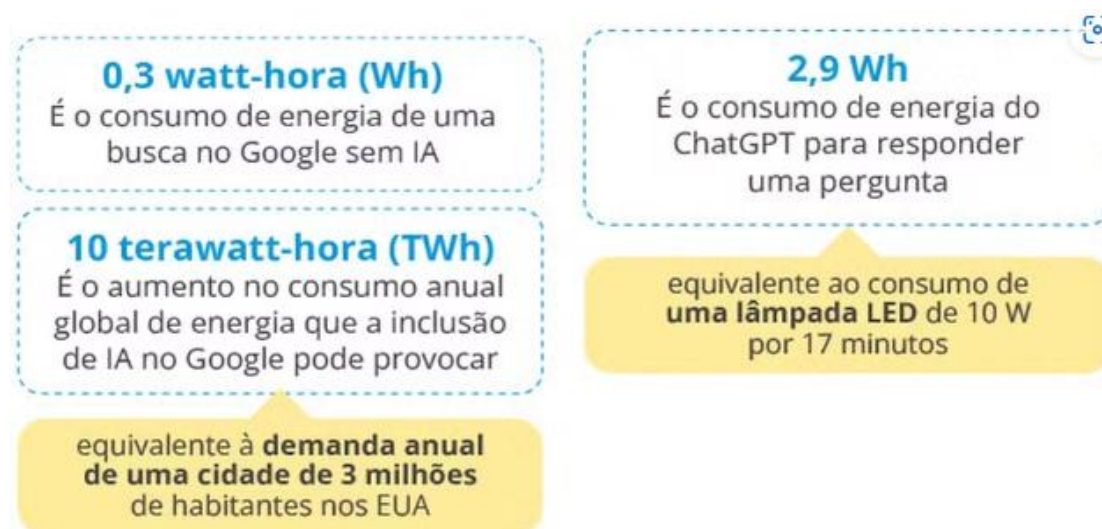
Surgimento e consolidação de demandas por digitalização, centralização e estocagem de dados tem impulsionado a demanda de energia renovável e tem se tornado foco crescente de atenção no Brasil.

A base é a rápida evolução de processos que se utilizam de grandes massas de dados, desde processos mais comuns (serviços de armazenamento e proteção de dados em nuvem de forma mais profissionalizada) a outros mais sofisticados associados a *machine learning*, inteligência artificial generativa (IAG) e mineração de dados aplicada ao mercado de criptomoedas.

As estimativas de crescimento da demanda global de eletricidade para os serviços de datacenters variam de 11% a.a. a 27% a.a. (McKinsey, 2024), o que implica demanda global deste segmento saltando de ~55 GW em 2023 para 171 GW a 298 GW em 2030.

Cenários relativamente moderados projetam uma demanda da ordem de 200 GW em 2030, mais que o triplo de 2023 e equivalente à capacidade instalada no Brasil no mesmo ano.

Figura 3: Exemplos de intensidade de consumo de energia por IAG



Fontes: Agência Internacional de Energia, disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/tecnologia/noticia/2024/06/16/inteligencia-artificial-exigira-energia-de-dois-brasis-ate-2026-veja-por-que-a-tecnologiademanda-tanto.ghtml>. E McKinsey, "AI Power. Expanding Datacenter capacity to meet growing demand. October 29, 2024.

3.1.2. O mercado de Datacenters (DC) no Brasil, grandes números

O Brasil é o principal país da América Latina para datacenter; conta atualmente com 192 unidades de datacenter alocadas nos principais centros de demanda – Grande SP, Grande Campinas, Curitiba, RJ, Fortaleza; Líderes globais: EUA (4.071), Reino Unido (490), Alemanha (484), China (379), França (319), Canadá (285),

Austrália (273) e Índia (267). Num segundo grupo vêm Holanda, Itália, Japão, Suíça e Espanha, à semelhança do Brasil¹².

O Brasil fechou 2024 com uma capacidade instalada de 595 MW em datacenters – eram 420 MW em 2023, com faturamento estimado de ~R\$ 10 bilhões. O crescimento médio deste setor é da ordem de 22% a.a.; tendo crescido 41% de 2023 para 2024¹³.

A cada 100 MW, estima-se investimentos da ordem de R\$ 4,7 bilhões na construção do DC e R\$ 1,7 bilhão em infra de energia elétrica; estima-se que o grosso dos investimentos seja nos conteúdos que ocuparão os datacenters (IA, dados, imagem e outras aplicações).

Destes investimentos, o conteúdo local (produzido internamente) prevalece na infraestrutura (em torno de 70% de produção local), sendo menos expressivo em *hardware*, dado que mais de 70% dos conteúdos são importados, com prevalência de chips e semicondutores de produção global, com forte predomínio da produção asiática (China, Taiwan, Cingapura).

O Mercado de *cloud (colocation)* prevalece: estima-se faturamento da ordem de US\$ 300 bilhões ao ano no mundo para atender o mercado de dados (empresas que ainda migram de plataformas e servidores próprios para acumuladores terceirizados ou *clouding*). A demanda mais recente está associada à inteligência artificial generativa (IAG), também com receitas da ordem de US\$ 300 bi ao ano. Neste segmento, não há exigência de proximidade física (exige baixa latência), mas sim interconexão com cabos e infraestrutura de TI e elevada confiabilidade (da ordem de 99,99% de segurança de conectividade, o que requer estruturas de redundância e backup).

¹² Fonte: <https://www.datacentermap.com/datacenters/>, acessado em 03/10/2025.

¹³ Fonte: CBRE Consultoria Imobiliária, fonte normalmente citada por estudos de mercado e relatórios de Bancos.

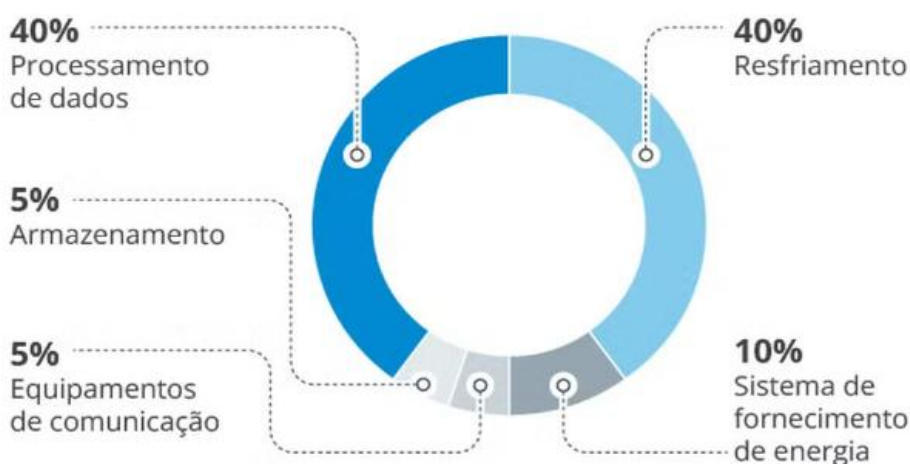
3.1.3. Datacenters, IA e Criptomoedas – Demanda Energética

Atualmente, no Brasil, começam a surgir demandas para processadores de IA de alta potência.

- Segunda a Agência Internacional de Energia (IEA), datacenters consumiram cerca de 460TWh (52 GW médios) de eletricidade no mundo em 2022, quase 2% da carga mundial total;
- Digitalização de processos (indústria, serviços), armazenamento de dados e cada vez mais IAG e mineração de dados explicam este impulso recente. A demanda por energia está associada a basicamente dois processos: processamento de dados (40%) e resfriamento de equipamentos (outros 40%).
- Serviços de processamento e mineração em larga escala são os maiores demandantes globais, requerendo potências entre 400 MW a 1 GW.

Figura 4: Consumo de energia dos data centers

O CONSUMO DE ENERGIA DOS DATA CENTERS SE DIVIDE ASSIM



Fonte: Agência Internacional de Energia, disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/tecnologia/noticia/2024/06/16/inteligencia-artificial-exigiraenergia-de-dois-brasis-ate-2026-veja-por-que-a-tecnologia-demanda-tanto.ghtml>

3.2. Datacenters, IAG e criptomoedas – panorama brasileiro

Disponibilidade de energia renovável, área próxima a grandes centros, infraestrutura robusta de conexão elétrica e de telecom (cabos) podem tornar o Brasil um hub global de Data Center.

O Brasil é reconhecido como um hub de conectividade para a região do Atlântico, com investimentos em cabos (projeto Firmina do Google/Telxius).

Contudo, há alguns gargalos relevantes que precisam ser sanados para que o potencial de expansão se concretize, conforme estudo de 2023 comandado pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, ABDI.

O estudo da ABDI¹⁴ analisou aspectos técnicos e econômicos acerca do mercado de data centers no Brasil. Um dos aspectos avaliados refere-se aos drivers de custos de construção e operação de um data center no país¹⁵, já que esses influenciam a escolha dos players pelo país no qual será instalado o data center. Além disso, foi considerado que um datacenter consome em média 79,6 GWh/ano de energia para alimentar os equipamentos de TI, refrigeração e facilities e cerca de 100 engenheiros.

As conclusões indicam que, no Brasil:

- Custos de Hardware e Software representam aproximadamente 62% do CAPEX do data center;

¹⁴ Fonte: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/comercio-e-servicos/comercio/estudo_completo_datacenters_jun2023.pdf/view

¹⁵ Utilizando como parâmetro um datacenter Tier3, com foco em colocation, de média densidade (7kw/rack), levando em consideração tecnologias verdes de última geração e arquitetado para hospedar nuvens. A capacidade média do data center considerado é de 5 MW. Além disso, foi considerado que o data center consome um total de 79,6 GWh/ano de energia para alimentar os equipamentos de TI, refrigeração e facilities, além da contratação de 100 engenheiros

- A carga tributária sobre o OPEX é elevada – 27,2% em 2022, bastante acima da utilizada em outros países mais desenvolvidos, que tendem a ser considerados nos planos de investimento dos grandes grupos;
- Gastos com energia e manutenção de equipamentos são cerca de 60% do Opex de um datacenter, o que significa que o custo final da energia (incluindo estruturas necessárias para assegurar a confiabilidade da rede, que precisa operar em regime 24x7) e cadeia de manutenção são elementos cruciais na decisão de investimento e de alocação global de recursos.

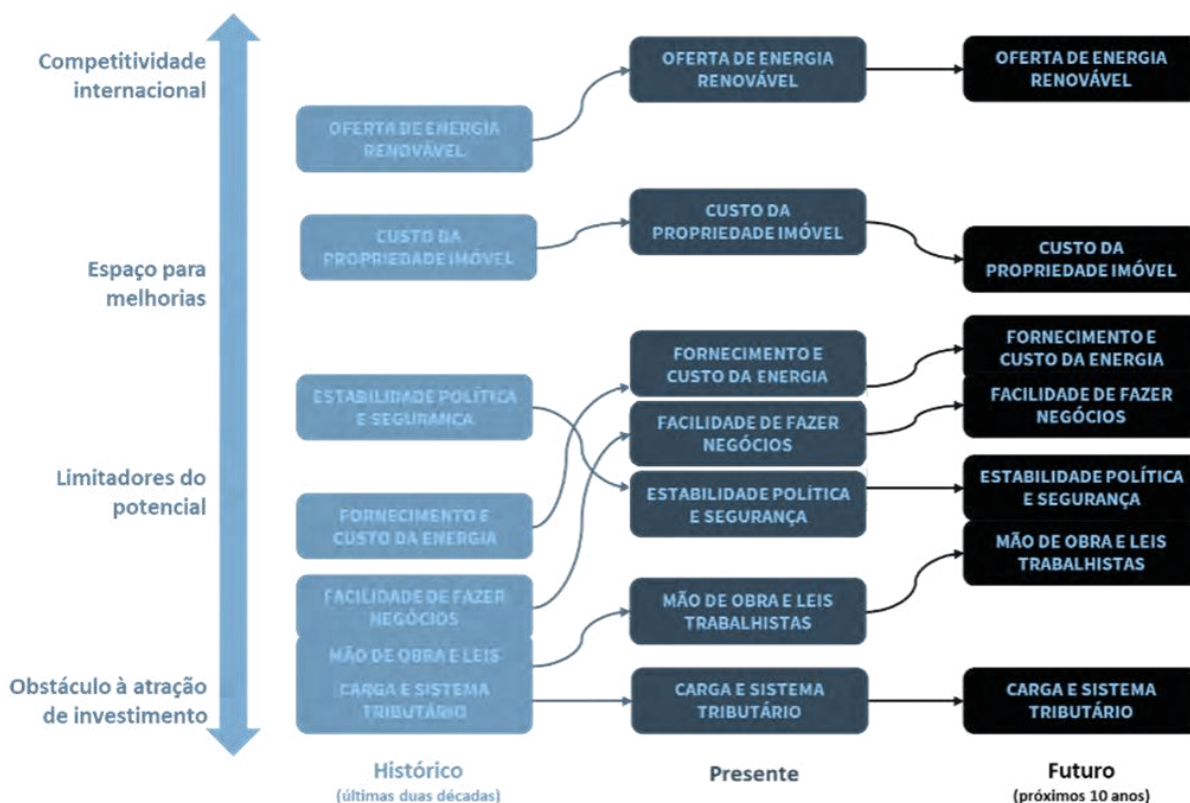
3.2.1. Datacenters, IA e criptomoedas – análise de competitividade

O levantamento realizado pela ABDI envolveu os principais itens relevantes do ponto de vista da competitividade do setor de datacenters no Brasil. Apesar da evolução observada ser positiva para a maioria dos fatores considerados, o Brasil continua com fragilidades em ao menos três desses fatores – considerados como **fatores limitantes da competitividade e do potencial brasileiro nesse setor**:

- Estabilidade política e segurança;
- Mão de obra e leis trabalhistas; e
- Carga e sistema tributário¹⁶.

¹⁶ É importante frisar que a avaliação foi realizada antes da aprovação da Reforma Tributária, de modo que a perspectiva de estagnação no quesito “carga e sistema tributário”, principal gargalo competitivo brasileiro, pode ter se modificado; aliás, espera-se que este fator isoladamente contribua para aumentar a competitividade nacional.

Figura 5: Mapeamento dos fatores de competitividade para atração de data centers



3.2.2. Datacenters, IA e Criptomoedas – medidas para assegurar a competitividade

Apesar de avanços, persistem gargalos relevantes que prejudicam a competitividade do Brasil nesse setor.

Além dos gaps competitivos acima descritos, a necessidade de reforços nas redes de transmissão para atender a demandas por cargas maiores (DC com capacidade acima de 100MW) tem-se revelado um gargalo para algumas localidades.

Assim, para firmar o potencial do Brasil como Hub de DC para o Atlântico, é necessário afastar os limitadores apontados para o Brasil – temas que serão tratados novamente na seção de recomendação de Políticas Públicas:

- Marco Legal (PL 3.028/2024)

- Resolução de gargalos de conexão à rede elétrica, na transmissão e distribuição (mudanças regulatórias, prazos e procedimentos de estudos e construção de LTs);
- Redução de carga tributária a curto e médio prazos, sobre Capex (inclusive componentes importados) e Opex.
- Qualificação de mão-de-obra.

3.2.3. Datacenters, IA e Criptomoedas – Demanda Energética

Brasil: incremento anual da ordem de 1,1 GW, no cenário moderado.

A demanda no Brasil vem sendo puxada por serviços como armazenamento em nuvem, *e-banking*, moedas digitais e *e-commerce*, enquanto se espera onda de investimentos em centrais de processamento de IAG e mineração de dados.

Consultorias do setor e agências de governo estimam taxas de crescimento de data centers, para o mercado brasileiro, superiores a 10% a.a.

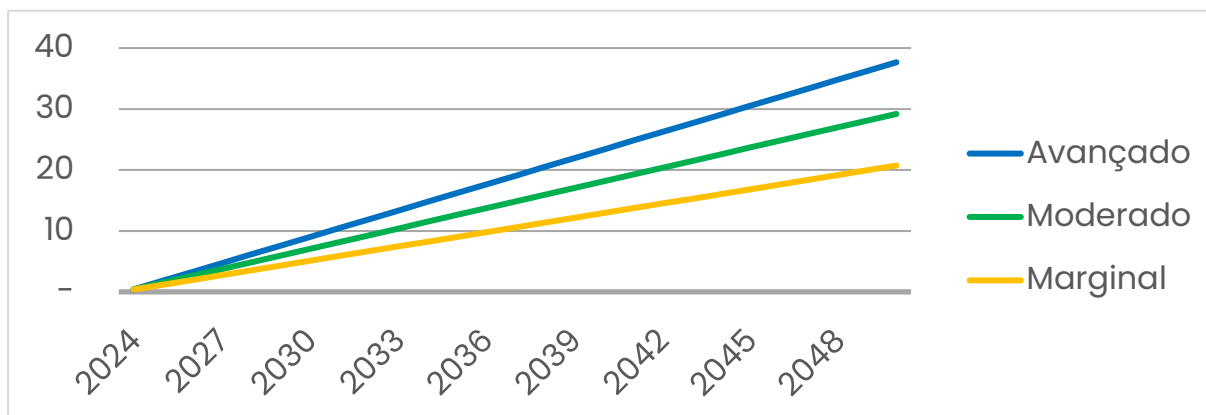
Cenários LCA consideram as seguintes fontes para a projeção de demanda por energia renovável:

- BCG: estima mercado entre 5 e 9 GW até 2030 (cenário avançado, considerando o valor de 9 GW em 2030);
- MME/EPE*: projeta mercado de 5 GW em 2035 (cenário marginal);

Projeções: média dos dois cenários – 7 GW em 2030 no cenário moderado.

OBS: há projeções mais otimistas que os cenários acima citados. Exemplo: Schneider Electric estima mercado de 20GW em 2028.

Gráfico 8 - Consumo de energia por data centers (em GW)



Fonte: MME/EPE e BCG. Elaboração própria.

3.3. Novos demandantes intensivos: Eletrificação da mobilidade

3.3.1. Eletrificação da mobilidade gerará demanda adicional de energia

Em pesquisa recente com principais players do setor automotivo e com participantes desta cadeia (fabricantes de partes e peças, sindicatos, produtores de biocombustíveis, montadores de bateria entre outros)¹⁷, LCA e MTempo Capital identificaram as estratégias em curso para a descarbonização do segmento de veículos automotores, com destaque para os automóveis de passeio e comerciais leves.

Em resumo, o estudo identificou que, com raras exceções, as grandes montadoras têm em seu portfólio grande variedade de veículos eletrificados – os modelos vão desde híbridos com baterias de mais baixa potência a híbridos mais potentes e ainda não recarregáveis, híbridos carregáveis (*plug-in*) e elétricos puros (sem combustão e 100% à bateria recarregável).

¹⁷ Vide estudo completo em <https://mbcbrasil.com.br/trajetorias-tecnologicas-mais-eficientes-para-a-descarbonizacao-da-mobilidade-2/>.

Embora haja diferenças nas estratégias, mesmo montadoras com foco em veículos elétricos puros (BEVs) ao redor do mundo, sobretudo em seus países de origem (Europa, EUA e China), têm estratégias diferenciadas para o Brasil em função da presença local de veículos flex com capacidade de abastecimento em todo território com biocombustíveis de baixo custo e elevada capacidade de descarbonizar a matriz de transporte.

Assim, a principal rota de descarbonização dos transportes no Brasil é a bioeletrificação, combinando baterias de diferentes tamanhos com combustão a etanol (leves) e biocombustíveis (pesados), incluindo biodiesel (principalmente à base de soja), biometano (sobretudo de resíduos da cana de açúcar), além de elétricos puros. A participação de mercado de cada modalidade de veículo irá depender de muitas variáveis, com destaque para os custos relativos de cada uma, a evolução da infraestrutura de recarga, o avanço da oferta de biocombustíveis etc.

Assim, a dinâmica da eletrificação de veículos no Brasil irá determinar a matriz energética futura e a necessidade de aumento da capacidade de geração de eletricidade.

- Cenário com **predominância de híbridos**: prevalecendo a estratégia anunciada pelas principais montadoras, eletrificação da frota de veículos brasileira se dará via bioeletricidade e veículos híbridos; neste cenário, estima-se uma **demanda adicional de eletricidade para a recarga de baterias da ordem de 130 MW/ano, alcançando 3,42 GW até 2050**;
- Cenário com predominância de elétricos: no **cenário liderado por veículos elétricos puros à bateria (BEVs)**, a carga adicional de eletricidade poderá ultrapassar **8 GW em 2050, cerca de 320 MW/ano**.

O ritmo de expansão da infra de recarga deverá acompanhar o crescimento da frota de elétricos e plugin, e não ao contrário; cenário mais provável é de predominância de veículos bioelétricos/híbridos no Brasil.

3.3.2. Novos demandantes intensivos: Eletrificação da indústria

Eletrificação direta da Indústria.

Processos que atualmente demandam gás natural e GLP e que podem passar a demandar energia elétrica após adaptações em processos que envolvem caldeiraria e aquecimento nos seguintes setores:

- Alimentos e Bebidas
- Cimento
- Mineração e Siderurgia
- Química
- Papel e Celulose
- Cerâmica

Embora as adaptações de processo necessárias para que alguns setores industriais possam migrar do consumo de fontes fósseis para energia elétrica requeiram investimentos relevantes, o potencial de migração no Brasil é expressivo: até 45,9 milhões de TEPs de GN e 5,1 milhões de TEPs de GLP.

A migração destes combustíveis para energia elétrica implica, até 2050, acréscimo de 16 GW de eletricidade¹⁸. Há, entretanto, desafios relevantes a serem superados: (i) investimentos na substituição/adaptação de equipamentos; (ii) reforços no *grid*, linhas e subestações para evitar intermitências; (iii) e mecanismos de remuneração para este investimento em descarbonização.

¹⁸ Esse aumento corresponde a 0,7GW/ano no período de 2026 a 2050.

Eletrificação das plataformas da Petrobras

No setor de óleo e gás, a eletrificação de novas plataformas de exploração e produção de petróleo é uma oportunidade para o curto e médio prazos por meio de mudanças que permitirão maior concentração, capacidade e eficiência de geração termelétrica via gás associado (extraído diretamente dos poços de exploração), num primeiro momento, e num segundo momento via geração eólica *offshore* complementar.

Estes movimentos permitirão aumentar a eficiência e reduzir significativamente as emissões de GEE das plataformas (de 6% a 20%), via escala e eficiência e substituição de diesel por GN associado; a complementação por eólicas poderá elevar a redução das emissões para o patamar próximo ao esperado para 2030, de 35% de redução.

Parceria Petrobras-Poli/USP está desenvolvendo sistema flutuante de geração eólica em uma base ancorada no leito oceânico para abastecer as Unidades Flutuantes de Armazenamento e Transferência (FPSO), que são os maiores navios-plataforma. Petrobras anunciou a aquisição de 14 novas unidades no período de 2024 a 2028.

O Plano estratégico da Petrobras (PE24-28), contudo, ainda não trata da eletrificação das FPSO existentes.

O consumo de energia de uma FPSO dedicada ao pré-sal é da ordem de 150 MW/unidade¹⁹, mas (ainda) não é possível estimar a quantidade e a velocidade com que as plataformas serão eletrificadas.

¹⁹ Conforme indicado em Pesquisa FAPESP (<https://revistapesquisa.fapesp.br/usinas-eolicas-em-alto-marpodem-fornecer-eletricidade-para-plataformas-de-petroleo/>)

3.4. Hidrogênio de Baixo Carbono: H2V e rotas alternativas

3.4.1. Demanda atual de H2

Principais highlights:

- Os processos de produção do H2 são diversos em tecnologia de produção e uso e, especialmente, na quantidade de CO2 emitido;
- Grande parte da demanda global atual de hidrogênio é na sua forma cinza, produzida a partir do gás natural, com alto fator de emissão de dióxido de carbono (10kg de CO2 para cada 1kg de H2 produzido);
- Até os dias atuais, o uso do hidrogênio se concentrou em aplicações muito específicas, como o refino de petróleo ou na produção de amônia (insumos industriais);
- A ampliação do leque de produção do hidrogênio, focado nas variantes de baixo carbono, deve ampliar o uso do H2 na indústria - tanto como insumo energético e matéria-prima direta de produção -, bem como no setor de transportes como célula-combustível.

Quadro 1: Classificação do Hidrogênio

Cor	Classificação	Descrição
	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS.
	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS.
	Hidrogênio Cinza	Produzido do gás natural, sem CCUS
	Hidrogênio Azul	Produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis), com CCUS.
	Hidrogênio Verde	Produzido a partir de fontes renováveis via eletrólise da água.
	Hidrogênio Branco	Hidrogênio natural ou geológico.
	Hidrogênio Turquesa	Produzido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO2
	Hidrogênio Musgo	Produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica.
	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

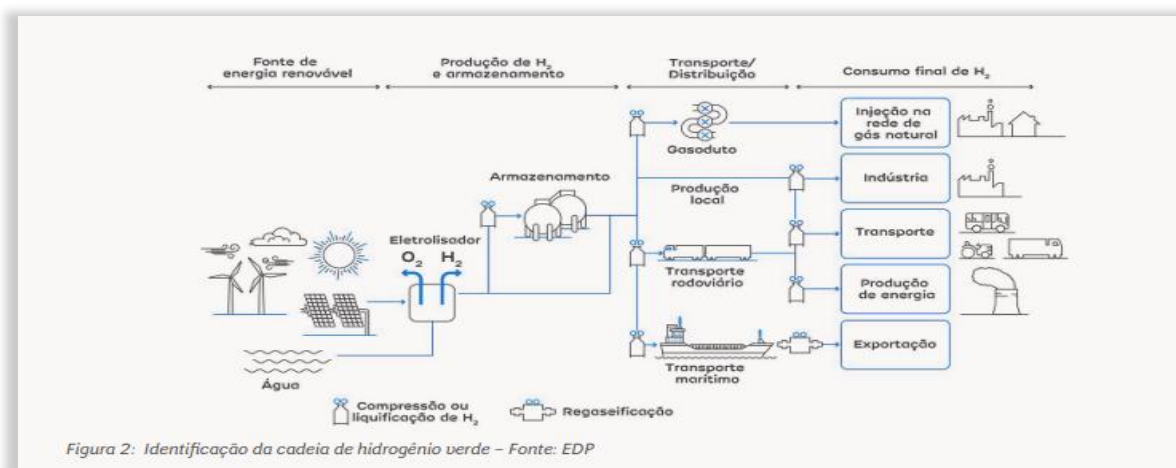
3.4.2. H2 Verde: principal rota dos projetos presentes no Brasil

O hidrogênio verde é gerado através da eletrólise da água, que ocorre em eletrolisadores utilizando energia elétrica proveniente de fontes renováveis como solar, eólica, hídrica e biomassa. Durante esse processo, também é produzido oxigênio (O₂) como coproduto, que pode ser utilizado em outras aplicações, como no ramo hospitalar.

O hidrogênio de baixo carbono apresenta um relativo destaque para setores de difícil abatimento de emissões, tais como produção de materiais virgens (ex. ferro-gusa, aço, cimento, fertilizantes), transportes de longa distância e carga

pesada, e atividades econômicas relacionadas ao aquecimento ou combustão direta.

Figura 6: Cadeia do hidrogênio verde



3.4.3. Aplicações potenciais do H2 de Baixo Carbono: o caso do H2V²⁰

Química: o H2V pode ser utilizado como insumo para a fabricação de metanol, na exploração e produção de petróleo (E&P) e, majoritariamente, na produção de amônia, utilizada principalmente na fabricação de fertilizantes nitrogenados. Custo de produção e transporte (disponibilidade local do H2V) são desafios, e insumos concorrentes, como o biometano, aparecem como caminho alternativo em substituição ao gás natural (atualmente utilizado para produzir hidrogênio e amônia para diversos processos, como E&P e fertilizantes).

Outras indústrias: o hidrogênio verde tem potencial de ser utilizado como insumo energético em diversas indústrias cujos processos são intensivos em combustíveis fósseis ou mesmo energia elétrica, como mineração, siderurgia, fertilizantes, cimento, petroquímica, alimentos e outras.

²⁰ Fontes: Irena; Methanol Institute; UFPR; Journal of CO2 Utilization; Statista; IEA; USDA; IRENA; Embrapa; OCDE; Associação Brasileira de Química; World Biogas Association; European Biogas Association; Global Methane Initiative; NREL; Research Collaboratory for Structural Bioinformatics Protein Data Bank (RCSB). Elaboração: LCA Consultores.

Além de desafios como custo e disponibilidade local do H₂, serão necessários esforços de investimento relevantes na adaptação ou substituição de processos para viabilizar o uso do hidrogênio na indústria – movimento que pode se viabilizar ao longo dos anos com o crescimento da demanda e necessidade de expansão da capacidade atualmente instalada, à medida que as plantas mais antigas e depreciadas vão sendo substituídas por novas mais produtivas e em conformidade com as exigências de descarbonização. Iniciativas de penalização pela pegada de carbono (a exemplo do CBAM) certamente devem contribuir para acelerar este movimento.

Transportes terrestres: Veículos pesados de longa distância, intensivos em carbono, têm no H₂V (transformado em metanol ou amônia) uma solução potencial para reduzir emissões. Os desafios são redes de abastecimento e o custo do H₂V relativamente ao diesel e ao próprio gás natural.

Navegação e Aviação: o H₂V pode ser usado como células de combustível; diretamente em motores a combustão interna movidos a H₂, ou na produção de e-fuels (como o e-metanol e e-SAF). Da mesma forma, custo, armazenamento e distribuição, bem como os biocombustíveis e rotas alternativas para a produção dos e-fuels são desafios ao surgimento do H₂V.

Aquecimento: o hidrogênio verde pode substituir os combustíveis fósseis no aquecimento industrial e nos segmentos de serviços e doméstico. Desafios de transporte tornam-se mais relevantes (redes de duto).

3.4.4. Panorama internacional

Transição tecnológica e descarbonização são parte da agenda econômica e ambiental global das próximas décadas.

- Os EUA – que haviam voltado oficialmente ao Acordo de Paris em 2021 após uma saída em 2019; divulgado um Plano Federal de Sustentabilidade e outras medidas relevantes com vistas a uma redução, até 2030, de 50%-52% das emissões de GEE do país em relação aos níveis de 2005 – estão novamente fora dos acordos internacionais de contenção e redução de emissões desde 2025. Ainda não formalmente, pois há um *tail* de 1 ano para que possam formalizar sua saída, mas esta é a decisão tida como mais provável. Ademais, o Governo tem abandonado diversos programas de incentivo a investimentos em infraestrutura verde, energia renovável, baterias e veículos elétricos.
- Na União Europeia, com base no Pacto Ecológico Europeu e em vigor desde julho de 2021, a Lei Europeia do Clima tem como objetivo tornar os países da UE neutros em carbono até 2050. Para isso, também foi estabelecida uma meta intermediária a fim de reduzir, até 2030, as emissões líquidas de GEE em 55% em comparação aos níveis de 1990. Ademais, o bloco está implementando o Pacto Verde Europeu, que inclui mudanças significativas no setor energético, agrícola, industrial e de transporte.
- A China, maior emissor de carbono do mundo, se comprometeu a alcançar a neutralidade de carbono até 2060. Suas metas incluem o pico de emissões de CO₂ até 2030. Para isso, o país está investindo pesadamente em energias renováveis, especialmente energia solar e eólica, para reduzir sua dependência de combustíveis fósseis.
- Outros exemplos de mandatos e medidas adotadas incluem a Indonésia, que espera obter 75% de participação de fontes renováveis de energia em 2050; Japão, que também visa emissões líquidas zero até 2050 e está

promovendo a transição para energias renováveis, além de apostar em tecnologias de hidrogênio verde; Índia, cujo prazo para emissão líquida zero está fixado em 2070; e Turquia, que tem como objetivo atingir 50% de energias renováveis em sua matriz elétrica em 2030 e 80% em 2053.

Os mandatos são os principais propulsores da descarbonização. Mesmo com os preços elevados, a energia *carbon-free* é demandada para atender as regras de descarbonização e evitar o banimento dos produtos, sobretaxas e multas. Quadro ao lado resume evolução do número de países com mandatos setoriais de descarbonização, ou seja, com medidas de estímulo à demanda por energia limpa.

Mandatos setoriais de descarbonização

Quadro 2: Evolução dos mandatos de descarbonização

Ano	Incentivos Regulatórios / Mandatos			
	Construção	Indústria	Transporte	Agricultura
2012	5	2	27	0
2013	5	2	30	0
2014	5	2	40	0
2015	6	3	45	0
2016	7	4	48	0
2017	10	5	52	0
2018	10	5	59	0
2019	14	9	59	0
2020	14	9	60	0
2021	17	9	60	0
2022	21	9	56	0

GSR2023_Data_Pack.xlsx (live.com) / Dados utilizado no Renewables 2023 Global Status Report (GSR) (RENEWABLES 2023 GLOBAL STATUS REPORT (ren21.net))

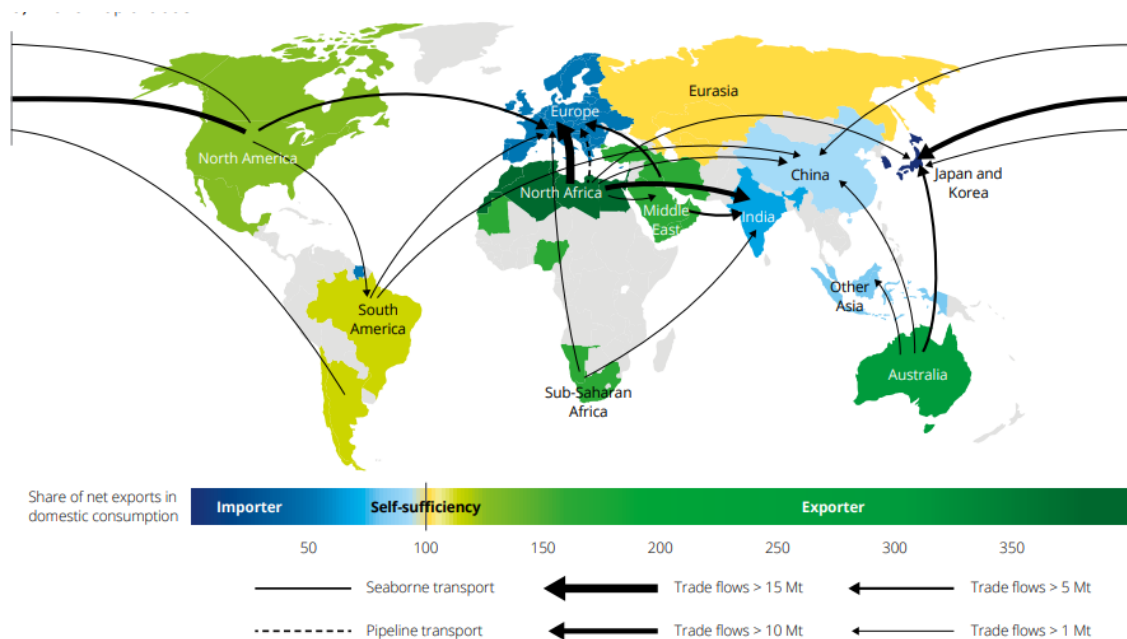
Apesar dos avanços e do aumento no número de países com mandatos de descarbonização setoriais, chama atenção a ausência de regras específicas

para a agricultura, setor de especial importância para o Brasil. Boa parte das emissões do país advém de mudanças no uso da terra.

- A distintas vocações e velocidades de transição energética dos países centrais, da mesma forma que as distâncias físicas e rotas logísticas, indicam para um fluxo de comércio internacional de energia limpa “tradable” em que Europa, China e Índia tendem a ser os principais importadores líquidos e, de outro lado, Américas, Austrália, norte da África e Oriente Médio, os principais exportadores líquidos

Fluxo de comércio esperado em 2050

Figura 7: Perspectivas do comércio internacional do H2, em 2050



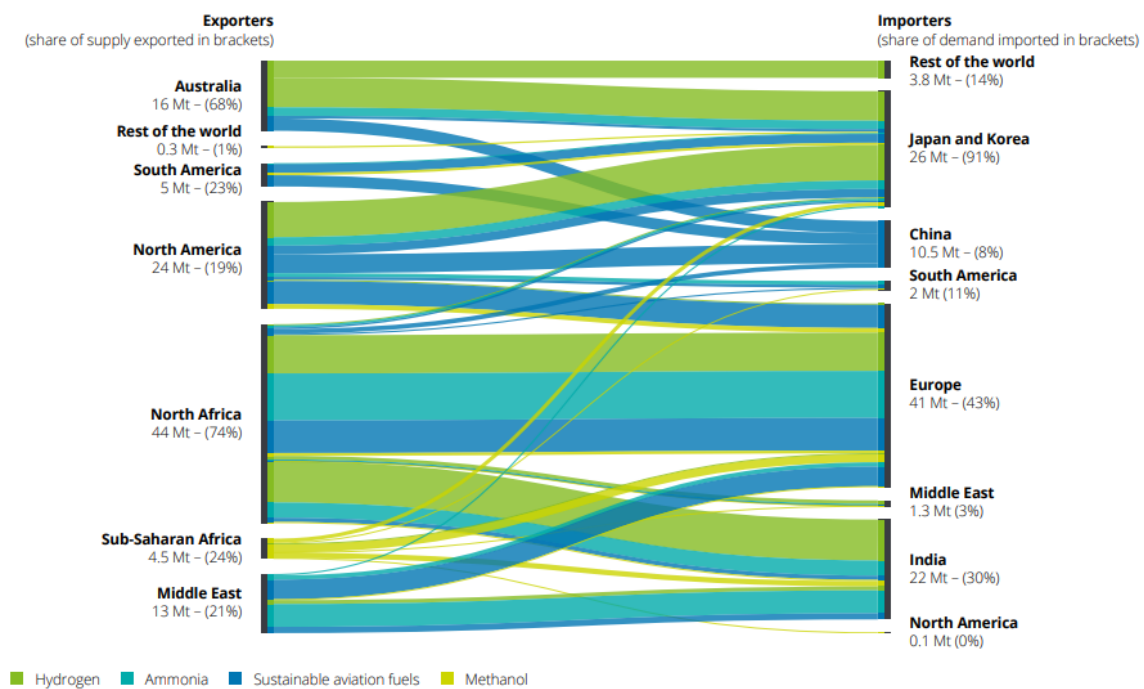
Fonte: Deloitte's 2023 Global Green Hydrogen Outlook

- Os fluxos de comércio internacional de energia limpa “tradable” deverão se distribuir entre H2V, amônia verde, SAF e metanol verde, com predominância dos três últimos (refletindo a maior dificuldade de transporte do primeiro). Não obstante, esse mix terá uma razoável heterogeneidade, a depender da demanda e proximidade dos principais

importadores. A China, por exemplo, tenderá a importar somente SAF, ao passo que a Europa – que deverá ser o maior mercado do mundo em 2050 – adquirirá percentuais relativamente semelhantes de H2V, amônia verde e SAF.

Panorama internacional Fluxo de comércio, por commodity, esperado em 2050

Figura 8: Fluxo de comércio, por commodity, esperado em 2050



Fonte: Deloitte's 2023 Global Green Hydrogen Outlook

A transição tecnológica e descarbonização são parte da agenda econômica e ambiental global das próximas décadas.

- Para além dos ganhos de eficiência energética, o hidrogênio verde e a eletrificação de processos irão exigir novas plantas de geração de energia renovável, em especial solar e eólica. Por outro lado, estudos

ainda carecem de maior detalhamento: curvas de *ramp-up* da demanda, setores e processos demandantes; limiar da competitividade com ou sem crédito de carbono, cronograma de implementação de projetos etc.

- A Europa tem como meta consumir 20 milhões de toneladas de hidrogênio renovável até 2030, metade produzida internamente. Junto com o hidrogênio, a maioria dos países europeus vem apostando pesado na eletrificação da frota de veículos com incentivos fiscais e subsídios tanto para a produção como para a compra de carros elétricos, além de medidas que facilitem o uso e a manutenção destes veículos associadas à proibição de motores a combustão a curto e médio prazos. Com estes estímulos, os governos visam tornar o automóvel mais acessível, incentivando a população a adquirir os veículos elétricos.
- No setor de **aviação**, os caminhos mais utilizados para a produção de SAF (*Sustainable Aviation Fuel*) são via **HEFA** (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, como o óleo de cozinha usado e resíduos de óleo de palma), **Alcohol to Jet (AtJ)**, via cana-de-açúcar e milho; e **Gas/Power to Liquid**, principalmente via biogás produzido a partir de resíduos sólidos. Brasil tem despontado nos projetos de HEFA, mais competitivos por exigirem menor CAPEX; EUA e Brasil, maiores produtores mundiais de etanol, lideram os projetos de AtJ, e UE lidera o caminho via resíduos sólidos.
- Por fim, os investimentos em inovação e P&D vêm tendo aumento significativo, muitos voltados a desenvolver tecnologias emergentes e integrar as energias renováveis nos diversos modelos de negócio²¹.

²¹ Fontes: Indonesian Green Powerhouse Promise In Ten Bold Moves; 2024 State Of The European Hydrogen Market Report; How Oil And Gas Companies Can Be Successful In Renewable Power; 12 Insights Sobre Hidrogenio Edicao Brasil

- A FMC (“First Move Coalition”), afiliada ao Fórum Econômico Mundial, tem como objetivo substituir pelo menos 5% do combustível tradicional de aviação por SAF até 2030, e se espera chegar a cerca de 2/3 da demanda global até 2050 – 360 MM tons de SAF para uma demanda estimada de aproximadamente 550 MM tons em 2050.
- O FMC possui 27 membros, dentre eles companhias aéreas, fabricantes de aviões, bancos e consultorias, como: Airbus, Boeing, Bank of America, BCG, Delta Airlines, DHL, Lufthansa, entre outros;
- O “US Government’s SAF Grand Challenge, que reúne os departamentos americanos de Energia, Transporte e Agricultura, tem por metas atingir uma redução mínima de 50% nas emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida em comparação com o combustível convencional e cumprir a meta de fornecer SAF suficiente para atender a 100% da demanda de combustível de aviação dos EUA até 2050;
- Além disso, algumas empresas do FMC já atuam como off-takers de SAF. A DHL, por exemplo, tem acordos para compra de SAF e, atualmente, adquire o combustível sustentável em 8 aeroportos ao redor do mundo. A Airbus fechou parceria estratégica com DG Fuels para produzir 120MM de galões de SAF por ano, iniciando em 2026. A American Express fez uma parceria com a Shell Aviation para lançar o Avelia, disponibilizando 1 milhão de galões de SAF disponíveis para clientes corporativos²².

1; 2024 Bcse Bnef Sustainable Energy In America Factbook; Bp Energy Outlook 2024; Net Zero Electrical Heat A Turning Point In Feasibility; Hydrogen Insights Dec 2023 Update; 20240418 Report Launch_Site; Global Hydrogen Flows 2023 Update; Shell Brasil Cenários Transição Energética Junho 2024 1; Renewables Curtailment Monitor Voll Tracking Output Res; Jll Data Center Outlook Global 2024;

Fontes: Renewable energy in Turkey | CMS Expert Guides; Turkish local electric car Tagg given tax advantage (trend.az); Publications Office (europa.eu); Federal Sustainability Plan: Catalyzing America’s Clean Energy Industries and Jobs | Office of the Federal Chief Sustainability Officer / Documento: Federal Sustainability Plan.

²² Fontes: https://www3.weforum.org/docs/WEF_First_Movers_Coalition_Aviation_Commitment_2023.pdf;

3.4.5. Potenciais demandantes H2V no Brasil



Indústria atual intensiva, demandante de combustíveis não-renováveis



Substituições de importações em setores que se tornaram não-competitivos (ex. fertilizantes)



Combustíveis para longas distâncias



Combustíveis para transporte Rodoviário pesado



Combustíveis para o setor energético

Indústria atual demandante de combustíveis não-renováveis

Setor industrial pode ser o primeiro a avançar na agenda de descarbonização: Siderurgia, Alimentos e Bebidas, Cimento, Papel e Celulose, Química e Cerâmica.

- Empresas com elevado nível de formalização;
- Processos de medição da pegada de carbono mais avançados e exigências de descarbonização partindo de mercados relevantes (consumidores, investidores e financiadores são agentes de mudança);
- Mapeamento e estudo de alternativas tecnológicas e análise de custos de transição em curso nos setores mais intensivos (*hard-to-abate*);
- Fontes de energia não-renováveis potencialmente substituíveis por H₂V:
 - Gás natural e GLP
 - Óleos: diesel e combustível
 - Carvão mineral

[https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuel-grand-challenge;](https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuel-grand-challenge)
https://www3.weforum.org/docs/WEF_First_Movers_Coalition_Status_Report_2024.pdf

- o Coque de carvão mineral

* Carvão vegetal teria como substituto natural a biomassa

3.4.5.1. Indústrias potencialmente demandantes do H2V – Siderurgia

- O hidrogênio verde pode apoiar o processo de descarbonização de forma complementar a outras tecnologias principalmente em setores chamados de *“hard-to-abate”*, caracterizados por alta intensidade de energia e com escassas soluções que apresentem ganhos de escala;
- A siderurgia é, dos processos industriais, um dos principais emissores de CO₂ no planeta, devido à intensidade de utilização de combustíveis fósseis, como carvão e gás natural, no processo produtivo. No Brasil, estima-se que tenha sido responsável por cerca de 40% das emissões industriais ou 2,5% das emissões totais de CO₂ equivalente em 2022 (IEMA, 2023);
- Segundo o Instituto Aço Brasil, a produção de aço bruto no Brasil ocorre, em grande parte (75%), pelo método de BF-BOF (alto forno); forno elétrico participa com 24% e 1% via EOF (forno de fusão). A rota BF-BOF, mais difundida no Brasil e no mundo, utiliza-se do coque de carvão mineral, altamente emissor de CO₂.

A opção alternativa a BF-BOF para descarbonizar a siderurgia passa pela redução direta do minério de ferro via forno de arco elétrico (DRI-EAF). Nesse modelo de produção, o minério de ferro é reduzido via gás natural ou gás-síntese. A substituição do gás natural por H2V pode promover uma redução relevante das emissões durante o processo produtivo.

Estratégias alternativas como a utilização de carvão vegetal, no método BF-BOF, podem apresentar limitações no quesito eficiência. Em 2022, o coque vegetal representou 7,1% do total de matérias primas relativas a carvão/coque utilizadas pelo setor siderúrgico brasileiro.

Apesar disso, rota integrada de carvão vegetal pode atingir uma emissão biogênica com fator de emissão de CO₂ muito baixa. Caso a barreira da eficiência seja vencida, apresenta-se como uma solução viável e de custo mais baixo para descarbonização.

Outra opção intermediária para a redução das emissões no setor siderúrgico é a rota de forno de arco elétrico utilizando sucata. Dados do IAB indicam que as emissões de CO₂ caem de 2,32 tCO₂/ton. de aço (via carvão mineral) para 0,67 tCO₂/ton. na rota via sucata e forno elétrico. Há, no entanto, limites para a obtenção e reutilização de sucata.

Modelo DRF-EAF com H₂V se apresenta, possivelmente, como a solução mais vantajosa para a descarbonização. Entretanto, altos investimentos (Capex) requerem apoio de políticas públicas (financiamento e/ou subsídios). Alternativamente, pode-se mesclar o H₂V no alto-forno até o limite em que o vapor gerado pela reação não obstrua o processo (algo como 5% a 10%). A longo prazo, com depreciação de investimentos em alto-forno, pode-se migrar para soluções renováveis.

A siderurgia irá requerer, para um salto relevante em direção à descarbonização, incentivos para o Capex necessário à substituição de processos. O uso de sucatas e de biomassa (carvão vegetal) tem se revelado um caminho mais econômico para a redução das emissões por parte de empresas brasileiras (a siderurgia brasileira já apresenta menores emissões por

esta razão), mas tem limitações relacionadas à disponibilidade de biomassa e à logística. Processos de redução direta a frio tendem a ser mais vantajosas a longo prazo.

HBI

Um caminho intermediário – entre a mineração e a siderurgia – é a produção de HBI (*Hot Briquetted Iron*) para exportação, enquanto os processos produtivos locais não migrarem do alto-forno para o arco elétrico.

- Mercado internacional é demandante de HBI renovável, como passo fundamental para seus processos de descarbonização;
- Estratégia acrescenta valor adicionado relevante à cadeia da mineração, ao agregar valor de transformação e substituir o minério de ferro ou o ferro-gusa em nossa pauta exportadora;
- Exportações podem ser mais adiante substituídas ou complementadas por vendas locais, à medida que os processos de redução direta amadurecem no Brasil.

3.4.5.2. Potenciais usos industriais: Fertilizantes

O Brasil é um mercado estratégico para fertilizantes: volumes expressivos, alto crescimento da demanda e domínio absoluto das importações.

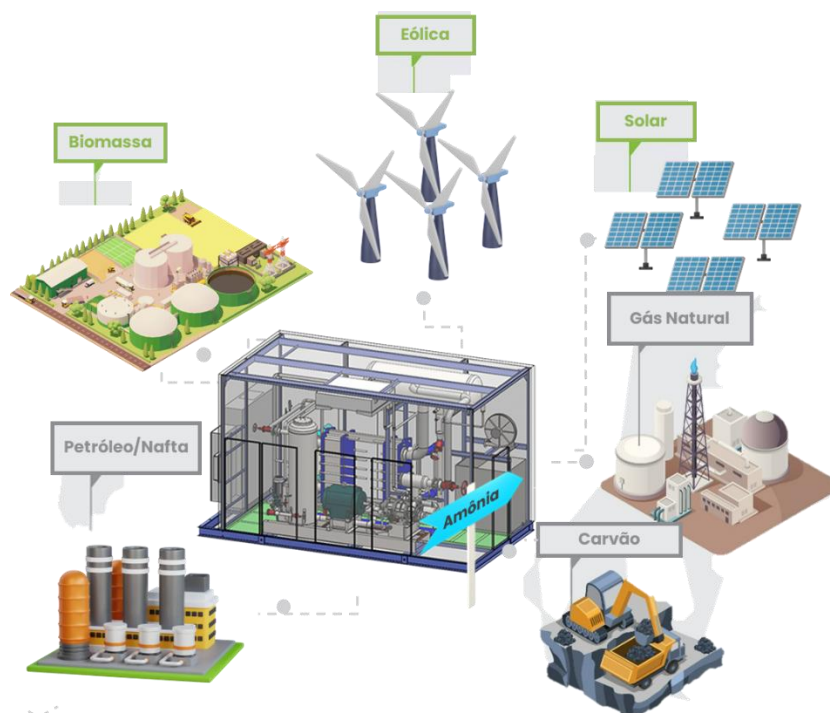
Toda expansão foi suprida por importações

- Brasil é o 4º país em consumo de fertilizantes, responsável por cerca de 8% do consumo global;
- De 2013 a 2023, o consumo de fertilizantes (NPK) cresceu 49,3%, média de 3,4% a.a.;

- Cerca de 85% dos fertilizantes consumidos no país são importados;
- País é importador líquido desde 1992 devido a um descompasso entre crescimento da demanda e produção nacional de fertilizantes: alto custo do gás natural no Brasil frente a outros países (Oriente Médio, Leste Europeu, EUA) é a principal razão deste descompasso;
- Produção local de H₂V pode destravar e impulsionar o setor, gerando economias relevantes de logística (que representam cerca de 25% a 30% do valor dos componentes nitrogenados)²³.

Insumos da Amônia

Figura 9: Produção de amônia



Fonte: Methanol Institute; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982022004644?via%3Dihub>

A amônia é um insumo essencial na fabricação de fertilizantes, produzida a partir de diferentes rotas tecnológicas:

²³ Fonte: ANDA.

- A produção mundial atual de amônia é de cerca 235 milhões de toneladas.
- A quase totalidade da produção mundial de amônia é feita a partir do consumo de combustíveis fósseis: cerca de 72% vêm do gás natural, 27% via carvão e nafta.
- A amônia derivada de fontes renováveis responde por menos de 1% da produção total.
- Com o predomínio de importações, custos com transporte de longa distância e armazenagem são expressivos; projetos de produção local de forma integradas e próxima à demanda são atraentes à medida que podem eliminar a perna de transporte de longo curso;
- Como rota alternativa, o **biometano** produzido nos arredores das lavouras (predominantemente das áreas de plantio de cana-de-açúcar) tende a ser mais competitivo do que a rota via hidrogênio de baixo carbono; questões como perfis regionais diferenciados e restrições de logística (interior para biometano; litoral para hidrogênio verde), usos específicos para cada processo e demanda maior que oferta por um bom período tendem a fazer com que rotas alternativas sejam complementares.

Demanda de amônia verde para fertilizantes

Plano Nacional de Fertilizantes²⁴ – metas relacionadas ao hidrogênio:

- Meta 29: Promover ativamente a integração da Política Nacional do Gás

²⁴ Secretaria de Assuntos Especiais (2021)

Natural e da Política Nacional do Hidrogênio no Brasil com a cadeia de fertilizantes, a partir de 2022;

– Meta 55: Fomentar o desenvolvimento tecnológico para a implantação de, pelo menos, uma planta de nitrogenados baseada em hidrogênio verde/azul a cada 10 anos, preferencialmente, com recursos privados e/ou do PPI;

– Meta 56: Fomentar e financiar a inovação para a diversificação da produção de fertilizantes básicos no Brasil como alternativa à ureia (nitratos, sulfatos), conectada à cadeia do hidrogênio verde, com capacidade de, pelo menos, 1 milhão de toneladas/ano de nitrogênio até 2040;

Estudos indicam que o custo do hidrogênio ainda é desafio, mesmo com as economias de transporte; incentivos aplicados à compra de H2V em valores similares aos existentes no regime de autoprodução de energia seriam suficientes para deslanchar os investimentos no setor.

→ Projeções LCA: **substituição total das importações de Nitrogenados**²⁵.

3.4.5.3. Utilização potencial de H2V em transportes de longo curso

Transportes de longo curso: marítimo, aviação, caminhões pesados e superpesados. **Desafios:** custos elevados e concorrência com outras rotas tecnológicas já testadas advindas de resíduos vegetais e animais (SAF via HEFA²⁶) ou via etanol (AtJ²⁷), potencialmente mais competitivas.

²⁵ O PNF considera substituição de apenas 43% dos Fertilizantes em 2050.

²⁶ HEFA = Hydroprocessed Esters and Fat Acids. Hidroprocessamento de óleos vegetais e animais derivados de culturas como soja, sorgo e outras leguminosas ou gorduras animais.

²⁷ AtJ = Alcohol to Jet. Desidratação do álcool para formar etileno, e em seguida polimerização (cadeias de hidrocarbonetos mais longas) e hidrogenação (saturar as ligações) para que o etileno se transforme em hidrocarboneto similar ao querosene.

- Uso direto como propulsor de motores a combustão ou em células de combustível são aplicações potenciais para o H₂ de baixa emissão de CO₂;
- O H₂V pode ser utilizado como insumo para a produção de combustíveis sintéticos, como o e-metanol, e-querosene e e-diesel, uma vez adicionado ao CO₂ capturado de processos biogênicos;
- Desafios ainda relacionados à competitividade do processo de eletrólise (e de rotas alternativas) e logística para atender à demanda em território nacional;
- Convivência com outras rotas – veículos elétricos e biocombustível + carbono biogênico capturado e convertido em e-fuels – eventualmente mais competitivas pode retardar o uso da rota via H₂V²⁸.

O metanol pode ser produzido por meio de diversas rotas tecnológicas, incluindo diferentes fontes renováveis:

- Estima-se que o mercado global de Metanol foi da ordem de 88 milhões de toneladas em 2024 e que deva crescer na casa dos 3,9% a.a. até 2034, para 123 milhões de toneladas;
- O metanol convencional, sobretudo produzido a partir de gás natural fóssil, vem ganhando espaço no mercado por conta de uma menor emissão de GEE e poluentes (NO_x e SO_x) relativamente aos óleos combustíveis pesados (bunker). No entanto, é um produto complexo: altamente tóxico, volátil e inflamável, e exige infraestrutura adequada de logística, armazenamento e transporte;

²⁸ Fonte: Methanol Institute; Nature.

- Produto versátil: aplicações no setor de transporte (navegação), equipamentos médicos, aquecimento e produtos domésticos, além de fertilizantes.
 - ~ 65% a partir do gás natural, 35% via carvão;
 - e-Metanol ~ 0,3% do total, via biomassa;
- Assim, tornou-se um combustível de transição para a chegada do **e-metanol ou metanol verde**, resultante da combinação de $H_2V + CO_2$ biogênico capturado.
- Os desafios para a maior presença destes combustíveis sustentáveis são a disponibilidade de H_2V competitivo e a presença de fontes seguras e próximas de biomassa para a captura de carbono.

Usos potenciais de H_2V – Metanol verde para transporte marítimo

- Transporte marítimo responde por cerca de 3% das emissões globais;
- Grandes armadores globais vêm assumindo compromissos de net zero e buscando assegurar oferta de metanol ou amônia verde em volumes crescentes (CORSIA);
- Pedidos ainda para prazos curtos, enquanto os de prazo mais longo aguardam que os preços se estabilizem;
- Há ainda diversas aplicações industriais, sobretudo na indústria química e petroquímica, como solvente na fabricação de resinas, plásticos e adesivos e na síntese de produtos farmacêuticos;

O metanol verde pode permanecer em estado líquido à temperatura ambiente, o que facilita seu armazenamento e transporte relativamente aos combustíveis gasosos.

Outros potenciais usos do H2V – Caminhões pesados e superpesados

Célula de combustível: desafios importantes relacionados à eficiência energética:

- Veículos pesados para média e longa distância movidos à célula de combustível podem ser uma alternativa à descarbonização desse nicho;
- A alta densidade energética por unidade de massa do hidrogênio é uma das vantagens dessa rota;
- Por outro lado, há perdas significativas no ciclo energético completo dos veículos à célula combustível de hidrogênio (FCEV). A eficiência energética dos veículos a FCEV é de apenas 1/3 da eficiência dos veículos movidos à bateria – de cada 100 Kwh gerados de energia renovável, apenas 23 Kwh são aproveitáveis pelos FCEV, contra 69 Kwh dos veículos elétricos;
- Alternativa é a amônia verde como combustível direto, com maior capacidade de armazenamento e transporte e sem perdas de conversão energética;
- Presença de infraestrutura de abastecimento pulverizada e segura é vital para a expansão desta rota;

Reforma-vapor de etanol é alternativa para H2 de baixo carbono

- Ampla expertise do Brasil no setor sucroalcooleiro pode fazer com que esta rota se torne competitiva antes da eletrólise;
- Rebatimentos sobre a energia renovável serão menores: o uso de energia elétrica apenas no processo de reforma, e não como insumo (como no

caso da eletrólise).

Indústrias potencialmente demandantes do H2V – Transporte aéreo²⁹

O hidrogênio pode também contribuir para a descarbonização do setor de transportes aéreos, embora seja necessário testar as tecnologias em escala comercial e reduzir os custos de produção. Concorrência com outras rotas tecnológicas (em particular, HEFA e AtJ) também é desafio à adoção do H2 neste setor.

- Embora haja resultados positivos que indicam a viabilidade técnica e operacional do uso do H2 diretamente na aviação, a infraestrutura para distribuição e armazenamento de hidrogênio é um desafio relevante para a sua adoção em larga escala;
- Já o uso combinado de H2V com CO2 biogênico capturado produz o combustível sintético de aviação (e-querosene), que pode ser utilizado em jatos convencionais sem a necessidade de novas e pesadas infraestruturas de transporte e armazenamento.

Querosene de aviação produzido a partir da biomassa (SAF via etanol) é alternativa promissora ao e-querosene, mas provavelmente complementar. Há compromissos robustos de neutralidade de emissões de carbono em tratados privados e institucionais – ICAO/ONU e IATA – que podem fazer com que a demanda seja potencialmente maior que a oferta por bastante tempo.

²⁹ Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923009187>

3.5. Projeções

3.5.1. Caminhos da demanda por energia renovável

3.5.1.1. Demanda direta por energia elétrica



Tecnologia: data centers, IA, mineração de criptomoedas



Recarga de baterias, incluindo Frota elétrica, armazenamento de energia e outros*



Eletrificação da indústria, incluindo petroleira*

3.5.1.2. Demanda por energia elétrica via H2V



Indústria atual intensiva, demandante de combustíveis não-renováveis



Substituições de importações em setores que se tornaram não-competitivos (ex. fertilizantes)



Combustíveis para longas distâncias (consumo interno e exportação)



Combustíveis para transporte Rodoviário pesado



Combustíveis para o setor energético

3.5.2. Demanda potencial

Demanda atual por combustíveis substituíveis (ponto de partida) considerando os ajustes positivos (aumentos da demanda) e negativos (redução da demanda) abaixo:

(+) projeções de demanda de longo prazo refletem crescimento estimado da produção dos setores demandantes, via cenário macroeconômico-setorial

(-) Eficiência energética

(-) Potencial das rotas concorrentes com o H2V na descarbonização

Demanda potencial: procedimentos

Projeções de consumo de H2V são construídas a partir do potencial de substituição de combustíveis fósseis em setores selecionados (consumo efetivo do Balanço Energético Nacional 2024, projetado para 2050 considerando estimativas de eficiência energética) acrescido pela demanda gerada em novos mercados, tal como o de fertilizantes – cuja projeção foi realizada com base em informações de consumo interno reportadas pela ANDA (Associação Nacional para a Difusão de Adubos) e projetadas pela LCA com base em metas do Plano Nacional de Fertilizantes (PNF/Brasil) e informações disponibilizadas por players do setor.

Eficiência energética

Consumo de energia dos setores é determinado pelo crescimento do setor. Contudo, eficiência energética faz com que o consumo de energia cresça a taxas inferiores à produção dos setores.

Premissa: ganhos de eficiência energética em 2005 a 2022 extrapolados até 2050.

ODEX: indicador que apura o progresso da eficiência energética. É utilizado pela União Europeia, no programa ODYSSEE database para monitoramento dos ganhos de eficiência (Enerdata, 2020).

- Eficiência projetada 2023-50: Indústria - 5,6% Transporte - 16,3%

Quadro 3: Eficiência energética: ODEX Brasil

Setor	Ganho 2005-22 (%)	Eficiência média anual
Residencial	19,9	1,1%
Industrial	3,5	0,2%
Transporte	10,0	0,6%
Total Brasil	8,6	0,5%

Fonte: EPE <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao788/Atlas%20da%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20Brasil%202023.pdf>

Indústria atual

Quadro 4. Combustíveis e setores e sujeitos à substituição por H2V

Combustíveis	Setores
Petróleo	Cimento
Gás Natural*	Alimentos e Bebidas
Carvão Vapor	Ferro-Gusa e Aço
Óleo Diesel	Ferroligas
Óleo Combustível	Mineração e Pelotização
Gasolina	Não-Ferroso e Outros Metalurgia
GLP*	Química
Querosene	Papel e Celulose
Coque de Carvão Mineral**	Cerâmica
Outras Sec. Petróleo	

* Nos setores de Cimento; Alimentos e Bebidas; Ferro-Gusa e Aço; Ferro-Ligas; Mineração e Pelotização; Não-Ferrosos e Outros da Metalurgia; Química; Papel e Celulose e Cerâmica foi considerado que 70% do GN e do GLP utilizados nesses setores serão

substituídos por eletrificação direta, em vez de H2V, no cenário de Descarbonização Total; 50% cenário de Descarbonização Moderada e 20% na Descarbonização Marginal.
 ** Conforme conversas com players do setor apenas 1,5% do coque poderia ser substituído sem que haja troca dos altos fornos por fornos elétricos

Share de H2V

A descarbonização da produção industrial e dos transportes no Brasil tem o H2V como potencial rota, entre outras – tais como a biomassa, carvão vegetal, biometano, biodiesel e a própria eletrificação direta.

O share do H2V na matriz dependerá das características técnicas de processo, da disponibilidade e competitividade relativa das diferentes soluções – algo dinâmico e ainda não estabilizado. Assim, estimamos a presença do H2V em nossa matriz energética a partir de hipóteses sobre: o grau de substituição potencial de fontes fósseis por hidrogênio verde no tempo, o setor de atividade (*hard to abate*) e o ritmo de substituição em três cenários, conforme abaixo:

Quadro 4: Potencial de descarbonização e do share de H2V, por segmento da indústria

Segmentos da Indústria	Combustíveis fósseis potencialmente de descarbonizáveis	Share H2V na descarbonização*		
		Total	Moderado	Marginal
Cimento	59,9%	100%	68%	33%
Alimentos e bebidas**	5,4%	48%	43%	21%
Ferro-Gusa e Aço	65,0%	52%	23%	23%
Ferro-Ligas	11,3%	67%	47%	23%
Mineração e Pelotização	52,6%	80%	52%	16%
Não-Ferrosos e Outros Metalurgia	51,9%	80%	56%	27%
Química	63,9%	61%	49%	27%
Papel e Celulose	10,4%	56%	48%	28%
Cerâmica	39,9%	38%	37%	21%
Fertilizantes (potencial de substituição)	100,0%	50%	50%	50%

* O share de H2V na descarbonização é diretamente impactado pelo potencial de eletrificação direta

** O baixo percentual de combustíveis fósseis potencialmente descarbonizáveis decorre do elevado consumo de energia de produtos da cana (indústria do açúcar)

Quadro 5: Potencial de descarbonização e do share de H2V, por tipo de transporte

Transporte	Potencial de Descarbonização	Share H2V na Descarbonização		
		Total	Moderado	Marginal
Rodoviário – pesados	76,2%	10%	7%	2%
Ferroviário	77,8%	50%	33%	12%
Marítimo	100,0%	50%	33%	12%
Aéreo	100,0%	50%	33%	12%

Além da indústria e transportes, consideramos ainda o potencial de entrada de H2V no setor energético; em função de suas propriedades próximas ao GN, consideramos que há potencial de substituição de GN por H2V em até 50% das térmicas atuais, em especial nas localizadas próximas a gasodutos e a potenciais hubs de produção de hidrogênio, em Zonas de Processamento de Exportação (ZPEs).

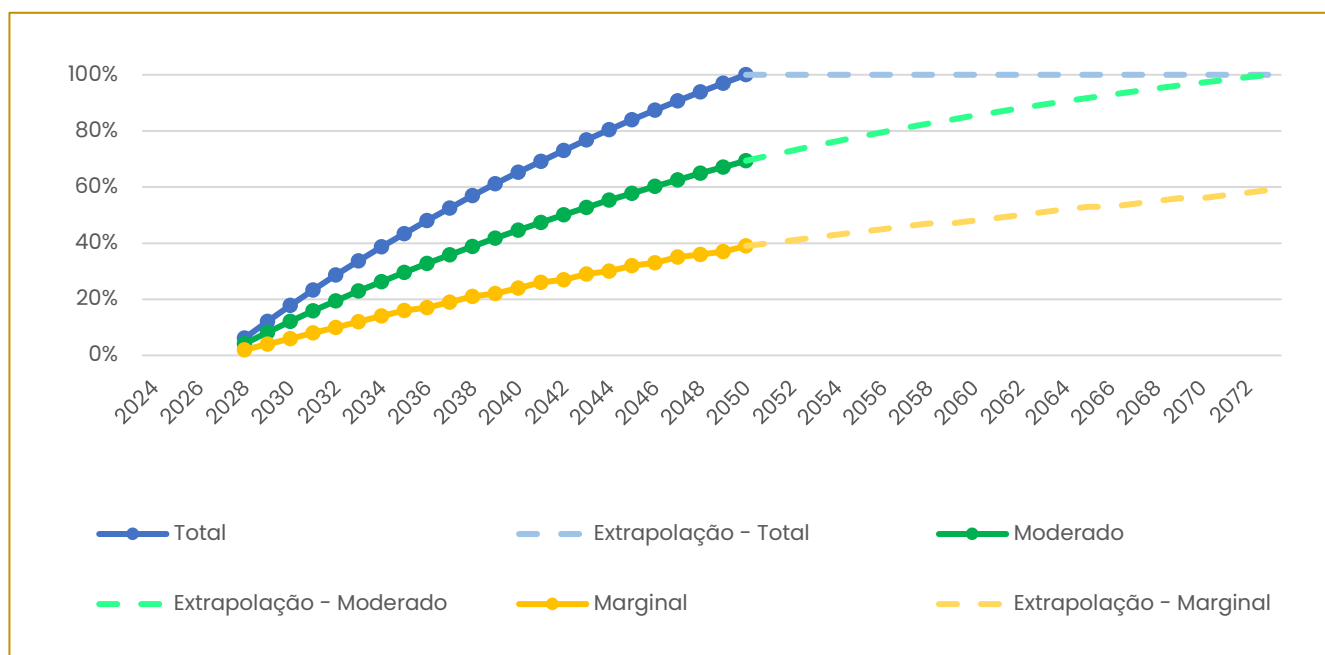
Curva de substituição dos combustíveis fósseis

Premissas: entrada em operação dos projetos de produção comercial de H2V a partir de 2028. O cenário de **Descarbonização total da economia brasileira** traz a premissa de que haverá 100% de substituição dos combustíveis fósseis até 2050; no **cenário moderado**, a premissa é de que cerca de 70% dos combustíveis fósseis terão sido substituídos até 2050. Neste cenário, a substituição total dos combustíveis fósseis se dará em 2073.

No **cenário marginal**, no qual **somente a nova capacidade produtiva é descarbonizada**, o Brasil atinge 59% de substituição dos fósseis por renováveis

em 2073.

Gráfico 9 - Ramp-up da Descarbonização



3.5.3. Projeções de demanda por energia renovável

Para dar números a estes cenários de substituição de fontes energéticas, consideramos os percentuais estimados na seção e no gráfico anterior (Gráfico 9) sobre as projeções de demanda potencial tratadas na seção 3.4.1.3 acima, de forma a obter a demanda por H₂V. Em seguida, convertemos esta demanda por H₂V em demanda por energia renovável com base em projetos de produção de hidrogênio verde aos quais tivemos acesso. Estes projetos consideram o uso do *grid* por conta da necessidade de segurança e disponibilidade total, sem contudo considerar a composição da oferta para complementar o parque gerador e atender a esta demanda.

➤ Cenário de descarbonização total:

I. Até 2050, os combustíveis fósseis serão totalmente substituídos por

fontes renováveis nos principais setores energo-intensivos.

II. Novas demandas marginais derivadas de acréscimo de novas capacidades produtivas deverão partir utilizando combustíveis de fontes renováveis já a partir dos próximos anos (2026-30); os processos produtivos industriais mais maduros deverão abandonar o uso de combustíveis fósseis e gradualmente migrar para fontes renováveis;

➤ **Cenário de descarbonização moderada:**

I. Em 2050, a descarbonização atinge 50% da atual capacidade de produção dos principais setores energo-intensivos;

II. Demandas marginais derivadas da expansão da produção passam a utilizar gradualmente combustíveis renováveis; assim, produção migra para fontes renováveis a médio e longo prazos;

➤ **Cenário de descarbonização marginal:**

Neste cenário, apenas a demanda marginal ou adicional (decorrente de aumentos da capacidade) será substituída por eletricidade e/ou combustíveis de fontes renováveis.

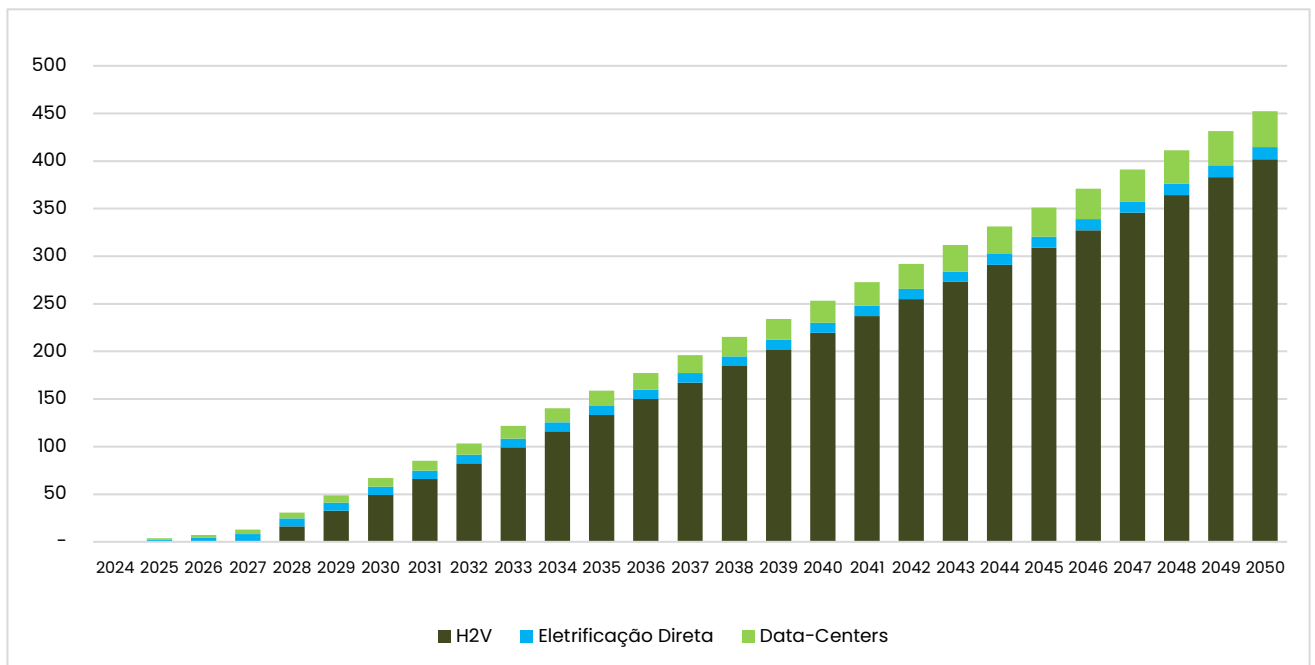
Nos três cenários, consideramos que a atual sobreoferta de energia será consumida nos anos seguintes (2026-28) até que as novas cargas ligadas à descarbonização (H2V, eletrificação e datacenter) iniciem *ramp-up* e demandem novas unidades geradoras. Neste momento, consideramos em todos os cenários que **cada 1 GW de eletrolisador corresponde a 3,3 GW de energia renovável nova (fontes eólica, solar fotovoltaica e outras) plugada na demanda ou na rede, de forma que a planta de hidrogênio possa rodar ininterruptamente. No caso de eletrificação direta e datacenter, as medidas já**

estão em GW de energia necessária para abastecê-los.

3.5.3.1. Demanda por energia renovável – descarbonização total

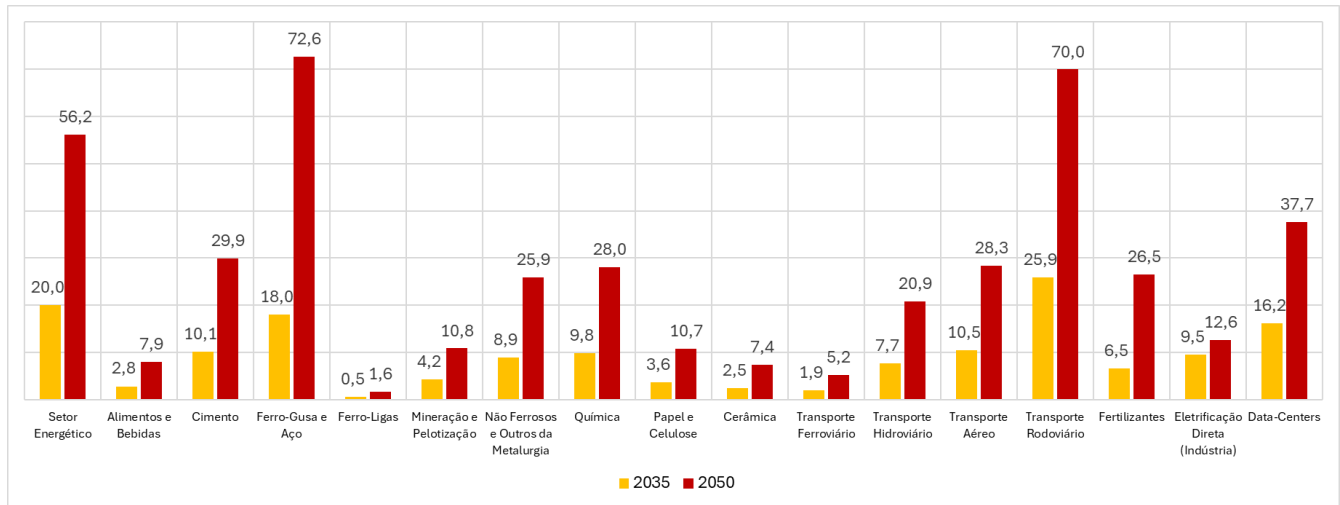
Cenário de descarbonização total: demanda por capacidade de geração de energia renovável, 2024-2050. Expansão total de 452,2 GW – média anual (2024-50) de 16,7 GW/ano, sendo: 401,9 GW destinadas à produção de H2V; 12,6 GW de Eletrificação Direta dos processos industriais e 37,7 GW no setor de Data-Centers.

Gráfico 10: Demanda por energia renovável – cenário de descarbonização total



No cenário de descarbonização total, os setores que mais devem demandar energia renovável no curto a médio prazo – 2035 – são os setores de Transporte Rodoviário (25,9 GW); Energético (20 GW); Ferro-Gusa e Aço (18 GW); Data Centers (16,2 GW); e Transporte Aéreo (10,5 GW). Já no longo prazo – 2050 –, devem demandar as maiores capacidades os setores de Ferro-Gusa e Aço (72,6 GW); Transporte Rodoviário (70 GW); Energético (56,2 GW); Data Centers (37,7 GW) e Cimento (29,9 GW).

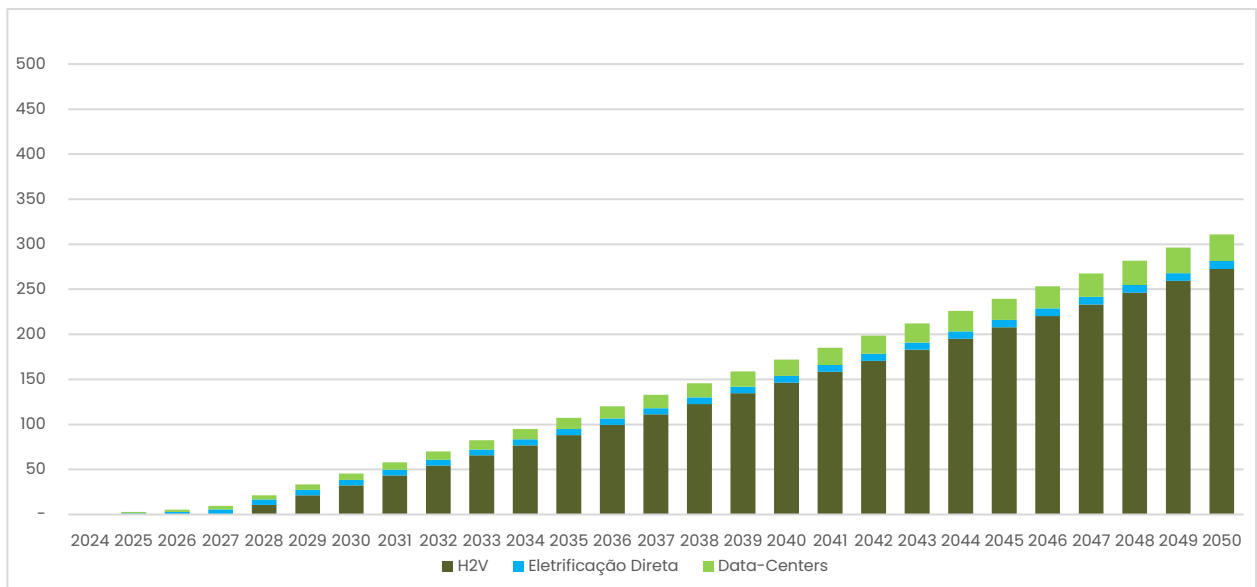
Gráfico 11: Demanda por energia renovável por setor – cenário de descarbonização total



3.5.3.2. Demanda por energia renovável – descarbonização moderada

Cenário de descarbonização moderada: demanda por capacidade de geração de energia renovável, 2024- 2050. Expansão total de 310,8 GW - média anual (2024-50) 11,5 GW/ano, sendo: 272,6 GW destinadas à produção de H2V; 9 GW de Eletrificação Direta dos processos industriais e 29,2 GW no setor de Data-Centers

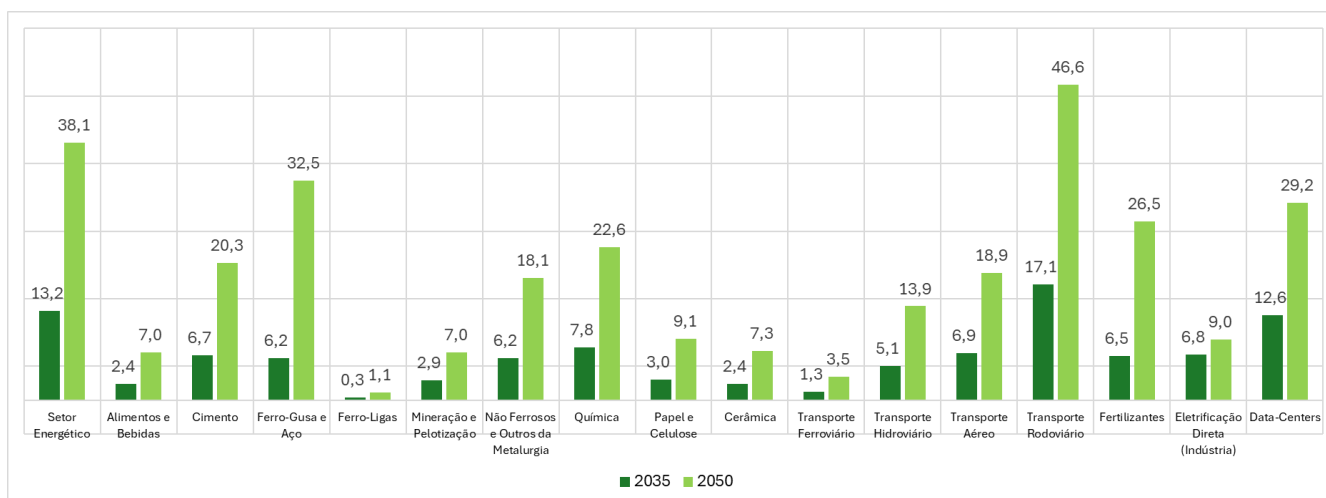
Gráfico 12: Demanda por energia renovável – cenário de descarbonização moderada



No cenário de descarbonização moderada, os setores que mais devem

demandar energia renovável no curto a médio prazo – 2035 – são os setores de Transporte Rodoviário (17,1 GW); Energético; (13,2 GW); Data Centers (12,6 GW); Química (7,8 GW); e Transporte Aéreo (6,9 GW). Já no longo prazo – 2050 –, os setores de Transporte Rodoviário (46,6 GW); Energético (38,1 GW); Ferro-Gusa e Aço (32,5 GW); Data Centers (29,2 GW) e Fertilizantes (26,5 GW) devem demandar as maiores capacidades.

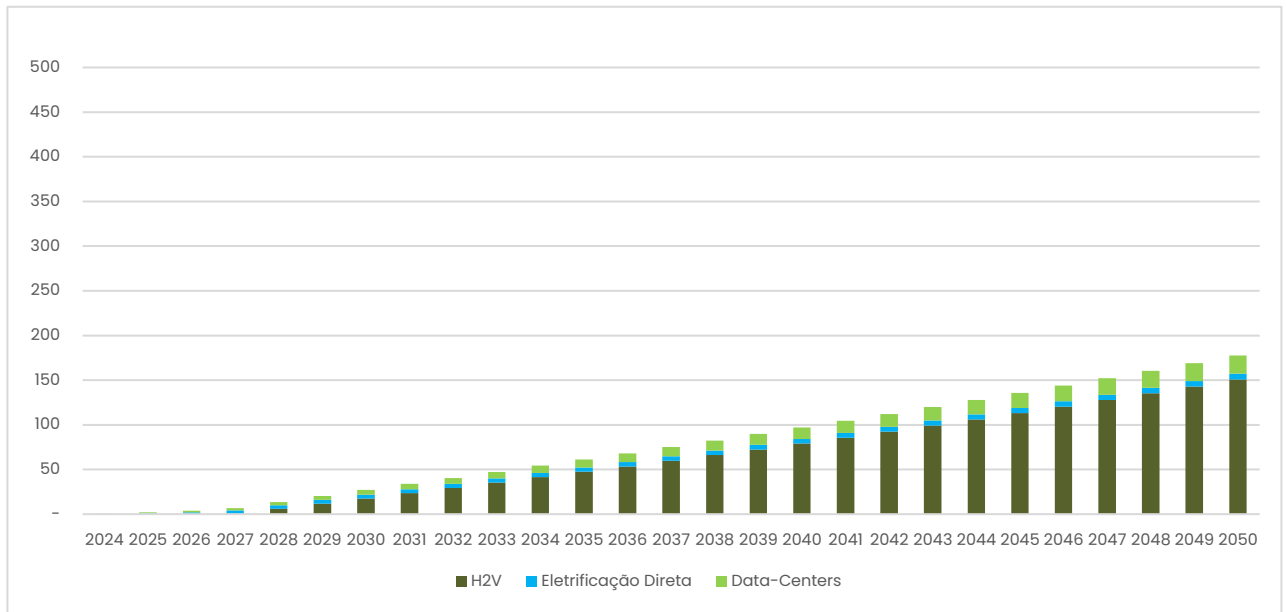
Gráfico 13: Demanda por energia renovável por setor – cenário de descarbonização moderada



3.5.3.3. Demanda por energia renovável – descarbonização marginal

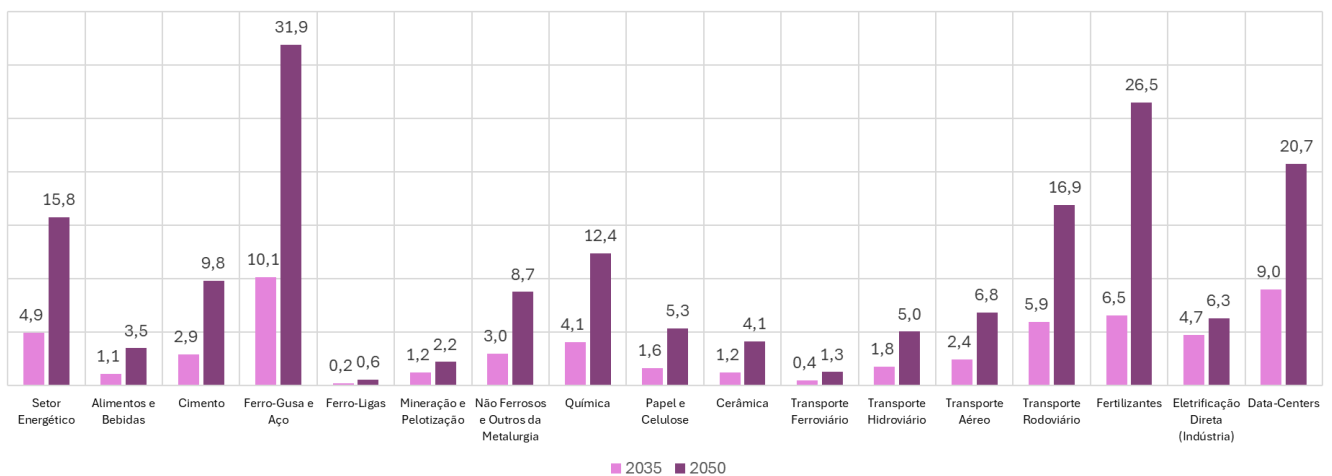
Cenário de descarbonização na margem: demanda por capacidade de geração de energia renovável, 2024- 2050. Expansão total de 177,8 GW - média anual (2024-50) 6,6 GW/ano, sendo: 150,7 GW destinadas à produção de H2V; 6,3 GW de Eletrificação Direta dos processos industriais e 20,7 GW no setor de Data-Centers.

Gráfico 14: Demanda por energia renovável – cenário de descarbonização marginal



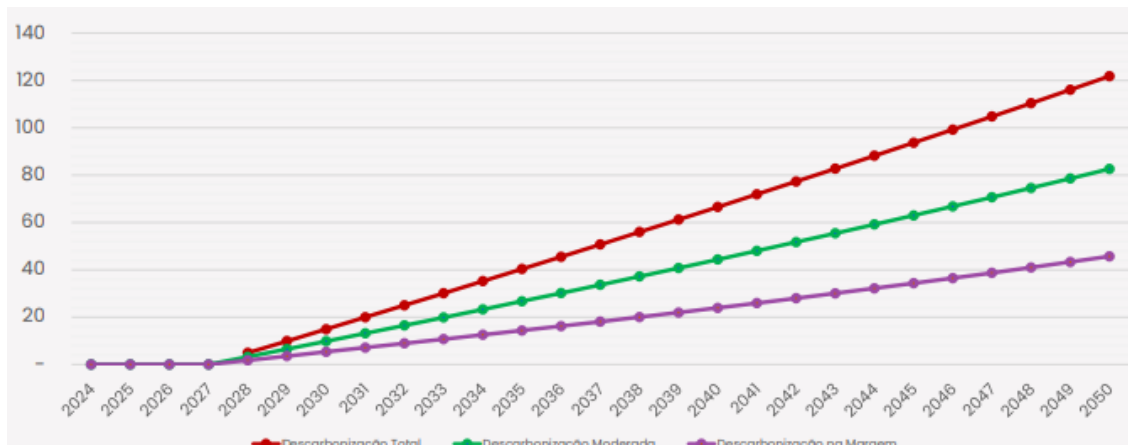
No cenário de descarbonização na margem, os setores que mais devem demandar energia renovável no curto a médio prazo –2035 – são os setores de Ferro-Gusa e Aço (10,1 GW); Data Centers (9 GW); Fertilizantes (6,5 GW); Transporte Rodoviário (5,9 GW) e Energético (4,9 GW). Já no longo prazo – 2050 –, os setores de Ferro-Gusa e Aço (31,9 GW); Fertilizantes (26,5 GW); Data Centers (20,7 GW); Transporte Rodoviário (16,9 GW) e Energético (15,8 GW) devem demandar as maiores capacidades

Gráfico 15: Demanda por energia renovável por setor – cenário de descarbonização marginal



Cenários para H2V – Descarbonização total, moderada e marginal

Gráfico 16 - Necessidade de Eletrolisadores (acumulado, em GW)



Demanda por energia renovável: tabelas síntese

Cenário descarbonização total: cenário de baixa demanda por novas cargas de energia é revertido a partir de 2028. Aumento de carga de energia 2028-2050: 19,4 GW/ano.

Quadro 6: Demanda por energia renovável – 2025 a 2037 – cenário de descarbonização total

Instalação de capacidade de energia (GW/ano)	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
H2V	0,0	0,0	0,0	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9	16,9	17,0	17,2
Eletrificação direta	1,9	2,0	4,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Data-Centers/IA	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Veículos elétricos	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Demanda por carga nova	3,4	3,5	5,6	18,0	18,1	18,3	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8	18,9	19,1

Quadro 7: Demanda por energia renovável – 2038 a 2050 – cenário de descarbonização total

Instalação de capacidade de energia (GW/ano)	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
H2V	17,3	17,4	17,5	17,7	17,8	17,9	18,0	18,2	18,3	18,3	18,6	18,7	18,9
Eletrificação direta	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Data-Centers/IA	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Veículos elétricos	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Demanda por carga nova	19,3	19,3	19,5	19,7	19,8	20,0	20,1	20,3	20,4	20,5	20,7	20,9	21,1

Cenário descarbonização moderada: demandas por cargas de energia são moderadas, porém bastante relevantes a partir de 2028. Demanda média por aumento de carga de energia 2028-2050: 13,4 GW/ano

Quadro 8: Demanda por energia renovável – 2025 a 2037 – cenário de descarbonização moderada

Instalação de capacidade de energia (GW/ano)	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
H2V	0,0	0,0	0,0	10,7	10,8	10,9	11,0	11,0	11,1	11,2	11,3	11,4	11,5
Eletrificação direta	1,4	1,4	2,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Data-Centers/IA	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Veículos elétricos	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Demanda por carga nova	2,5	2,6	4,1	12,0	12,1	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8	12,9	13,1

Quadro 9: Demanda por energia renovável – 2038 a 2050 – cenário de descarbonização moderada

Instalação de capacidade de energia (GW/ano)	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
H2V	11,7	11,7	11,9	12,0	12,1	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	13,0	13,2	13,3
Eletrificação direta	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Data-Centers/IA	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Veículos elétricos	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Demanda por carga nova	13,3	13,3	13,5	13,7	13,8	14,0	14,1	14,2	14,4	14,5	14,7	14,9	15,1

Cenário descarbonização na margem: demandas por cargas de energia são mais modestas, porém bastante relevantes a partir de 2028. Demanda média por aumento de carga de energia 2028-2050: 7,6 GW/ano

Quadro 10: Demanda por energia renovável – 2025 a 2037 – cenário de descarbonização na margem

Instalação de capacidade de energia (GW/ano)	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
H2V	0,0	0,0	0,0	5,8	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	6,0	6,0	6,1	6,2
Eletrificação direta	1,0	1,0	2,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Data-Centers/IA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Veículos elétricos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Demanda por carga nova	1,8	1,8	2,9	6,7	6,8	6,9	7,0	6,9	7,0	7,0	7,1	7,2	7,4

Quadro 11: Demanda por energia renovável – 2038 a 2050 – cenário de descarbonização na margem

Instalação de capacidade de energia (GW/ano)	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
H2V	6,4	6,4	6,5	6,6	6,7	6,9	6,9	7,1	7,2	7,3	7,5	7,7	7,9
Eletrificação direta	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Data-Centers/IA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Veículos elétricos	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Demanda por carga nova	7,5	7,5	7,7	7,6	7,7	7,9	7,9	8,1	8,2	8,3	8,5	8,7	8,9

3.5.4. Projeções LCA e outros estudos

Embora estejam disponíveis diversos estudos estimando o crescimento da produção/consumo de hidrogênio no mundo e em algumas economias avançadas, ainda não estão disponíveis estudos públicos aquilatando a expectativa de demanda/produção de H2V no Brasil que permita comparar as projeções por setor e subsetor da economia delineadas neste trabalho³⁰.

O estudo recente desenvolvido pela CNI é o que mais se aproxima do realizado pela LCA. No entanto, apesar do trabalho LCA ter investigado o potencial de descarbonização e utilização do hidrogênio dos mesmos setores industriais, a ausência de projeções no estudo CNI impede uma comparação direta das perspectivas de hidrogênio em cada setor. Assim, adotamos o indicador qualitativo do grau de facilidade da implementação do H2 no curto e médio prazos, que indicam facilidade de substituição para todos os setores projetados pela LCA, exceto mineração e siderurgia³¹.

³⁰ Os estudos do BNEF não detalham suas projeções por segmento consumidor.

³¹ Conforme já discutido, a descarbonização desse setor exige troca das plantas instaladas, sendo compatível com o resultado do estudo CNI de dificuldade de descarbonização no curto prazo.

Figura 10: Potencial de substituição de combustíveis fósseis, no curto prazo, em setores industriais

Sector	Consumo de energia fóssil total (mil tep)	Percentual de energia fóssil na matriz	Fração de combustíveis gasosos na matriz	Facilidade de implementação do H ₂
CIMENTO	3.201	74,8%	0,1%	4
FERRO-GUSA E AÇO	12.549	74,0%	7,6%	1
FERRO-LIGAS	230	16,9%	0,2%	1
MINERAÇÃO E PELOTIZAÇÃO	1.157	50,4%	11,4%	1
NÃO FERROSOS E OUTROS DA METALURGIA	2.909	54,9%	10,7%	1
QUÍMICA	4.357	67,1%	30,8%	4
MATÉRIA-PRIMA DA QUÍMICA	8.651	99,7%	35,7%	5
ALIMENTOS E BEBIDAS	1.507	6,9%	4,1%	4
TÊXTIL	222	26,0%	21,0%	4
PAPEL E CELULOSE	1.703	12,2%	7,5%	4
CERÂMICA	1.755	42,7%	33,9%	4
CERÂMICA – S/ LENHA	1.755	82,3%	65,3%	4
CERÂMICA – S/ GÁS NATURAL	362	13,3%	0,0%	4
OUTROS	1.804	24,5%	14,6%	4
REFINO	5.378	93,6%	37,9%	5

Fonte: elaborado a partir de dados de EPE (2022).

Legenda: fontes consideradas na análise: gás natural, carvão a vapor, lenha, produtos da cana, outras fontes primárias, biodiesel, óleo diesel, óleo combustível, GLP, querosene, gás de cidade e de coqueria, eletricidade, carvão vegetal, outras secundárias de petróleo, alcatrão, etanol anidro, etanol hidratado. "Eletricidade" é considerada no denominador para o cálculo do "percentual de energia fóssil na matriz". "Eletricidade" e "Outras fontes primárias" são negligenciadas dentro do "Consumo de energia fóssil total", por não ser possível segregar a participação de fósseis/renováveis na demanda de cada setor. Em "Fração de combustíveis gasosos na matriz" utilizam-se como numerador "gás natural", "gás de cidade e coqueria" e "GLP".

3.5.5. Cenários recentes para a produção de H2 no mundo até 2050

Mercado global para Hidrogênio atingiu cerca de 97 milhões de toneladas em 2023, com quase 100% dele "cinza" e sendo utilizado como insumo industrial

Levando em conta uma mediana de 9 cenários recentes (2023 em diante), de 6 entidades distintas, a produção global de H2 deverá chegar a 390 milhões de toneladas em 2050, com pouco mais de 90% desse volume correspondendo a H2V e H2 azul. Ou seja, a produção de H2 de baixo carbono deverá sair de cerca de 1 milhão de toneladas em 2024 (projeção recente da IEA) para cerca de 355 milhões em 2050

Nesse contexto, os cenários para a produção de H2V elaborados neste trabalho apontam que o Brasil teria, em 2050, um *market share* na produção global de H2BC de 1,8% no cenário de descarbonização na margem; de 3,2% no cenário de descarbonização moderada; e de 4,8% no cenário de descarbonização completa – percentuais muito inferiores ao *share* global do Brasil em setores

como papel e celulose, commodities agrícolas e minerais e outras que também contam com vantagens competitivas.

Quadro 12: Resumo da projeção de produção de hidrogênio - estudos diversos.

Ano	Projeções para a produção global de Hidrogênio, em milhões de toneladas										Projeções para a produção brasileira de Hidrogênio verde, em milhões de toneladas		
	Deloitte 2023	IEA 2023 (NZE)	McKinsey 2024 (Current Trajectory)	McKinsey 2024 (Fading Momentum)	McKinsey 2024 (Further Acceleration)	McKinsey 2024 (Achieved Commitments)	BNEF 2024	DNV 2024	S&P 2024	Mediana Cenários	Descarbonização Total	Descarbonização Moderada	Descarbonização Marginal
2023	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	-	-	-
2030	172	150	-	-	124	-	-	120	120	124	2	1	1
2035	290	215	-	-	-	-	-	150	-	-	6	4	2
2040	407	-	-	-	258	-	-	180	-	-	10	7	4
2045	502	-	-	-	-	-	-	230	-	-	14	10	5
2050	598	430	301	175	437	497	380	280	268	390	19	13	7

3.5.6. Riscos ao desenvolvimento da produção de H2 no mundo até 2050

Como foi apontado no slide anterior, em torno do cenário mediano (produção de cerca de 390 milhões de toneladas de Hidrogênio em 2050, com 355 milhões se referindo ao H2 de baixo carbono) há uma dispersão relativamente elevada.

Os cenários apresentados anteriormente apontam que o mercado global de Hidrogênio poderá se situar em algo entre 175 e 598 milhões de toneladas em 2050.

Embora a diferença numérica entre o cenário mediano (390 mt) e os extremos seja relativamente simétrica (desvio de cerca de 210 mt para baixo e para cima), os riscos, no curto prazo, parecem pender mais para o cenário mais modesto.

Para além do desafio de redução do LCOH para níveis que permitam que o H2V e o H2 azul ganhem competitividade ante o H2 cinza (algo que se torna ainda mais relevante diante dos valores de *carbon tax* adotados mundo afora, ainda

muito abaixo dos níveis necessários para viabilizar o cumprimento das metas do acordo de Paris – ver próximo slide), há ainda muita indefinição sobre as rotas tecnológicas de descarbonização passíveis de serem adotadas no mundo e no Brasil, sobretudo a partir da década de 2030. Correndo por fora também há a possível concorrência do hidrogênio branco (ou natural), com descobertas de reservas relativamente elevadas em alguns países (França e Albânia, dentre outros).

Ademais, há riscos de natureza política à medida que candidatos sem compromisso com a agenda de descarbonização sejam eleitos, o que pode fazer com que a transição energética global seja desacelerada, impactando negativamente justamente as tecnologias ainda não disseminadas. Nos EUA, por exemplo, houve a saída do país dos acordos internacionais de redução de carbono e uma mudança radical na ênfase por uma agenda pró extração de petróleo e gás, que aumentaria a oferta global e reduziria os preços dos hidrocarbonetos, uma vez que o país já se tornou exportador líquido desses produtos.

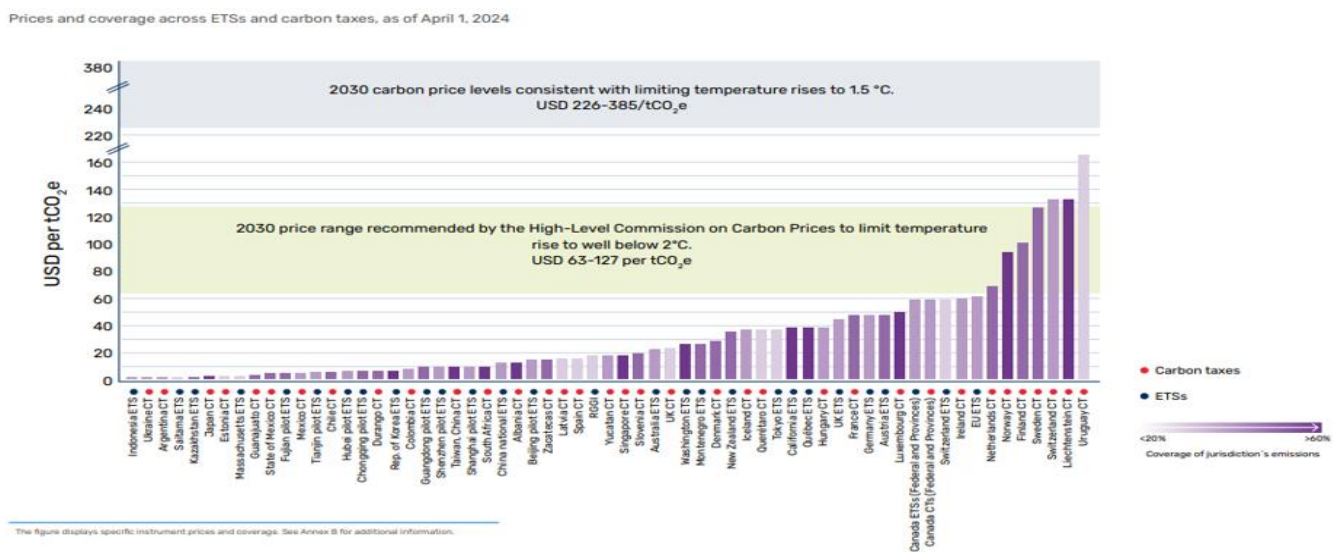
A consequência imediata dessa guinada foi o abandono de projetos baseados em energia renovável nos EUA (eólicas offshore, plantas de SAF e de hidrogênio verde) e uma onda de pessimismo sobre a viabilidade de muitos desses projetos sem pesados incentivos públicos; da mesma forma, iniciativas de contratação de hidrogênio verde na Europa – leilões disponibilizando recursos públicos para cobrir o *gap* entre os preços de longo prazo de novos projetos de hidrogênio verde relativamente aos fósseis – avançaram muito pouco, abrindo preocupações com relação à efetividade e a exequibilidade dos projetos que venceram os leilões, sem que houvesse compromissos firmes de entrega.

Com isso, o Brasil passou a ser uma das regiões de interesse de investidores por conta de vantagens competitivas importantes. A Lei 14.498/2024, ainda em fase de regulamentação, contribui para isso: mesmo oferecendo recursos fiscais limitados relativamente aos demais países, a Lei definiu o marco regulatório e indicou tratar-se de um produto prioritário para a agenda nacional, parte relevante de nossa política de Transformação Ecológica.

Memo: taxaçoão do carbono mundo afora

Vale notar, para além das informações apresentadas na figura abaixo, que o Banco Mundial estima que, atualmente, apenas 25% das emissões de gases de efeito estufa estão “cobertas” por algum tipo de taxaçoão do carbono e/ou algum sistema de comércio de emissões (*cap and trade system*).

Figura 11: Preço da emissão de carbono - 2030



Fonte: “State and Trends of Carbon Pricing 2024”, Banco Mundial

4. Impactos econômicos

IMPACTOS ECONÔMICOS

Os potenciais impactos sobre a economia dos cenários de descarbonização traçados nesse trabalho se materializariam por diversos canais e de formas distintas ao longo do tempo.

Grosso modo, os efeitos diretos ocorrem em duas grandes fases:

- Na fase de investimento (Capex), que dura cerca de 3 anos (plantas de H2V e renováveis). Neste caso, trata-se de efeitos temporários, ainda que relativamente persistentes, dado o prazo de maturação relativamente longo desse tipo de investimento, bem como a possibilidade de que o Brasil possa ter um ciclo de ampliação desse setor ao longo de duas ou três décadas;
- Na fase de produção de H2V e energia (Opex), que corresponde a um efeito permanente.

Para além dos impactos diretos, há também os efeitos indiretos (associados aos fornecedores de bens e serviços para essa nova indústria) e os efeitos induzidos (associados aos efeitos sobre a economia dos salários e lucros pagos pelas empresas do setor, que se transformam em consumo de diversos bens e serviços, bem como em investimentos em outros setores).

Há, ainda, os efeitos econômicos e sociais de médio e longo prazo associados à redução das emissões de gases de efeito estufa, que podem ser valorados levando em conta estimativas do Custo Social do Carbono e/ou preços do carbono praticados no mercado.

4.1. Estimativa dos Impactos Econômicos

Para estimar os impactos, diretos e indiretos/induzidos, associados à fase de Capex, iremos utilizar estimativas econométricas (detalhadas mais adiante) do chamado “efeito multiplicador” dos investimentos em ativos fixos sobre o PIB.

Para estimar esse efeito multiplicador, lançamos mão da abordagem VARX (*Vector Auto Regression*, com variáveis exógenas). Nessa modelagem econométrica, estima-se um sistema de equações, permitindo identificar uma rica interconexão entre todas as variáveis consideradas no sistema, tanto aquelas endógenas (boa parte das variáveis domésticas) como daquelas exógenas (variáveis internacionais, climáticas e demográficas).

Esse modelo permite identificar, em termos numéricos, quais os efeitos, sobre o PIB brasileiro, de elevações dos investimentos em duas grandes categorias: máquinas e equipamentos e construção civil.

O modelo estimado aponta que cada R\$ 1,00 aplicado em novos investimentos em ativos fixos no Brasil (isto é, Formação Bruta de Capital Fixo) gera R\$ 2,50 de PIB após 10 a 14 meses (R\$ 1,00 do efeito DIRETO do investimento + R\$ 1,50 de efeitos INDIRETOS/INDUZIDOS). O efeito multiplicador é mais baixo para inversões em Máquinas e Equipamentos (+2,0) do que em Construção (+3,0), em função do último ser mais intensivo em mão-de-obra e apresentar um “vazamento” relativamente pequeno para produtos importados (cerca de 45% do consumo aparente de equipamentos no Brasil é atendido por importações).

No que toca à geração de empregos, há também duas fases:

- Aquela associada à fase de Capex dos projetos, que são empregos “temporários”, incluindo aqueles associados aos efeitos indiretos/induzidos gerados por esses investimentos;

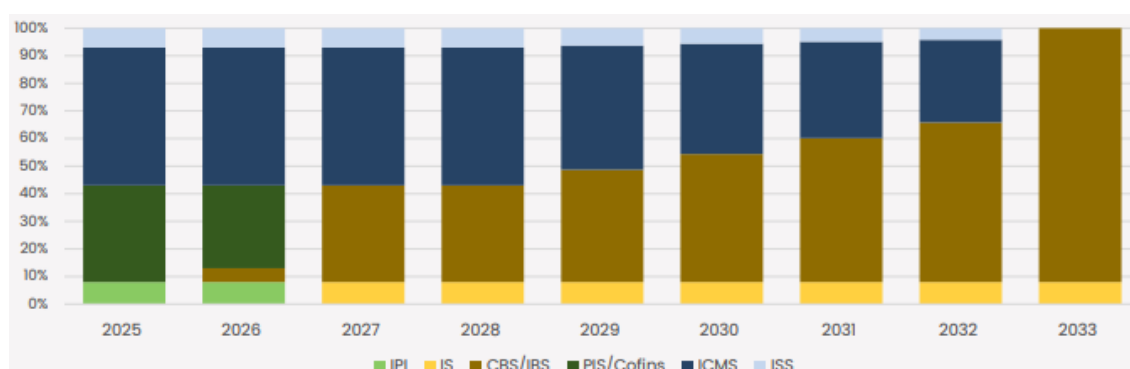
- Aquela associada à fase de operação das plantas de H2V e renováveis.

Utilizamos multiplicadores de emprego obtidos em referências internacionais, sobretudo da IRENA. Esses multiplicadores são estimativas mais recentes e costumam ser mais conservadores do que aqueles estimados localmente no Brasil.

Uma vez que são setores altamente intensivos em capital, boa parte da geração de empregos se dá na fase de Capex.

Já no caso da arrecadação tributária adicional para os 3 níveis de governo, para além dos tributos incidentes sobre lucros e folha salarial, foram levadas em contas estimativas da LCA para o resíduo tributário existente atualmente nos gastos com Capex no Brasil (entre 5% e 6%), tendendo a zero na parcela associada à IPI, PIS/Cofins, ICMS e ISS à medida que transitamos para o novo sistema de tributação indireta. Ainda restaria um pequeno resíduo associado ao Imposto de Importação (cerca de 2 p.p. dos 5% a 6%).

Gráfico 17 - Ilustração do período de transição



Fonte: Ministério da Fazenda e EC nº 132/2023. Elaboração: LCA Consultores.

4.2. Impactos econômicos – principais premissas

- Projetos não utilizarão energia existente para viabilizar a adição de capacidade instalada de H2V e para atender a demanda por H2V, Data-centers/IA, veículos elétricos (passeio e comercial leve) e eletrificação de processos industriais. Ou seja: em todos os cenários há 100% de energia “nova” (eólica *onshore* e fotovoltaica).
- Capex total, incluindo energia, para 1 GW de eletrolisador é cerca de R\$ 23 Bi (a preços de 2023), sem considerar infraestrutura adicional para conversão e armazenagem de amônia. Na medida em que parte do H2V precisa ser convertido em amônia (NH3), consideramos também um adicional de Capex proporcional a essa demanda por amônia (fertilizantes e parte dos combustíveis para transporte terrestre e aquaviário). Também foi agregado um montante de Capex para reforço das linhas de transmissão.
- Capex em eletrolisadores irá recuar 33% por GW entre 2030 e 2050 (a preços de 2023).
- Multiplicador sobre o PIB do Capex aplicado em máquinas: começa em +1,5 (abaixo dos +2,0 estimados para o Brasil como um todo, refletindo um coeficiente importado mais alto do que o investimento típico na economia brasileira) e chega a +1,75 em 2040, permanecendo nesse nível até o final do horizonte. Isso é compatível com alguma nacionalização de equipamentos para H2V, mas ainda assume coeficiente importado superior à média agregada nacional, já que multiplicador permanece abaixo de +2,0.
- Não foram consideradas eventuais receitas adicionais associadas ao

Oxigênio (O₂), que é um subproduto da produção do H₂V via eletrólise da água (cujo mercado global em 2023 equivaleu a US\$ 46 bilhões). Também não foram levadas em contas eventuais receitas com emissões de crédito de carbono associada às emissões evitadas.

Memo: composição e valores do CAPEX

Quadro 13: Composição do Capex para produção de H₂V

Composição CAPEX H₂V Brasil, para cada 1GW de eletrolisador – valores em R\$ bilhões de 2023	
Eletrolisador (1 GW)	4.8
Tanques de armazenagem de NH ₃	1.0
Planta de dessalinização	0.5
Transmissão elétrica interna (10 km)	0.04
Compressores pipeline	0.1
Planta de conversão H ₂ para NH ₃	4.0
Infraestrutura portuária	0.8
Energia eólica ¹ (1,2 GW)	9.9
Energia fotovoltaica (2,1 GW)	7.3
TOTAL	28.4

1. A estimativa de CAPEX foi realizada considerando referências de eólica on shore. É possível, contudo, realizar exercícios considerando os valores de eólica off shore

Fonte: Fraunhofer. Valores levam em conta R\$/US\$ em 5,30, 100% de energia nova e fatores de capacidade referentes à região NE

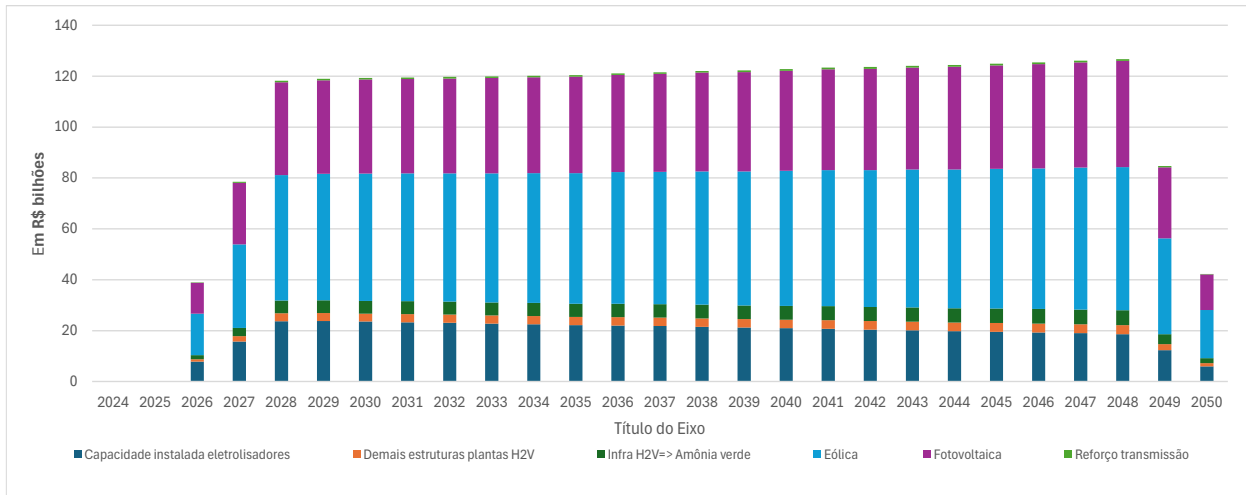
4.2.1. CAPEX (Bilhões R\$ de 2023) – Descarbonização total

No cenário de **descarbonização total**, o CAPEX contempla os investimentos necessários para eletrolisadores, energia de fonte renovável, reforço das linhas de transmissão e outras infraestruturas necessárias (conversão de parte do H₂V em amônia verde, dentre outros). Os investimentos em usinas eólicas³² perfazem a maior parte do CAPEX, com média de 42,9% no período, seguidas pelas usinas

³² A estimativa de CAPEX foi realizada considerando referências de eólica on shore. É possível, contudo, realizar exercícios considerando os valores de eólica off shore

fotovoltaicas com 31,7%. O investimento médio chega a cerca de R\$ 112,4 bilhões/ano. No total, o CAPEX chega a aproximadamente R\$ 2,8 trilhões no período considerado.

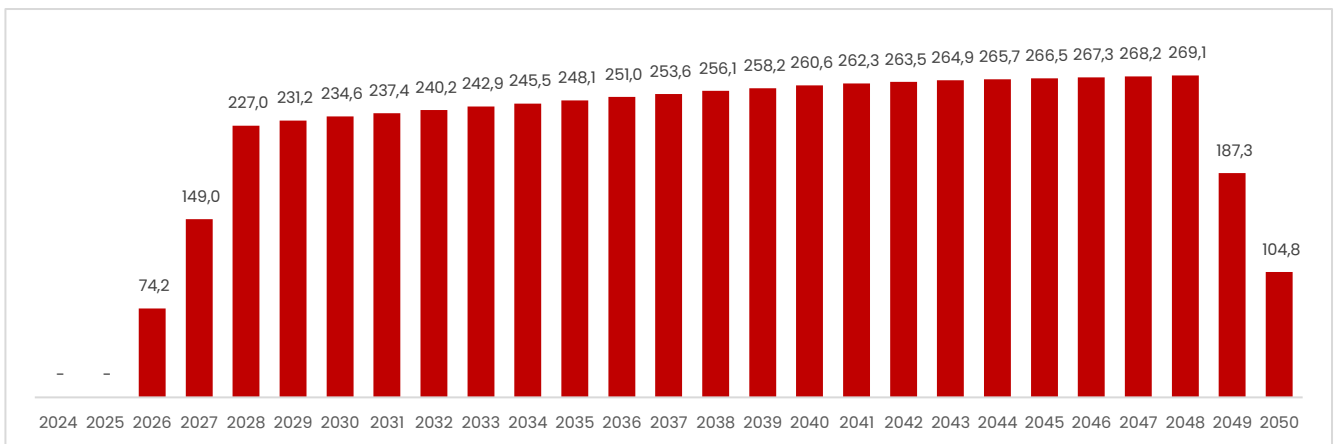
Gráfico 18: Investimentos em capex – cenário de descarbonização total (R\$ bilhões/ano)



4.2.2. PIB Adicional Anual (R\$ bilhões de 2023) – Descarbonização total

Cenário de descarbonização total: Entre 2026-2050, é um PIB adicional de R\$ 5,8 trilhões, correspondendo a uma média de R\$ 233,2 bilhões/ano, o que representa 2,1% do PIB anual atual³³.

Gráfico 19: Impacto sobre o PIB Brasil – cenário de descarbonização total (R\$ bilhões/ano)



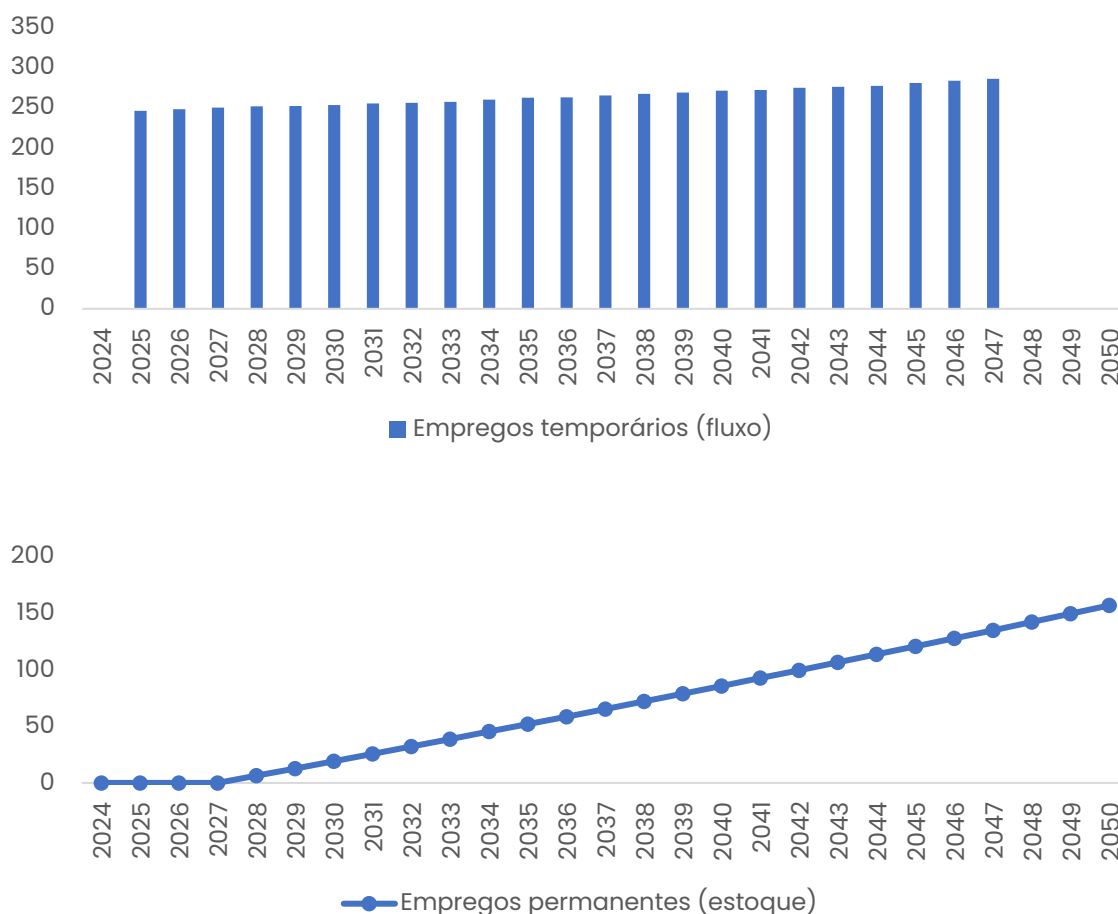
³³ Percentual calculado tendo o PIB de 2023 como referência (R\$ 10,9 trilhões)

4.2.3. Empregos – Descarbonização total

É esperada a geração de cerca de 160 mil empregos permanentes entre 2028 E 2050 no cenário de descarbonização total.

A cadeia eólica deverá gerar aproximadamente 29,2 mil postos de trabalho permanentes no cenário de descarbonização total ao final do período considerado.

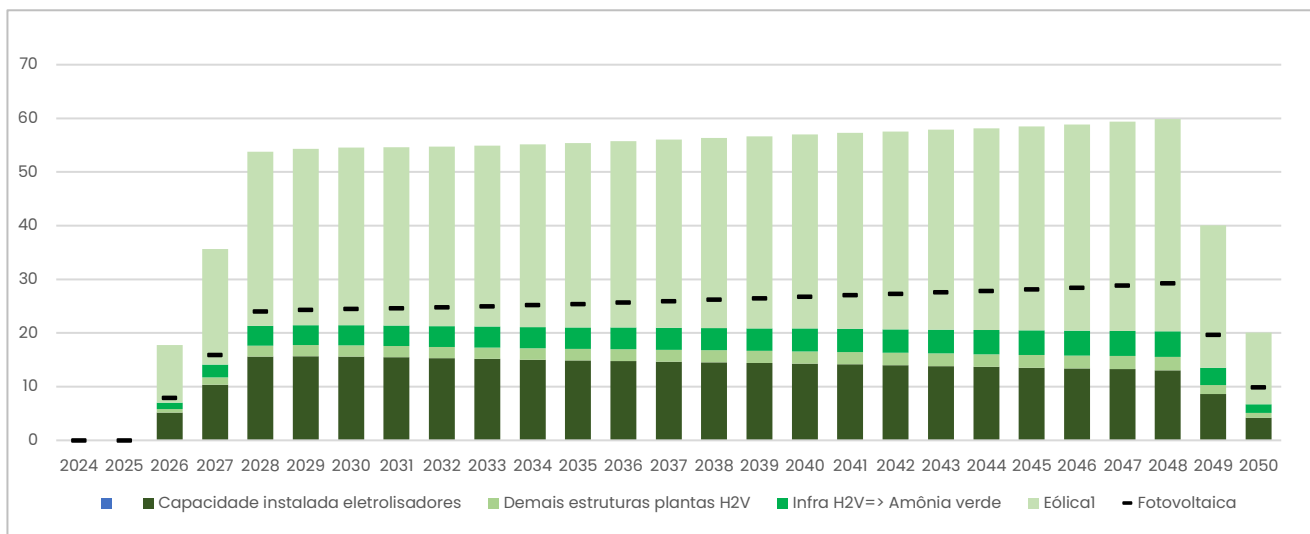
Gráfico 20 - Geração de postos de trabalho permanentes e temporários (milhares de trabalhadores por ano) – cenário de descarbonização total



4.3. CAPEX (Bilhões R\$ de 2023) – Descarbonização moderada

No cenário de descarbonização moderada, os investimentos totais atingem R\$ 1,9 trilhão entre 2026 e 2050, com investimento médio de R\$ 76,3 bilhões/ano

Gráfico 21: Investimentos em capex – cenário de descarbonização moderada (R\$ bilhões/ano)

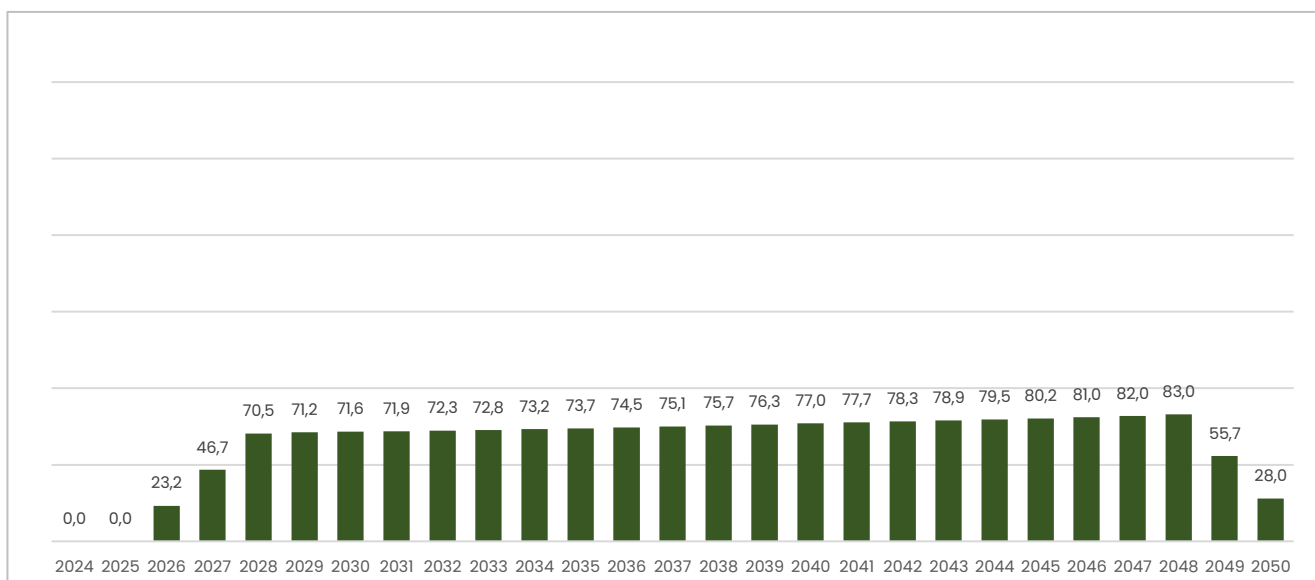


1. A estimativa de CAPEX foi realizada considerando referências de eólica on shore. É possível, contudo, realizar exercícios considerando os valores de eólica off shore

4.3.1. PIB Adicional Anual (R\$ bi de 2023) – Descarbonização moderada

Cenário de descarbonização moderada: o PIB adicional seria de R\$ 4 trilhões 2026 e 2050, com média de R\$ 152,5 bilhões/ano, o que representa 1,5% do PIB*.

Gráfico 22: Impacto sobre o PIB Brasil – cenário de descarbonização moderada (R\$ bilhões/ano)

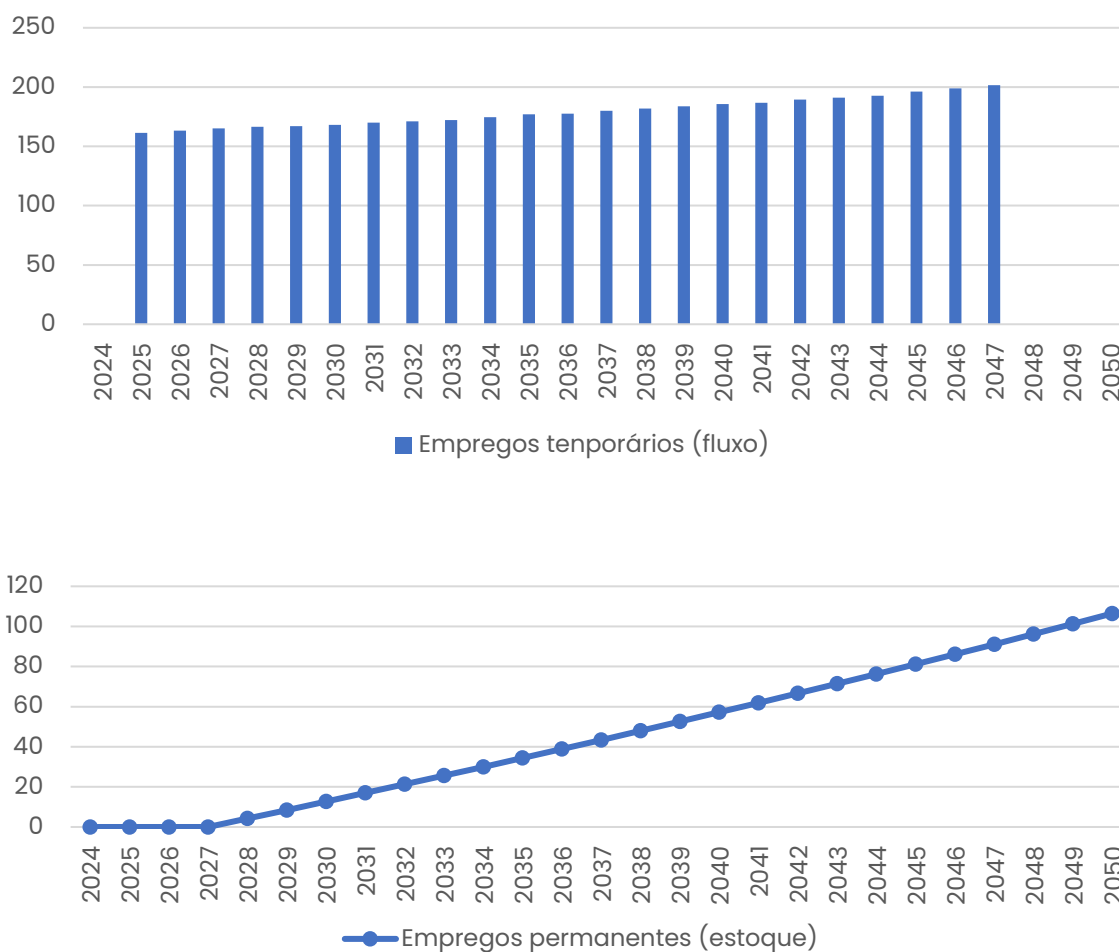


*Percentual calculado tendo o PIB de 2023 como referência (R\$ 10,9 trilhões)

4.3.3. Empregos – Descarbonização moderada

É esperada a geração de cerca de 106,5 mil empregos permanentes entre 2028 e 2050 no cenário de descarbonização moderada.

Gráfico 23 - Geração de postos de trabalho permanentes e temporários (milhares de trabalhadores por ano) – cenário de descarbonização moderada



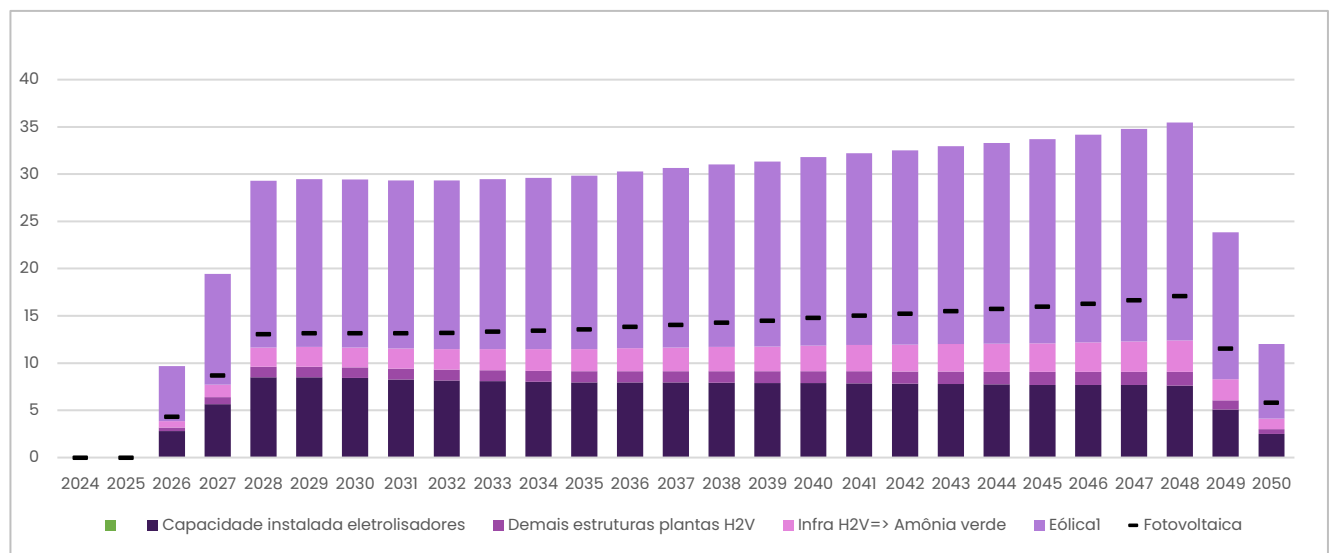
Estudo Macroeconômico LCA

No cenário de descarbonização moderada, a cadeia eólica deverá ser responsável pela geração de 19,8 mil empregos permanentes até 2050 (18,6% dos empregos permanentes gerados no período)

4.4.1. CAPEX (Bilhões R\$ de 2023) – Descarbonização marginal

O cenário de descarbonização marginal possui as menores necessidades de investimentos, já que foi considerado que somente a nova capacidade produtiva seria descarbonizada. Nesse cenário, o CAPEX total chega a R\$ 1,1 trilhão no período, com investimento médio de R\$ 42,4 bilhões/ano entre 2026 e 2050

Gráfico 24: Investimentos em capex – cenário de descarbonização marginal (R\$ bilhões/ano)

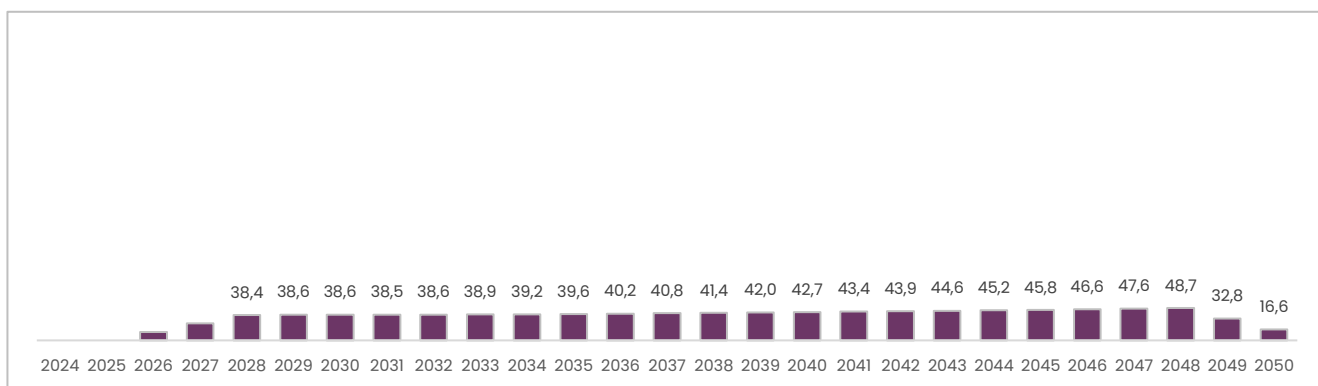


1. A estimativa de CAPEX foi realizada considerando referências de eólica on shore. É possível, contudo, realizar exercícios considerando os valores de eólica off shore

4.4.2. PIB Adicional Anual (R\$ bi de 2023) – Descarbonização marginal

Cenário de descarbonização marginal: Entre 2026-2050, é estimado um PIB adicional de R\$ 2,2 trilhões do PIB brasileiro - média de R\$ 88 bilhões/ano, o que representa 0,8% do PIB atual*.

Gráfico 25: Impacto sobre o PIB Brasil – cenário de descarbonização marginal (R\$ bilhões/ano)

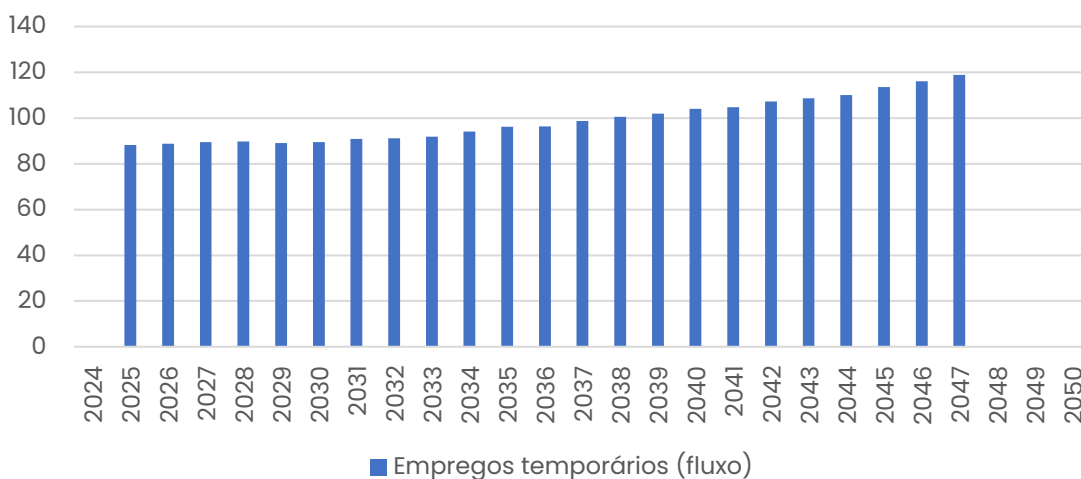


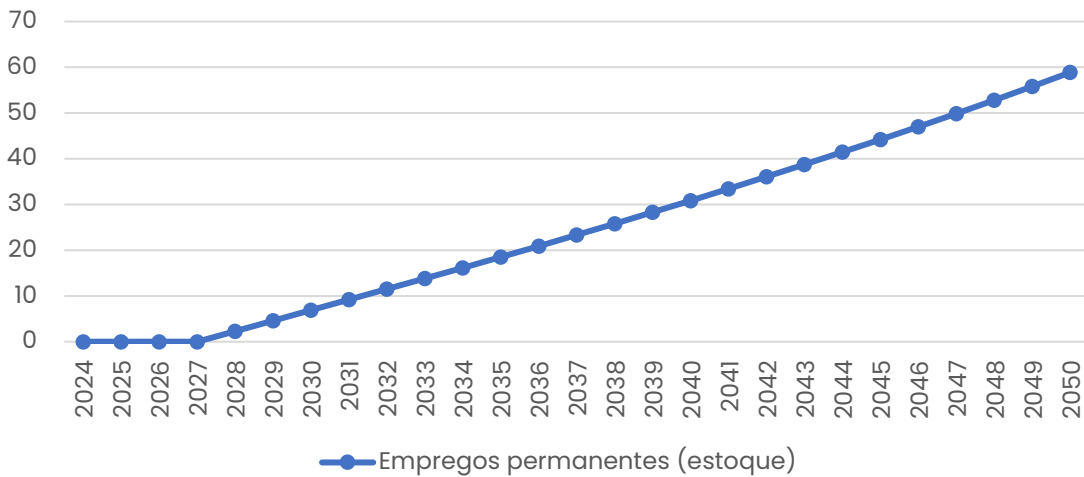
*Percentual calculado tendo o PIB de 2023 como referência (R\$ 10,9 trilhões)

4.4.3. Empregos – Descarbonização marginal

É esperada a geração de cerca de 58,9 mil empregos permanentes entre 2028 e 2050 no cenário de descarbonização marginal.

Gráfico 26 - Geração de postos de trabalho permanentes e temporários (milhares de trabalhadores por ano) – cenário de descarbonização marginal





Estudo Macroeconômico LCA

É estimado que a cadeia eólica gere 11 mil postos de trabalho permanentes no cenário de descarbonização marginal (18,6% do total de empregos permanentes), entre 2028 e 2050.

Gráfico 27: CAPEX Acumulado (Bilhões R\$ de 2023) - Comparativo

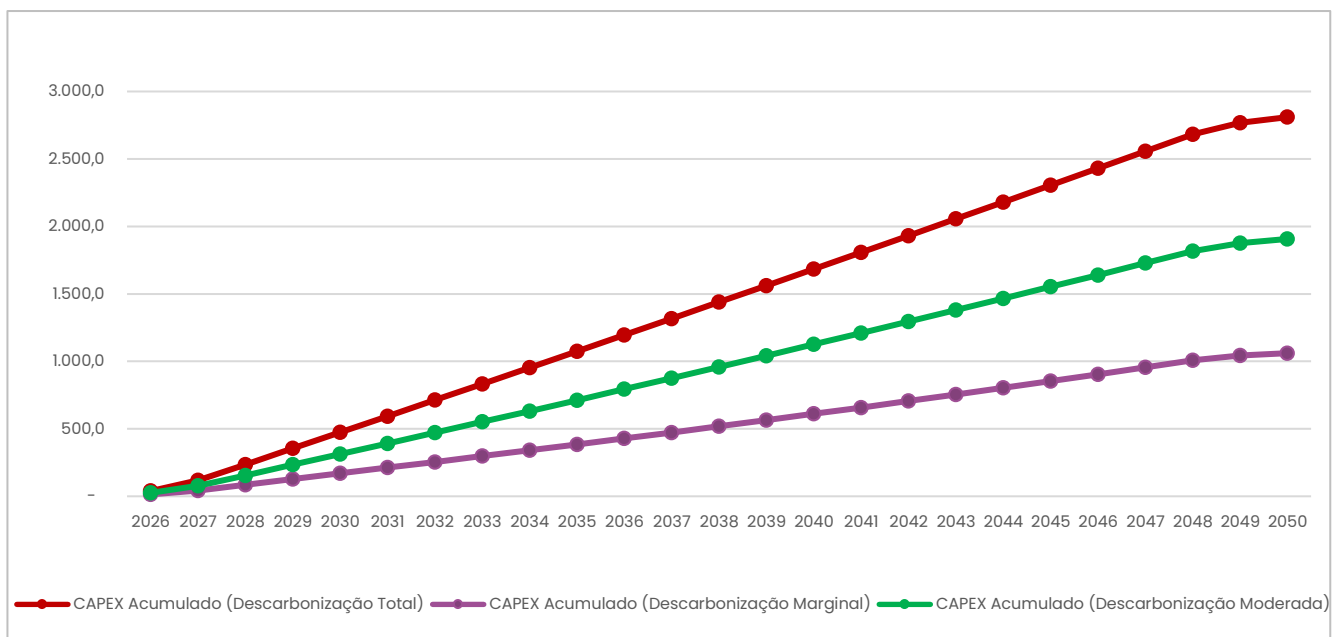
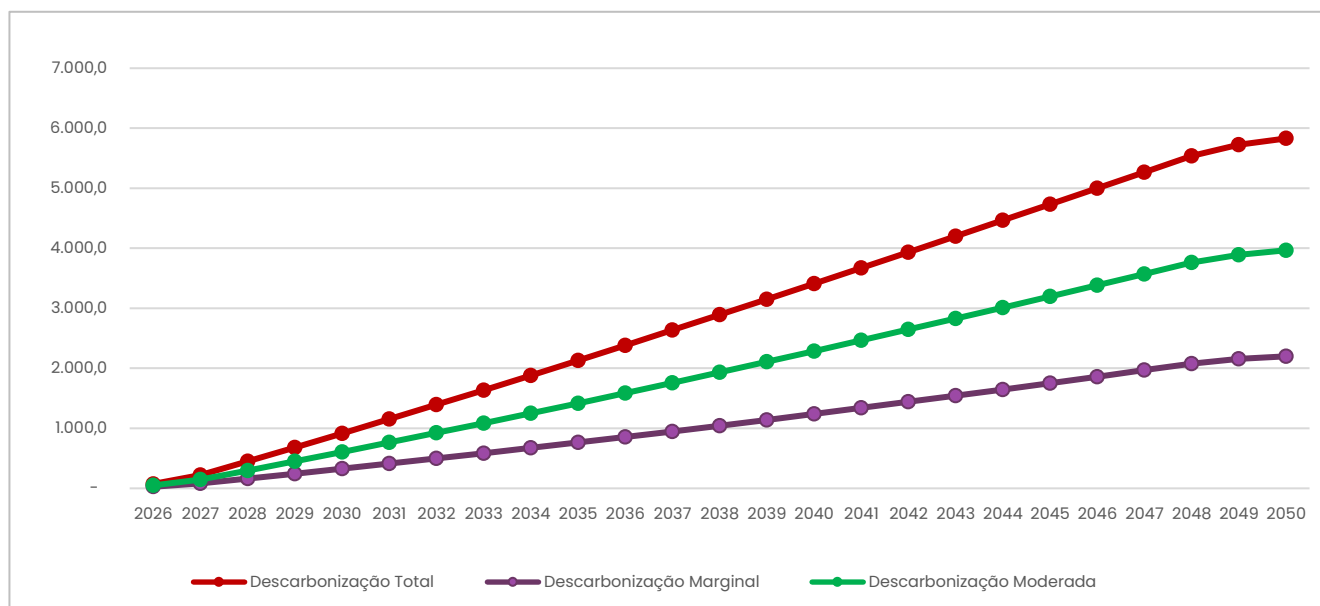


Gráfico 28: PIB Adicional Acumulado (R\$ bi de 2023) – Comparativo



Resumo impactos estimados

Tabela indica um multiplicador médio dos investimentos sobre o PIB de +2,1 (abaixo do investimento típico na economia brasileira) e uma carga tributária marginal de 15,4% (arrecadação adicional sobre PIB adicional), menos da metade da carga média atual brasileira (de cerca de 33% do PIB).

Quadro 14: Resumo dos impactos econômicos da descarbonização

Resultados das simulações - valores em R\$ bilhões constantes de 2023			
	Descarbonização Marginal	Descarbonização Moderada	Descarbonização Total
Capex acumulado em 2025-2050	1061	1907	2810
PIB adicional em 2025-2050	2199	3966	5829
Fluxo médio de empregos adicionais por ano em 2025-2050 (mil postos)	113	206	304
Arrecadação adicional em 2025-2050, três níveis governo	339	612	897

5. Políticas Públicas – recomendações

5.1. Políticas Públicas – Princípios e programas orientadores

O ponto de partida para as recomendações de políticas públicas deste estudo será o arcabouço de políticas aprovadas nos últimos dois anos, entre 2023 e 2024, voltadas para incentivar as energias renováveis, a competitividade e a produção de conteúdo local. Assim, destacam-se os seguintes programas: (i) Nova Indústria Brasil (NIB); (ii) Plano de Transformação Ecológica (PTE); (iii) Plano Nacional de Transição Energética (PNTE); (iv) Lei do Hidrogênio de Baixo Carbono (ReHidro, PNHBC). A estas políticas se somam outras três: (v) Lei do Combustível do Futuro; (vi) Lei do Mercado Regulado de Carbono; e (vii) MP 1.318 do Regime Especial e Tributação para Datacenter (REDATA).

Comentaremos brevemente os principais focos dos programas citados acima nos pontos que se relacionam com os temas levantados neste trabalho, algo que tende a ser útil para inspirar o exercício de recomendações de política que iremos apresentar e defender.

Pontos relevantes do Programa Nova Indústria Brasil (NIB)

- Missões relacionadas à Bioeconomia e Transição Energética;
- Política de compras públicas a favor de maior conteúdo local;
- Ações de promoção da competitividade de produtos industriais produzidos no Brasil com conteúdo local;
- Financiamento a um conjunto de setores com foco em inovação, descarbonização e adensamento das cadeias produtivas locais.

Pontos relevantes do Plano de Transformação Ecológica (PTE)

- Adensamento tecnológico → Bioeconomia → Transição Energética
- Finanças Sustentáveis: atrair capital externo para ampliar o Fundo Clima via oferta de proteção cambial para operações voltadas à transformação ecológica e via taxas mais baixas (1% a.a.) para até 1/5 dos recursos captados para alavancar o *funding* do Fundo Clima (EcoInvest Brasil).

Pontos relevantes do Plano Nacional de Transição Energética (PNTE)

- Adensamento tecnológico → Bioeconomia → Transição Energética
- Foco nos seguintes eixos estratégicos: (i) expansão das energias renováveis; (ii) eficiência energética; (iii) combustíveis de baixo carbono; (iv) inovação tecnológica; (v) transição justa e inclusiva.
- Gestão e gerenciamento integrado de iniciativas em prol da transição energética.

Pontos relevantes da Lei do Hidrogênio (ReHidro e PHBC)

- Institui isenção de tributos federais sobre o Capex de plantas de produção de hidrogênio de baixo carbono (Re-Hidro, em linha com o REID1);
- Institui Plano Nacional de incentivos fiscais para a operação de plantas de hidrogênio de baixo carbono (PNHBC): recursos de até R\$ 18,3 bilhões em 5 anos (2028-32), com habilitação prévia para projetos que atestem viabilidade, capacidade financeira e compromissos firmes de investimento e com regime concorrencial para eleger projetos que requeiram menores incentivos, no intuito de aproximar o custo do

hidrogênio ao custo do querosene de aviação.

Pontos relevantes da Lei do Combustível do Futuro

- Cria Programas Nacionais com metas de redução das emissões para diversos segmentos com base em patamares mínimos de uso de combustíveis sustentáveis ou mandatos – para combustível sustentável de aviação (ProBioQav), para diesel verde (PNDV) e para o biometano em substituição ao gás natural, válido para produtores e importadores de gás natural;
- Eleva os percentuais de mistura de etanol à gasolina e de biodiesel ao diesel – de até 27% para até 35% de etanol à gasolina, e de até 14% para até 20% de biodiesel ao diesel, com acréscimos graduais até 2030;
- A Lei trata ainda da regulamentação da captura e estocagem de carbono, como complemento aos esforços de redução da emissão de dióxido de carbono.

Pontos relevantes da Lei do Mercado Regulado de Carbono

- A Lei que cria o mercado regulado de carbono estabelece um limite para emissão de gases de efeito estufa (GEE) para empresas e agentes econômicos e um mecanismo de compensação entre emissores e capturadores líquidos de carbono;
- O mercado será obrigatório para empresas que emitem mais de 25 mil toneladas de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{EQU}}$) ao ano e válido para todos os setores, com exceção do setor agrícola e pecuária;
- Estados poderão ter seus próprios mercados, de forma a tornar estes

mecanismos mais descentralizados; haverá também parâmetros para o mercado voluntário de carbono, que seguirá não obrigatório;

- Espera-se na sequência um período de 3 a 5 anos para a regulamentação completa da Lei, a começar pelo mapeamento e medição das emissões por empresa/setor e o estabelecimento de seus limites máximos ao longo do tempo, de forma a que haja um incentivo à descarbonização ao longo do tempo, em linha com os compromissos de redução assumidos em acordos internacionais (CNDs).

Pontos relevantes da MP do Regime Especial de Tributação para Datacenter (REDATA)

- Incentivos garantem isenção de tributos federais (PIS-PASEP, COFINS, IPI e Imposto de Importação sobre equipamentos sem simular nacional) para produtos importados ou produzidos no Brasil destinados à implantação, ampliação e/ou manutenção de datacenters voltados ao atendimento da demanda externa (90%) e alocação obrigatória de ao menos 10% ao mercado local;
- Players de construção de datacenter estimam que, com o Redata, a carga de impostos será reduzida em até 86%, representando um importante incentivo e agente de competitividade;
- Há compromissos de contratação de energia renovável, seja no grid ou em esquema de autoprodução, e de um índice de eficiência hídrica (até 0,05 l/kWh), o que na prática requer sistemas de reúso para que o abastecimento de água não seja ponto crítico;
- Como contrapartida, as empresas terão que aportar 2% do valor dos

produtos adquiridos em PD&I, com recursos a serem aplicados em programas prioritários de apoio ao desenvolvimento e adensamento industrial da cadeia produtiva de economia digital;

- Alternativamente, ao menos 10% das aquisições de produtos e serviços do programa terão que ser direcionados à contratação de projetos e serviços de PD&I de economia digital no Brasil;
- Investimentos localizados nas regiões N, NE e CO permitem reduzir as contrapartidas de investimento em PD&I (2% de PD&I ou 10% de contratações locais).
- Programa faz parte da Política nacional de Datacenter (PNDC), vinculada à Nova Indústria Brasil (NIB), Missão 4 – transformação digital, e busca impulsionar o crescimento nacional em áreas estratégicas ao país como inteligência artificial, computação em nuvens, *smart factors* e internet das coisas (IoT);

– x –

Estes são, pois, os fundamentos básicos para as novas ações de política a serem sugeridas, em resposta à necessidade de descarbonizar os processos produtivos, também, aos movimentos em curso nos principais países desenvolvidos para atrair investimentos com este apelo.

5.2. Políticas Públicas – Eixos das recomendações de curto e longo prazos

Os tópicos a seguir tratam das principais questões que hoje afetam a competitividade, o mercado e o desenvolvimento do setor, e tem por objetivo encaminhar questões de curto e de médio-longo prazos.

- Redução do custo de capital (curto prazo);

- Apoio à exportação de serviços de engenharia e equipamentos (curto prazo, com efeitos a médio e longo prazos);
- Incentivos fiscais-tributários (curto prazo, com efeitos a médio e longo prazos);
- Regulamentação e ajustes microeconômicos para agendas específicas: Datacenter, BNDES-Exim, gargalos em transmissão (curto e médio prazos);
- Política de compras governamentais (curto e médio prazos).

Abordaremos a seguir cada um dos principais eixos de política.

5.2.1. Fundo Clima, exigências de conteúdo local e *funding*

No período recente, desde o advento da TLP em substituição à TJLP nas operações do Sistema BNDES, o principal instrumento de política de financiamento tem sido o **Fundo Clima (FC)**, que conta com *funding* específico e condições de financiamento diferenciadas conforme a relevância dos projetos para a agenda de transição energética. No entanto, as condições atuais de financiamento do FC não discriminam entre estas duas modalidades ao não levar em conta diferenças de conteúdo local e de adensamento das cadeias produtivas.

É sabido que o Brasil construiu nas últimas décadas uma cadeia ampla e diversificada de produção de equipamentos eólicos incluindo componentes, partes e peças, pás, torres e seus insumos, além de serviços de instalação e parcela relevante de pesquisa e desenvolvimento para o desenvolvimento e adaptação de equipamentos às condições locais de operação.

Ao contrário, o segmento de energia solar não se internalizou, tendo ficado restrito à montagem local de painéis a partir de células importadas e à produção de *tracker* e outros materiais para a fixação das placas. Ainda, ao final de 2021, o Governo brasileiro alterou as regras do ex-tarifário e permitiu a isenção na importação de células e módulos fotovoltaicos, inversores e *trackers* específicos, abrindo ainda mais o setor às importações.

Estas mudanças têm contribuído para aprofundar o diferencial competitivo entre ambos os segmentos para além das diferenças de incidência tributária e de encargos já existente no mercado elétrico brasileiro (benefícios aos sistemas de geração distribuída ainda vigentes, e que serão eliminados ao longo da próxima década). Mais importante, os mecanismos de conteúdo local (que privilegiam a capacidade de impulsionar a economia e gerar emprego e renda) não vêm sendo considerados, de modo que ambos os sistemas são contemplados pela mesma taxa e demais condições de financiamento.

Assim, é necessário coordenar com BNDES (gestor), Conselho Monetário Nacional (Secretaria do Tesouro da Fazenda Nacional, Ministério do Planejamento e BACEN) e Ministério do Meio Ambiente ações para equilibrar estas desvantagens competitivas das eólicas, que nos últimos anos não têm conseguido fechar novos contratos.

Ao final de 2024 e início de 2025, parte dessas reivindicações foi atendida – o BNDES passou a contemplar o conceito de cadeias locais na definição da taxa do Fundo Clima, com taxas mais reduzidas para cadeias com maior conteúdo local – taxa base de 6,15%. Houve ainda elevação dos prazos globais de amortização e contratação.

Mas ainda cabem aperfeiçoamentos no âmbito do Conselho Monetário ou do

próprio gestor do Fundo, o BNDES. Listamos abaixo alguns pontos:

- 5.2.1.1. Aumentar teto de financiamento para R\$ 1,5 BI por projeto para eólicas (BNDES);
- 5.2.1.2. Ampliar *funding* do Fundo Clima (FC) por meio de captações diretas junto a bancos multilaterais e outras instituições de fomento (BID, Banco Mundial, IFC, CAF, KfW) de forma a beneficiar-se de seus menores custos de captação para repasse a projetos prioritários de elevado conteúdo local, como eólicas (CMN);
- 5.2.1.3. Estender a todos os Bancos de Fomento (BNB, BASA, BRDE) regras que privilegiem e favoreçam a produção e conteúdo local, de forma que todos atuem com as mesmas regras de enquadramento (CMN).

5.2.2. EcoInvest, política de importação:

Na mesma linha, é necessário que o Programa EcoInvest privilegie projetos integrados com maior conteúdo local:

- 5.2.2.1. Necessário **incluir o setor eólico dentre os setores contemplados pelo EcoInvest**;
- 5.2.2.2. Ampliar os limites de alavancagem que serão permitidos no Ecoinvest para projetos com elevado conteúdo local – de 25% para 33% o percentual de participação de recursos públicos à taxa de 1% a.a.;
- 5.2.2.3. Privilegiar projetos integrados (Datacenters, H2V, fabricação de baterias, fertilizantes, HBI etc.) à geração de energia renovável com maior conteúdo e produção locais (eólicas), com menores taxas, maiores prazos e alavancagem;

5.2.3. Apoio a exportações de serviços de engenharia e equipamentos:

Ainda que as questões competitivas devam ser resolvidas a curto prazo, é

necessário que o setor eólico possa ter espaços de mercado externo para explorar sem estar na dependência apenas de contratos no mercado local. Como em toda cadeia de bens de capital, escala produtiva e regularidade de demanda são fundamentais para assegurar competitividade e regularidade e para amortizar custos fixos expressivos.

Assim, é fundamental retomar o foco em apoio às exportações do setor e reeditar o programa BNDES-EXIM para exportação de serviços de engenharia e/ou equipamentos.

Dentre as principais medidas podemos citar:

- 5.2.3.1. Restabelecer BNDES-EXIM, com governança adaptada às recomendações dos Tribunais de Contas e com política operacional aos moldes da OCDE;
- 5.2.3.2. Associar operações do BNDES-EXIM aos mecanismos de seguro-garantia do FGE (Fundo Garantidor de Exportações) gerido pela ABGF (Agência Brasileira Gestora de Fundos garantidores e garantias S.A.), com critérios autônomos, independência e liquidez para atuar como *first loss* em eventuais situações de inadimplência;
- 5.2.3.3. Priorizar a aprovar o PL 5.719/2023, que redefine a área de Comércio Exterior do BNDES, delinea sua governança e define grandes linhas das políticas operacionais do EXIM;
- 5.2.3.4. Aprovar o PL 6.139/23, que altera Lei 12.712 de 2012 e estabelece o sistema brasileiro de crédito oficial e mecanismos de garantia à exportação;
- 5.2.3.5. Promover ativamente as exportações por meio do Ministério das Relações Exteriores (MRE) e APEX para alavancar o *friendshoring* e as relações intergovernamentais em favor das exportações para países vizinhos, Latam, Caribe e África;
- 5.2.3.6. Estabelecer regime de ***drawback*** para equipamentos da cadeia eólica, suas partes e peças.

5.2.4. Garantir que a regulamentação da Lei do Hidrogênio de Baixo Carbono privilegie baixas emissões de GEE e maior adensamento das cadeias locais:

Para além destas ações, que buscam restabelecer condições competitivas para a cadeia eólica local, há a necessidade de ações que incentivem o desenvolvimento de novos setores e modelos de negócio que podem permitir a descarbonização de amplos segmentos da indústria, do agronegócio, dos transportes de longo curso e do setor energético. Na mesma linha, ações que incentivem os investimentos à jusante (adaptações ou substituição de processos para outros no sentido na descarbonização ou da digitalização).

Assim, necessário que a **regulamentação do Programa de Hidrogênio de Baixo Carbono apoie projetos com maior conteúdo local e menor emissão de CO_{2EQ} por quilograma de hidrogênio.**

Assim, os critérios de habilitação e alocação de incentivos devem:

- 5.2.4.1. Valorizar conceito de adensamento das cadeias e conteúdo local na habilitação e na definição do montante de apoio, com maior pontuação para soluções com comprador e fornecedor locais;
- 5.2.4.2. O processo de habilitação deve definir compromissos de performance a serem assumidos pelos investidores, de forma a se levar em conta o avanço dos projetos (licenças, arrendamentos, acesso à conexão e à energia renovável, contratos de compra/*offtake*);
- 5.2.4.3. **Maiores incentivos para projetos com menor emissão de CO_{2EQ}, privilegiando metodologias adotadas em programas semelhantes (MOVER, Combustível do Futuro), e maior conteúdo local de fornecedores e compradores,** de forma a que os maiores incentivos contemplem projetos de menor emissão e maior impacto na economia doméstica

5.2.5. Apoio a novas demandas por digitalização e Datacenters:

Na mesma linha de incentivar as novas demandas por digitalização e produtividade da economia brasileira e, da mesma forma, por descarbonização, é necessário encaminhar demandas que assegurem conexão ao segmento de datacenter e de hidrogênio verde e derivados:

- 5.2.5.1. Resolução de gargalos de conexão à rede elétrica – na **distribuição**: mudanças regulatórias para permitir expansão da distribuição e acréscimo de ativos à base de remuneração; **transmissão**: prazos mais curtos para procedimentos de estudos e leilões de LTs);
- 5.2.5.2. EPE/MME e ONS devem indicar locais e suas respectivas capacidades de conexão, para facilitar localização de novas cargas de DCs e H₂V;
- 5.2.5.3. Apoiar a qualificação de mão-de-obra para os setores nascentes e nas regiões de maior concentração de projetos:

Estas medidas requerem alinhamento entre os Ministérios da Gestão e Inovação, Minas e Energia, Casa Civil, Aneel e BNDES.

5.2.6. Compras governamentais e contratação de energia elétrica:

Da mesma forma, o Governo pode **modificar a forma de contratar energia elétrica** para uso próprio na administração direta e em autarquias por meio da centralização e migração para o mercado livre (ACL), com redução de despesas operacionais da União e avanços relevantes na descarbonização, sobretudo em termos de imagem e incentivo. Para tanto, deve-se:

- 5.2.6.1. Dimensionar o volume e identificar o perfil da demanda das diversas unidades de consumo ligadas ao Governo federal – administração direta, autarquias, empresas de controle da

União etc.

- 5.2.6.2. Centralizar num único CNPJ capacitado para gerenciar o processo de contratação e renovação de contratos;
- 5.2.6.3. Avaliar questões jurídicas e a compatibilidade das Leis 14.133 (nova Lei de Licitações), 10.848 (ACL) e outros programas (Nova Indústria Brasil, Transformação Ecológica);
- 5.2.6.4. Organizar processo de compra/leilão de firma a obter redução de despesas públicas, incentivar a descarbonização e priorizar setores com maior conteúdo local;
- 5.2.6.5. Equacionar questões como contratação de energia existente x nova e se seria possível celebrar contratos de prazos mais longos.

5.2.7. Apoio à neointustrialização (cadeias demandantes de novos combustíveis):

Por fim, como iniciativa em apoio ao desenvolvimento das cadeias à jusante consumidoras de hidrogênio ou derivados (amônia, metanol), será importante incentivar os novos investimentos na transformação de processos industriais em direção à produção de bens com menor pegada de carbono.

Estas iniciativas valem para todas as iniciativas de Capex que visem à descarbonização, como por exemplo **troca de alto fornos por fornos elétricos, unidades de beneficiamento de HBI à base de hidrogênio de baixo carbono (insumo de emissão zero para a redução direta)**, entre outros. O caso dos **fertilizantes** está mais avançado, posto que vem sendo planejado há mais tempo (desde o Programa de Desenvolvimento da Indústria de Fertilizantes).

Assim, recomenda-se:

- 5.2.7.1. Aprovação do Programa de Desenvolvimento da Indústria de Fertilizantes (Profert) – PL 699/2023, que visa a incentivar o

desenvolvimento da indústria local produtora de fertilizantes e seus insumos;

5.2.7.2. Isenção do pagamento de PIS/COFINS, Imposto de Importação (II), IPI, IRRF e CIDE sobre a venda de fertilizantes e a importação de equipamentos, materiais, insumos e serviços utilizados para viabilizar sua produção local;

5.2.7.3. Garantia à produção voltada ao mercado interno das mesmas vantagens direcionadas a produtores situados em ZPEs, estimulando a substituição de importações.

5.2.8. Incentivo à estratégia de powershoring:

Recomendam-se programas de apoio à inovação (PD&I) e de financiamento para investimentos industriais com base em energias renováveis, H₂ de baixo carbono ou biocombustíveis localizados nas áreas próximas à base de produção dos energéticos desde os primeiros passos destas iniciativas até seu desenvolvimento posterior. Assim:

5.2.8.1. Incluir fase prévia de desenvolvimento de projetos, engenharia e projeto básico e plantas-piloto para a produção de combustíveis de baixo carbono e para seu uso como insumo em plantas industriais com produção local, para transporte de longo curso e outros segmentos inovadores ligados à transição energética, a exemplo de mineração de elementos ligados às baterias de lítio, eletrolisadores e sua cadeia; aço verde, químicos e petroquímicos etc.;

5.2.8.2. Em projetos relacionados aos itens acima, permitir que as condições de financiamento pelo Sistema BNDES sejam equivalentes aos que são oferecidos pelos Bancos de Fomento Regionais que usam Fundos Constitucionais – adoção de “**reductor de convergência regional**” à TLP para projetos realizados nas regiões incentivadas (regiões Nordeste e Norte, Norte de MG e ES e Sul do RS).

Anexo I: Estudos e documentos Internacionais: tabelas resumo

Setor	Combustíveis/Insumos a serem Substituídos	Alternativas Sustentáveis	Proporção a ser Descarbonizada
Agricultura	Métodos tradicionais de cultivo	Práticas Agrícolas Eficientes e de Baixo Carbono	Não especificado. Implementação gradual
Aviação	Jet-A1	Biocombustíveis, combustíveis hidrocarbonetos sintéticos, hidrogênio, Óleo de Cozinha Usado (UCO), Resíduos de Óleo de Palma (POME)	Não especificado. Grande parte até 2050
Bioenergia	Carvão, petróleo, gás natural	Biomassa, biocombustíveis, bioeletricidade	Não especificado
Construção	Energia elétrica de alta emissão	Energia renovável para refrigeração	Avançada
Data Centers	Eletricidade fóssil	Eletricidade renovável	Significativa redução necessária
Energia	Energia fóssil (carvão, gás natural)	Energia solar, eólica, hidrelétrica, hidrogênio e biogás	Aumento significativo até 2050/80%+
Fabricação de Cimento e Aço	Carvão e coque	Hidrogênio verde, DRI-HBI, carvão vegetal de reflorestamento	Não especificado
Hidrogênio	Produção de Hidrogênio sem abatimento	Hidrogênio Renovável (importado e produzido na UE)	20 Mt até 2030 (10 Mt produzidos internamente)
Indústria de Fertilizantes	Fontes fósseis	Hidrogênio verde	Não especificado
Industrial Pesado	Biomassa tradicional	Hidrogênio renovável, captura e armazenamento de carbono (CCS)	30% até 2030 e de 60% a 100% até 2050 no Brasil
Indústrias Diversas	Biomassa tradicional, Carvão, Gás Natural	Bioenergia, eletricidade renovável (solar, eólica)	Até 100% de processos de alto consumo energético
Química	Hidrocarbonetos	Hidrogênio verde, bioenergia + CO2	Não especificado
Transporte Marítimo	Combustíveis fósseis marítimos	Biocombustíveis, combustíveis hidrocarbonetos sintéticos, eletrificação	Não especificado
Veículos Leves	Gasolina, diesel	Biocombustíveis, etanol, eletricidade	50% até 2030 e potencialmente 100% até 2050 no Brasil

Estudos:

Indonesias Green Powerhouse Promise In Ten Bold Moves; 2024 State Of The European Hydrogen Market Report; How Oil And Gas Companies Can Be Successful In Renewable Power; 12 Insights Sobre Hidrogenio Edicao Brasil I; 2024 Bcse Bnef Sustainable Energy In America Factbook; Bp Energy Outlook 2024; Net Zero Electrical Heat A Turning Point In Feasibility; Hydrogen Insights Dec 2023 Update; 20240418 Report Launch_Site; Global Hydrogen Flows 2023 Update; Shell Brasil Cenarios Transicao Energetica Junho 2024 I; Renewables Curtailment Monitor Vol1 Tracking Output Res; Jll Data Center Outlook Global 2024

Anexo II: Cenário Macro

Internacional:

A perspectiva mais provável para o ambiente internacional nos próximos anos é de crescimento morno em termos históricos, explicado, em parte, pela demografia (progressiva redução do crescimento populacional e envelhecimento da população nos países de renda média e, sobretudo, alta). As sequelas econômicas e políticas da pandemia de coronavírus e das tensões geopolíticas deverão ter alguns impactos deletérios sobre o cenário de médio e longo prazo (sobretudo por conta da forte elevação do endividamento público em muitos países para combater os efeitos da crise de 2020, e também pelo aprofundamento do processo de “desglobalização” produtiva iniciado com a eclosão da guerra comercial entre EUA e China).

Pano de fundo geopolítico tensionado e com clivagem persistente.

Nesse contexto, o PIB mundial deverá registrar crescimento na faixa de 3% a.a. de 2025 em diante. Nesse prazo, é adotado o cenário de crescimento de longo prazo mais recente da OCDE, que antevê uma desaceleração do PIB global de aproximadamente 0,5 p.p. a cada década (em função sobretudo do menor crescimento populacional nas principais economias)

Brasil:

Após crescer cerca de 1% a.a. em 2017-2019, a economia brasileira registrou forte contração em 2020. O PIB recuperou o patamar de 2019 em 2021, e voltou ao patamar anterior à recessão de 2015-16 apenas em 2023. O ano de 2023, apesar do ajuste fiscal e ainda sob os efeitos defasados da política monetária mais

restritiva em vigor desde 2022, cresceu 2,9% (alavancado por desempenho muito positivo da indústria extrativa mineral e, especialmente, da agropecuária).

O crescimento em 2024-2026 dependerá, em boa medida, da extensão da desaceleração global e do timing e intensidade da posterior recuperação, bem como da normalização da política monetária brasileira após a convergência da inflação à meta, já que a política fiscal tenderá a ser restritiva, de acordo com as metas de resultado primário estabelecidas no novo arcabouço fiscal (mesmo que a meta de zerar o déficit não seja alcançada em 2024). O bom momento do mercado de trabalho também ajudará a sustentar o crescimento do consumo em 2024.

Avaliamos que uma nova rodada de reformas econômicas e fiscais relevantes está em curso. Adotamos como premissa a implementação de algumas reformas nas áreas tributária, de educação, de infraestrutura e de comércio exterior que tenderão a fazer com que o crescimento médio do PIB brasileiro se situe em torno de 2% a.a. em 2025-2050 (o que faria o país chegar a um PIB per capita, em 2050, próximo ao chileno em 2019). Na ausência de reformas, o crescimento médio do PIB brasileiro nesse horizonte se limitaria a cerca de 1% a.a., em função de o bônus demográfico ter se exaurido em 2018/19 (ou seja: a partir de 2020 o crescimento da população em idade de trabalhar passou a ser menor do que o da população em geral). Em tempo: os resultados do novo Censo sugerem que o crescimento médio do PIB poderá ficar aquém dessas taxas nos próximos anos, por conta do ritmo mais lento de crescimento da população.

Cenário Macroeconômico

Perspectivas dos setores demandantes de H2V têm como pano de fundo o cenário macroeconômico elaborado pela LCA, o qual traz projeções moderadas para o crescimento do Brasil (cerca de 2% a.a.)

			Base (65%)									
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
PIB mundial, FMI (%)	3.2	2.9	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5
R\$/US\$, final	5.22	4.90	5.10	5.00	4.95	4.88	4.80	4.82	4.84	4.85	4.86	4.87
Selic, final (% a.a.)	13.75	11.75	9.50	9.00	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50
PIB (var.%)	3.0	2.9	1.5	1.9	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Agropecuária	-1.1	15.1	-1.6	3.0	2.9	2.9	3.0	2.9	3.0	3.0	2.9	2.9
Indústria	1.5	1.6	2.3	1.9	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Serviços	4.3	2.4	1.6	1.7	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7
Indústria (var. %)	-0.7	0.1	2.2	2.1	2.0	1.9	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9
Varejo (var. %)	1.0	1.6	3.2	2.2	2.6	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.0
IGP-M (var. %)	5.5	-3.2	2.0	4.3	3.5	3.6	3.6	3.7	3.7	3.6	3.6	3.6
IPCA (var. %)	5.8	4.6	3.7	4.0	3.5	3.4	3.4	3.5	3.5	3.4	3.4	3.3

Perspectivas setoriais

As perspectivas moderadas para a economia brasileira, reflete as condições a serem enfrentadas por cada um dos setores, de acordo com seus drivers específicos (exportação, demanda interna, gastos do governo)

Setor	Realizado		Projeções	
	2003-23 (% a.a.)	2024-34 (% a.a.)	2024-50 (% a.a.)	
<i>Produção Industrial (volume)</i>	0,4%	2,0%	1,9%	
Bebidas	1,9%	1,9%	1,9%	
Alimentos	0,3%	2,0%	1,9%	
Celulose, Papel e Produtos de Papel	1,9%	2,2%	2,1%	
Produtos Químicos	0,6%	2,2%	1,9%	
Cimento	1,4%	1,2%	1,6%	
Ferro-gusa e ferroligas	1,1%	1,4%	1,5%	
Siderurgia	-0,9%	2,9%	2,4%	
Mineração e pelotização (Extrativa Mineral Exclusive Petróleo)	-1,4%	2,5%	1,4%	
Metalurgia dos metais não ferrosos	-0,7%	1,9%	1,7%	
Fundição	-0,1%	3,0%	2,4%	
Produtos cerâmicos	0,6%	3,0%	2,2%	
<i>PIB Agrícola</i>	0,6%	2,5%	2,3%	
<i>PIB</i>	0,3%	1,9%	1,7%	

A tabela acima resume as projeções para os principais segmentos, potencialmente demandantes do H2V. O racional das projeções é detalhado no Anexo.

Ferro-gusa, aço, ferro-liga, mineração e pelotização

Sobre a demanda proveniente da construção civil, o financiamento imobiliário mais barato, bem como a ampliação do Minha Casa, Minha Vida, deve levar a uma retomada dos lançamentos de unidades habitacionais a partir de 2024. As vendas continuaram fortes em 2023, o que diminuiu o estoque de imóveis nas principais capitais do país e aumentou a demanda por novos projetos imobiliários.

Já pelo lado da demanda da indústria automotiva, apesar da perspectiva negativa nas exportações, a produção de veículos leves e, principalmente, pesados aumentarão em 2024 e também trará reflexos positivos ao setor metalúrgico.

No longo prazo, as projeções de crescimento são sustentadas pelo aumento

gradual da participação de exportações sobre a produção do setor, na medida em que são beneficiadas pelo crescimento da economia global. A retomada dos investimentos e das obras de infraestrutura também pesam positivamente.

PIM-PF	2003-23	2024-34	2024-50
Ferro-gusa e ferroligas	1,1%	1,4%	1,5%
Siderurgia	-0,9%	2,9%	2,4%
Fundição	-0,1%	3,0%	2,4%

Alimentos e bebidas

Eventos climáticos extremos podem trazer volatilidade a produção de alimentos, tanto no curto como no longo prazo.

Competitividade do setor exportador tende a manter a produção de alimentos em ritmo próximo ao da indústria geral no longo prazo, favorecido pelo crescimento da economia global.

Tanto a produção de alimentos como a produção de bebidas devem ter crescimento limitado pela desaceleração do crescimento populacional no longo prazo.

PIM-PF	2003-23	2024-34	2024-50
Alimentos	0,3%	2,0%	1,9%
Bebidas	1,9%	1,9%	1,9%

Cimento e cerâmica

A produção no setor de Minerais Não-Metálicos deve voltar a apresentar

crescimento em 2024, após apresentar forte queda em 2022 e 2023. A recuperação da renda das famílias, aliada à flexibilização da política monetária, devem ser os motores para a retomada da produção do setor no ano, na medida em que devem voltar a impulsionar a construção de novas moradias.

Além dos lançamentos pelo programa, os investimentos em infraestrutura em 2023 foram fortes e devem ser aumentados neste ano de 2024, influenciados pelo novo PAC, pelo ciclo de obras em ano eleitoral e taxas de juros menores. Esperamos crescimento de 2,4% da produção neste ano, acelerando em 2025 e 2026.

No longo prazo, as projeções são sustentadas pela retomada gradual das obras de infraestrutura e demanda por construção de moradias, na medida em que as taxas de investimento como proporção do PIB voltem a crescer e a ficar mais próximas daquelas observadas em outros países.

PIM-PF	2003-23	2024-34	2024-50
Cimento	1,4%	1,2%	1,6%
Produtos cerâmicos	0,6%	3,0%	2,2%

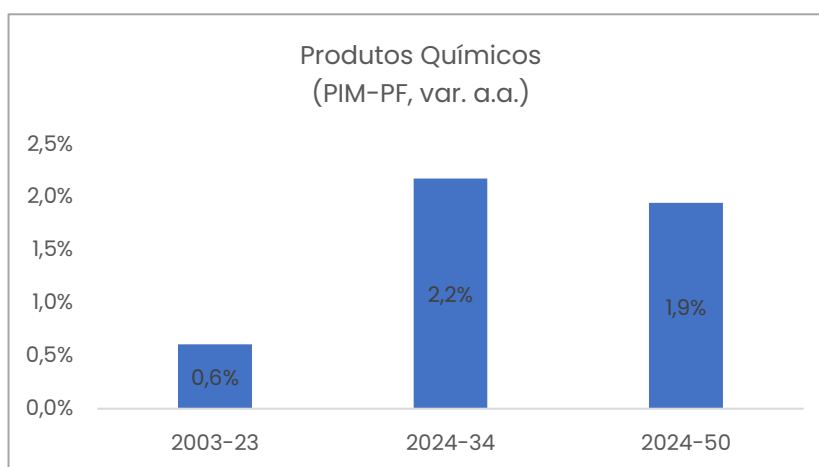
Química

No ano de 2023, a indústria de produtos químicos registrou uma queda de 5,9% em sua produção, sendo este o pior resultado anual do setor nos últimos 20 anos, de acordo com a série histórica do IBGE.

Grande parte desse desempenho ruim pode ser atribuída ao significativo aumento das importações e à queda nas exportações de mercadorias dessa indústria, provocadas por mudanças nos termos de troca do setor decorrentes

principalmente de conflitos de natureza geopolítica, como a guerra da Ucrânia.

No curto prazo, ainda esperamos que o setor cresça a taxas muito modestas, sobretudo pela alta competitividades de produtos importados. Por outro lado, a competitividade do setor agroexportador deve favorecer a demanda por defensivos agrícolas e fertilizantes, sustentando o crescimento da produção no longo prazo.



Papel e Celulose

Em 2023, a indústria de celulose e papel teve uma queda de 1,9% em sua produção, tendo um desempenho pior que a média da indústria de transformação (-0,9%).

Parte considerável desse resultado negativo é explicada pela queda na demanda externa, visto que o volume de exportações de celulose apresentou queda de 6,7% no acumulado dos últimos 12 meses.

Para os próximos anos, esperamos que o segmento volte a crescer com taxas mais consistentes com a melhora da produção industrial e estabilização da demanda externa e crescimento da economia global.

