SciELO Preprints

Estado da publicação: O preprint não foi publicado em outro meio.

Do Excedente à Produção de Moléculas

Alberto Issamu Honda, Franklin Weise, Antonio Cesar Dall Evedove, Carlos Eduardo Mendonça Otoboni, Marcela Campista B. Carvalho, Igor Polikarpov, Heitor Cantarella, Hannes Fischer

https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

Submetido em: 2026-11-02
Postado em: 2026-11-06 (versão 1)
(AAAA-MM-DD)

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

PREPRINT

Do Excedente à Produção de Moléculas

From surplus to molecule production

Alberto Issamu Honda[1], Franklin Weise[2], Antonio Cesar Dall Evedove[3], Carlos Otoboni[4], Marcela Campista B. Carvalho[5], Igor Polikarpov[6], Heitor Cantarella[7] e Hannes Fischer[8]

[1] Engenheiro Agrônomo, Conselheiro da Fundação Shunji Nishimura de Tecnologia (FSNT), Pompeia, SP. E-mail: honda@fsnt.org.br, Av. Shunji Nishimura, 605, Pompeia, SP, 17586-050. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1873-214X.

[2] Engenheiro, TecMundo / O Estado de S. Paulo, São Paulo, SP. E-mail: franklin@desvendados.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7979-7334.

[3] Administrador, FATEC Pompeia "Shunji Nishimura", Pompeia, SP. E-mail: antonio.evedove@cps.sp.gov.br, Av. Shunji Nishimura, 605, Pompeia, SP, 17586-050. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8186-4227.

[4] Engenheiro Agrônomo, FATEC Pompeia "Shunji Nishimura", Pompeia, SP. E-mail: carlos.otoboni@cps.sp.gov.br, Av. Shunji Nishimura, 605, Pompeia, SP, 17586-050. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2861-3533.

[5] Física, Instituto Politécnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro. E-mail: marcelacampista@macae.ufrj.br, Av. Aluízio da Silva Gomes, 50, Macaé, RJ, 27930-560. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2449-6528.

[6] Físico, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. E-mail: ipolikarpov@ifsc.usp.br, Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, SP, 13566-590. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9496-4174.

[7] Engenheiro Agrônomo, Instituto Agronômico (IAC), Campinas, SP. E-mail: heitor.cantarella@sp.gov.br, Av. Barão de Itapura, 1.481, Campinas, SP, 13020-902. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1894-3029.

[8] Físico, FATEC Pompeia "Shunji Nishimura", Pompeia, SP. E-mail: hannes@fatecpompeia.edu.br, Av. Shunji Nishimura, 605, Pompeia, SP, 17586-050. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2984-2028.

Autor correspondente: Hannes Fischer (hannes@fatecpompeia.edu.br)

Preprint. Modelos, código e dados em acesso aberto: https://doi.org/10.5281/zenodo.23889788.

RESUMO

Três fatos de 2026 marcam o fim do ciclo do etanol como produto exclusivamente combustível e de mercado doméstico, mas não o do etanol combustível. Em 2025/26, o etanol de milho cresceu 29,8% e o de cana caiu 6,9%; em agosto, a mistura na gasolina subiu para 32%, a três pontos do teto; em julho, 9,7% dos leves emplacados foram 100% elétricos, e um terço dos hatches pequenos, segmento que mais consome hidratado. Um modelo de frota por ano de venda, com trajetórias de eletrificação de 23 países, confronta a demanda de etanol de leves e motocicletas até 2050 com a expansão projetada do milho. O excedente chega a 10–18 bilhões de litros em 2035 e 14–24 bilhões em 2040, contra o equilíbrio do plano decenal, e persiste com eletrificação lenta, porque começa pelo milho. Somados, os mitigadores (mix açúcar–etanol, freio no milho, mistura a 35%, participação do hidratado no patamar de 2019) aproximam do equilíbrio o balanço central de 2035, mas deixam 4 a 8 bilhões em 2040 (0 a 5 com eletrificação lenta). Novos destinos (navegação, diesel renovável, querosene de aviação, química, exportação) podem absorver 6 a 18 bilhões em 2040, mas não estão contratados. Propõe-se tratar o excedente como plataforma: abrir esses mercados, capturar o CO_2 de fermentação e instalar biomanufatura por contrato em usinas e biorrefinarias, com piloto paulista. Com décadas de ciência agronômica tropical e uma nova geração de cientistas, o Brasil pode tornar-se fornecedor confiável de combustíveis, moléculas, proteínas e remoções de carbono.

Palavras-chave: etanol; eletrificação; biomanufatura; bioeconomia; política agrícola; cana-de-açúcar; etanol de milho.

ABSTRACT

Three 2026 facts mark the end of the era of ethanol as a fuel-only product for the domestic market, though not the era of fuel ethanol. In 2025/26, corn ethanol grew 29.8% while sugarcane ethanol fell 6.9%; in August, the gasoline blend rose to 32%, three points below the legal cap; in July, 9.7% of new light vehicles were battery-electric, as were one in three small hatchbacks, the largest consumers of hydrous ethanol. A

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

vintage fleet model, with electrification paths based on 23 countries, sets ethanol demand from light vehicles and motorcycles to 2050 against the projected corn ethanol expansion. The surplus reaches 10–18 billion litres per year by 2035 and 14–24 billion by 2040, contrary to the balance in Brazil's Ten-Year Energy Plan, and it persists even under slow electrification, because it starts with corn. Together, known buffers (the sugar–ethanol mix, slower corn expansion, a 35% blend and the 2019 hydrous-ethanol energy share) bring the central 2035 balance close to equilibrium but leave 4–8 billion in 2040 (0–5 under slow electrification). New outlets (shipping, renewable diesel and jet fuel, chemicals and exports) could absorb 6–18 billion litres by 2040, but are not yet contracted. We propose treating the surplus as a platform: opening these markets, capturing fermentation CO_2 and hosting contract biomanufacturing at sugarcane mills and corn biorefineries, with a São Paulo pilot. With decades of tropical agricultural science and a new generation of scientists, Brazil can become a reliable supplier of fuels, molecules, proteins and carbon removals.

Keywords: ethanol; electrification; biomanufacturing; bioeconomy; agricultural policy; sugarcane; corn ethanol.

1 Introdução

O debate sobre o futuro do etanol brasileiro costuma ser conduzido em termos de previsão: quando o carro elétrico chegará, quanto custará e se o consumidor o aceitará. Este artigo parte, em vez disso, de três fatos verificáveis de 2026 que redefinem o problema:

- **Safra:** segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a produção brasileira de etanol em 2025/26 alcançou 37,5 bilhões de litros, alta de apenas 0,8%. Dentro desse total, o etanol de milho cresceu 29,8%, para 10,17 bilhões de litros, e o de cana caiu 6,9%, para 27,33 bilhões (CONAB, 2026). A Conab atribui a queda à menor disponibilidade de matéria-prima e à opção das usinas pelo açúcar diante da retração de preços do biocombustível. A produção nacional está trocando de matéria-prima e de região, embora a queda da produção de etanol de cana possa ser temporária.
- **Bomba:** em 1º de agosto de 2026 entrou em vigor a Resolução nº 9/2026 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), que elevou de 30% para 32% o teor de etanol anidro na gasolina, em caráter excepcional e temporário, por 180 dias prorrogáveis uma única vez (ANP, 2026). Foi a segunda alta em doze meses. O Ministério de Minas e Energia (MME) estima que a medida reduza a importação de gasolina em cerca de 900 milhões de litros por ano (ANP, 2026). A Lei nº 14.993/2024, a Lei do Combustível do Futuro, fixa o teto em 35% (BRASIL, 2024b). Restam três pontos percentuais no instrumento que o país usa há 95 anos para escoar excedente agrícola.
- **Emplacamentos:** em julho de 2026, segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE) e a Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (Fenabrave), foram emplacados 25.782 veículos leves 100% elétricos (elétricos puros), o maior volume mensal da série, equivalentes a 9,7% dos 265.695 veículos leves licenciados no mês. Os eletrificados como um todo chegaram a 21% do mercado (ABVE, 2026a; FENABRAVE, 2026).

Os três fatos descrevem uma oferta que cresce por investimentos em boa parte já decididos, um instrumento de mitigação que se aproxima do teto e uma frota que começa a mudar de fonte de energia. Projetados num modelo de frota, resultam num excedente de 14 a 24 bilhões de litros por ano já em 2040, que os mitigadores conhecidos só absorvem em parte. O excedente é condicional: é a diferença entre a oferta projetada e os usos modelados, e não uma previsão de estoques que se acumularão, porque oferta sem mercado não se realiza. É o volume que precisa de novo destino para que a expansão em curso se pague. O excedente não depende de uma eletrificação rápida: mesmo com o carro elétrico estacionado em cerca de um quinto das vendas, sobram de 10 a 15 bilhões de litros em 2040, porque o primeiro excedente vem do milho (seção 3.3). O diagnóstico é o oposto do planejamento oficial, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2035), do MME e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que projeta para 2035 oferta pouco acima da demanda, de 51 e 48 bilhões de litros (MME; EPE, 2025a).

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

Sob a ótica exclusiva do motor a combustão, isso é uma crise de superoferta. Sob a ótica da transição climática, é outra coisa. O excedente de 2040 equivale a 23 a 39 milhões de toneladas de açúcar fermentescível por ano (o primeiro excedente vem do amido de milho do Centro-Oeste; depois de 2030, com a queda da demanda, passa a incluir a sacarose da cana do Centro-Sul), produzidas com energia renovável em área já cultivada, num país que ocupava com lavouras menos de 8% do território em 2018 (EMBRAPA TERRITORIAL, 2018) e que tem 28 milhões de hectares de pastagens degradadas com alto potencial agrícola (BOLFE et al., 2024). Redirecionar esse carboidrato não exige área nova; crescer além dele dependerá de recuperar pastagens com rastreabilidade e de controlar os efeitos diretos e indiretos sobre o uso da terra e a produção de alimentos. Num mundo de extremos climáticos e cadeias de suprimento fragmentadas, carbono biogênico barato, rastreável e expansível sem desmatamento é um ativo escasso. O Brasil pode deixar de ser apenas o país do etanol para se tornar o fornecedor confiável de moléculas, proteínas e remoções de carbono de que outros países vão precisar.

O argumento não é que o etanol combustível tenha os dias contados. O que se encerra é o ciclo do etanol exclusivamente combustível, de mercado exclusivamente doméstico e veicular leve. Os mesmos meses de 2026 abriram mercados de combustível que o carro de passeio não alcança: em outubro, um porta-contêineres foi abastecido comercialmente com etanol pela primeira vez, com produto fornecido pela Raízen (RAMOS, 2026); uma biorrefinaria anunciada em Paulínia (SP) vai converter 1,8 bilhão de litros de etanol por ano em diesel renovável ou querosene de aviação (VALIM, 2026); e fabricantes de tratores e colhedoras testam motores a etanol no campo (ONDEI, 2026). No mundo, o transporte ainda é 95% fóssil, e mais de 70% da frota prevista para 2030 já está em circulação (IEA BIOENERGY TASK 39, 2026a). Esses mercados são a primeira frente da resposta ao excedente. A biomanufatura a completa, porque nenhum deles está contratado e todos dependem de regras e investimentos que o país não controla sozinho.

A pergunta que orienta o artigo é: em que medida a expansão da oferta e a eletrificação da frota poderão gerar um excedente estrutural de etanol no Brasil, e quais estratégias industriais poderão absorvê-lo? O restante do artigo quantifica o encontro das três curvas, testa a robustez do resultado e o contrasta com o PDE 2035 (seções 2 e 3), examina o que pode mitigar a queda de demanda, inclusive os novos mercados de combustível (seção 3), e propõe uma política para converter o excedente em plataforma de biomanufatura (seções 4 a 9). O Apêndice A traz as equações e os parâmetros do modelo.

2 Queda da demanda

2.1 Hatches pequenos: um caso de mudança

O avanço elétrico pode ser observado no segmento de maior volume de vendas e maior consumo de etanol hidratado. A Tabela 1 reproduz o segmento de hatches pequenos em junho e julho de 2026. Contados também os elétricos de menor volume incluídos em “Demais modelos”, a participação elétrica passou de 29,4% para 34,4% no mês e chegou a 27,3% no acumulado do ano (26,6% só com os três modelos chineses listados). O segmento cresceu 3,0%; os elétricos cresceram 20,3% e os modelos a combustão caíram 4,2%. Em julho, os três elétricos chineses venderam, somados, o mesmo que os dois líderes a combustão (19.655 contra 19.653 unidades). A tecnologia entrante avança pela participação, já que o segmento em si está relativamente estável.

Tabela 1. Segmento hatch pequeno, emplacamentos de 2026

Modelo	Motorização	Jun/26	Jul/26	Acumulado jan–jul/26	Participação jan–jul/26
VW Polo	Flex	10.939	10.340	64.431	19,5%
Fiat Argo	Flex	9.831	8.612	54.641	16,5%
GM Onix	Flex	7.972	9.313	54.421	16,4%
BYD Dolphin Mini	Elétrico	6.455	7.265	42.930	13,0%
Hyundai HB20	Flex	6.914	3.037	41.966	12,7%
BYD Dolphin	Elétrico	5.509	6.492	24.533	7,4%

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

Modelo	Motorização	Jun/26	Jul/26	Acumulado jan–jul/26	Participação jan–jul/26
Geely EX2	Elétrico	4.383	5.898	20.678	6,3%
Demais modelos[a]	–	4.410	7.134	27.400	8,3%
Total	–	**56.413**	**58.091**	**331.000**	**100%**
Três elétricos chineses (subtotal)	Elétrico	16.347	19.655	88.141	26,6%
Todos os elétricos do segmento[b]	Elétrico	≈16,6 mil	≈20,0 mil	≈90,3 mil	27,3%

Fonte: Fenabrave (2026), dados parciais; O Tempo (2026), para o Hyundai i20; elaboração dos autores.
Nota: (a) Em julho, calculado por diferença em relação ao total do segmento; inclui o Hyundai i20, lançado no mês (2.668 unidades). (b) Inclui elétricos de menor volume dentro de "Demais modelos" (cerca de 0,2 mil em junho, 0,3 mil em julho e 2,2 mil no acumulado).

A queda mensal dos modelos a combustão não deve ser lida como substituição imediata. Ela se concentra no Hyundai HB20 (−56%), que em julho dividiu as vendas com o recém-lançado Hyundai i20 (O TEMPO, 2026); somados, os dois modelos ficam 17% abaixo do HB20 de junho, e sem o HB20 os demais modelos a combustão listados caem só 1,7%. Dois meses representam um sinal, que não pode ser considerado uma tendência. O sinal estrutural está no acumulado e na série mais longa: a participação dos elétricos puros no mercado total de leves subiu de menos de 5% em 2025 para 6,7% no primeiro semestre de 2026 e 8,1% em junho, antes do recorde de volume de julho (ABVE, 2026a). Nos meses seguintes, a série oscilou: cerca de 10,3% em agosto e 8,3% em setembro. A média do trimestre, 9,4%, é o ponto de partida das projeções (ABVE, 2026b; 2026c).

2.2 Calculando a frota futura: premissas

A projeção segue cinco passos, apresentados nesta ordem: quantos veículos o país terá (passo 1); quantos serão vendidos a cada ano, dado o sucateamento da frota existente (passo 2); que parcela dessas vendas será elétrica ou híbrida (passo 3); a conversão da frota resultante em litros de etanol (passo 4); e o balanço com a oferta (passo 5, seção 3). Os resultados de frota acompanham cada passo, e a demanda de etanol é apresentada na seção 2.3. A Figura 1 resume o encadeamento, e o Apêndice A traz as equações e os parâmetros.

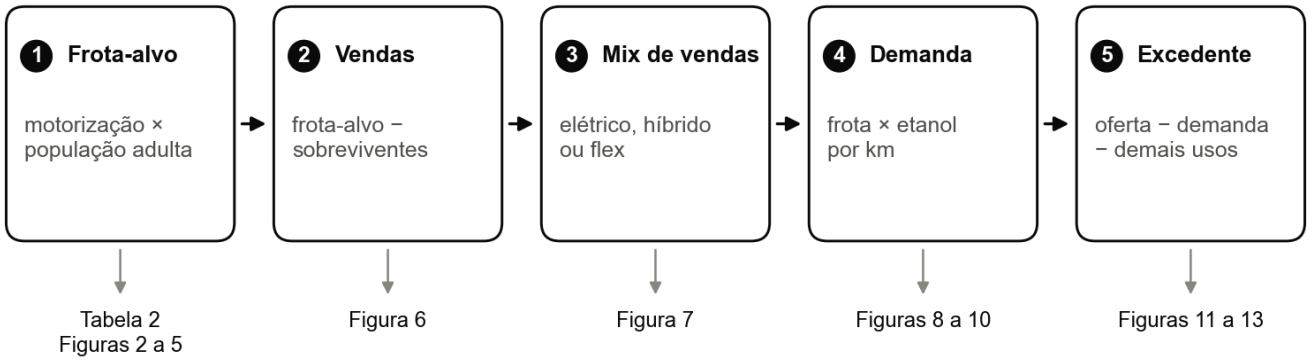


Figura 1. Estrutura do modelo de frota e demanda de etanol

Fonte: elaboração dos autores.

Nota: o modelo roda ano a ano de 2026 a 2050, em seis cenários de frota e três trajetórias de eletrificação (18 cenários). Dados de cada passo: (1) população com 18 anos ou mais e produto interno bruto (PIB) per capita crescendo 1,0%, 1,5% ou 2,0% ao ano (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE); (2) vendas desde 1957 (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores – Anfavea) e idade da frota (Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores – Sindipeças); (3) emplacamentos por motorização (ABVE e Fenabrave) e velocidades de adoção de 23 países (Ember); (4) intensidades de etanol por motorização (MERA et al., 2023) e consumo de 2025 (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP); (5) oferta de cana (Conab) e de milho (União Nacional do Etanol de Milho – UNEM). As motocicletas seguem os passos 1, 2 e 4, sem eletrificação no caso-base (a Figura 10 testa motos elétricas); os comerciais leves a diesel são separados no passo 3 e não consomem etanol.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

2.2.1 Taxa de motorização e renda

A taxa de motorização é calculada sobre a população com 18 anos ou mais, e não sobre a total, porque a mudança demográfica em curso distorceria a série no longo prazo: os menores de idade diminuem tanto em número absoluto quanto em participação.

Para automóveis e comerciais leves, a motorização acompanha o PIB per capita entre dois limites (Figura 2). O limite superior é uma curva de Gompertz com ajuste parcial (DARGAY; GATELY; SOMMER, 2007): a motorização de equilíbrio é $m^*(y) = M \cdot \exp[-\alpha \cdot \exp(-\beta \cdot y/100)]$, em que y é o PIB per capita real (2000 = 100), e a motorização observada se aproxima dela a cada ano numa fração θ da distância. Como a saturação M não é identificável com 26 anos de dados, ela é fixada em 500 veículos por mil adultos; o ajuste a 2000–2025 dá $\alpha = 12{,}9$, $\beta = 2{,}42$ e $\theta = 0{,}17$, com elasticidade-renda próxima de 1,4, como em 2000–2014. Na projeção, a curva é reancorada para que 2025 seja ponto de equilíbrio, o que reduz a saturação efetiva para cerca de 425 (Apêndice A.1): só o crescimento da renda move a motorização, e a distância que o ajuste atribui a 2025 não é tratada como demanda reprimida. O limite inferior repete a elasticidade de 2015–2025, de apenas 0,08: nessa década, a motorização ficou parada perto de 280 por mil adultos, embora a renda per capita de 2025 tenha superado a de 2014. O PIB per capita real cresce 1,0%, 1,5% ou 2,0% ao ano (hipóteses; histórico em IBGE, 2025), o que resulta em seis cenários de frota. As faixas entre esses seis cenários não cobrem toda a incerteza dos parâmetros, das fontes de frota ou da oferta.

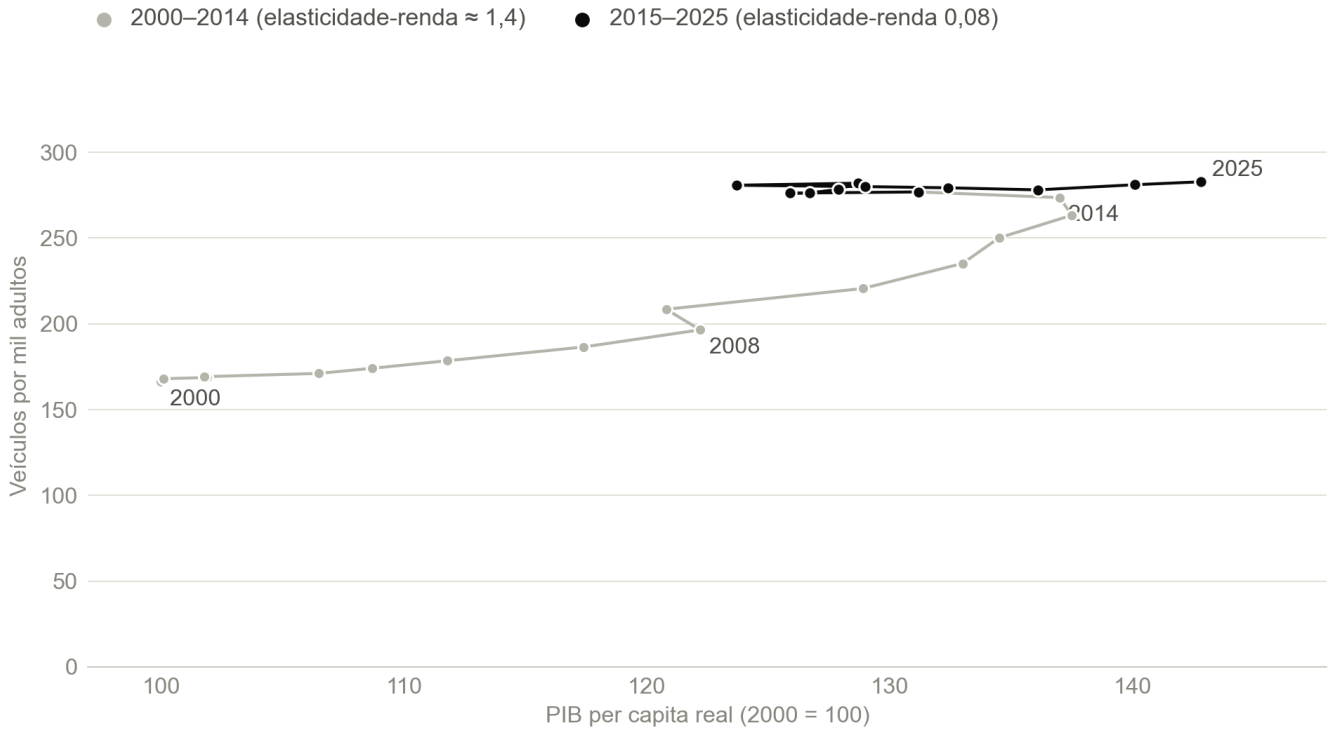


Figura 2. Motorização de automóveis e comerciais leves e renda, 2000–2025

Fonte: elaboração dos autores a partir de Abipeças e Sindipeças (2023; 2026), Anfavea (2026a) e IBGE (2024; 2025). Antes de 2010, frota reconstruída a partir das vendas.

Nota: até 2014, renda e motorização crescem juntas; de 2015 a 2025, a renda sobe e a motorização fica parada perto de 280 veículos por mil adultos.

As motocicletas seguem o mesmo método. São 14,6 milhões em 2025 (ABIPEÇAS; SINDIPEÇAS, 2026), ou 89 por mil adultos, e sua motorização reage à renda entre a elasticidade de 2015–2025 (0,1) e a da retomada de 2021–2025 (0,9) (Figura 3).

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

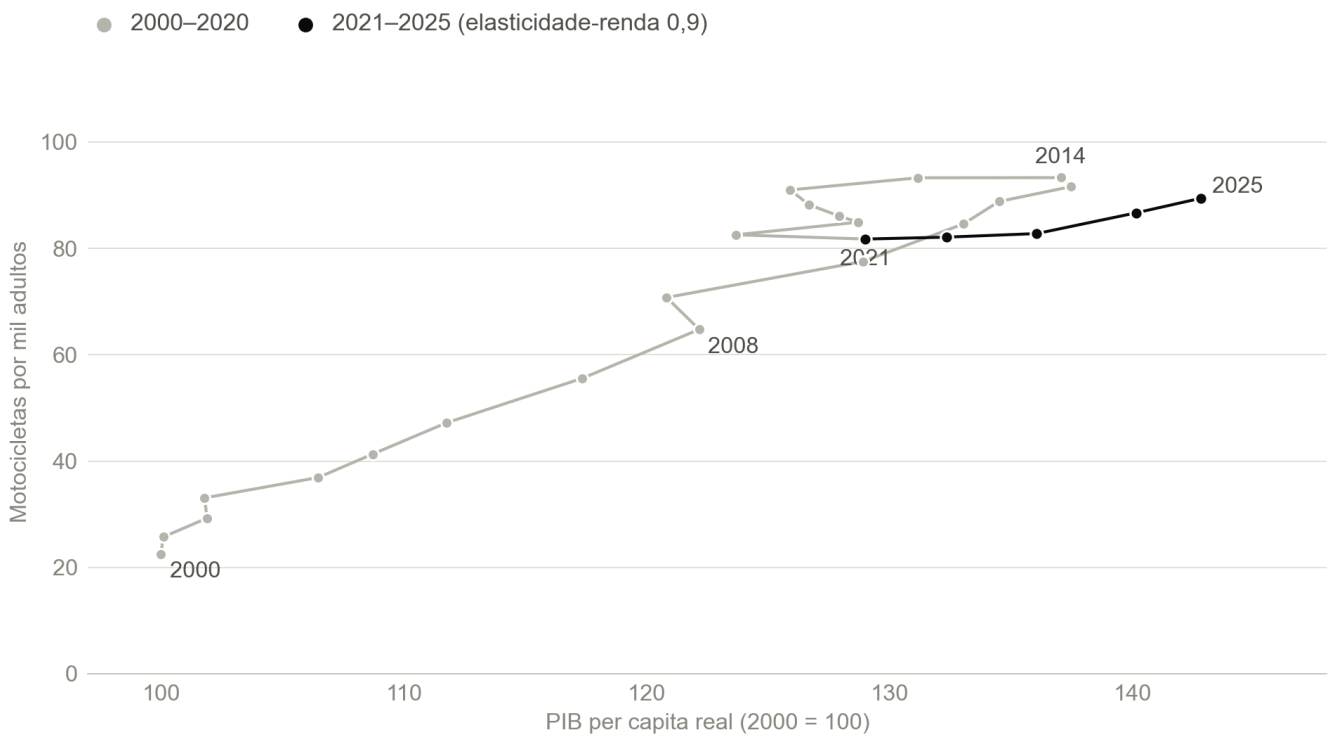


Figura 3. Motorização de motocicletas e renda, 2000–2025

Fonte: elaboração dos autores a partir de Abipeças e Sindipeças (2026), Abraciclo (2026) e IBGE (2024; 2025). Antes de 2016, frota reconstruída a partir das vendas.

Nota: a motorização por motocicletas quadruplicou até 2014, recuou até 2020 e voltou a subir a partir de 2021.

Aplicadas as taxas de motorização às projeções de população adulta do IBGE, a frota circulante passa de 61 milhões de veículos em 2025 para cerca de 81 milhões em 2050, somados automóveis, comerciais leves e motocicletas (Figura 4).

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

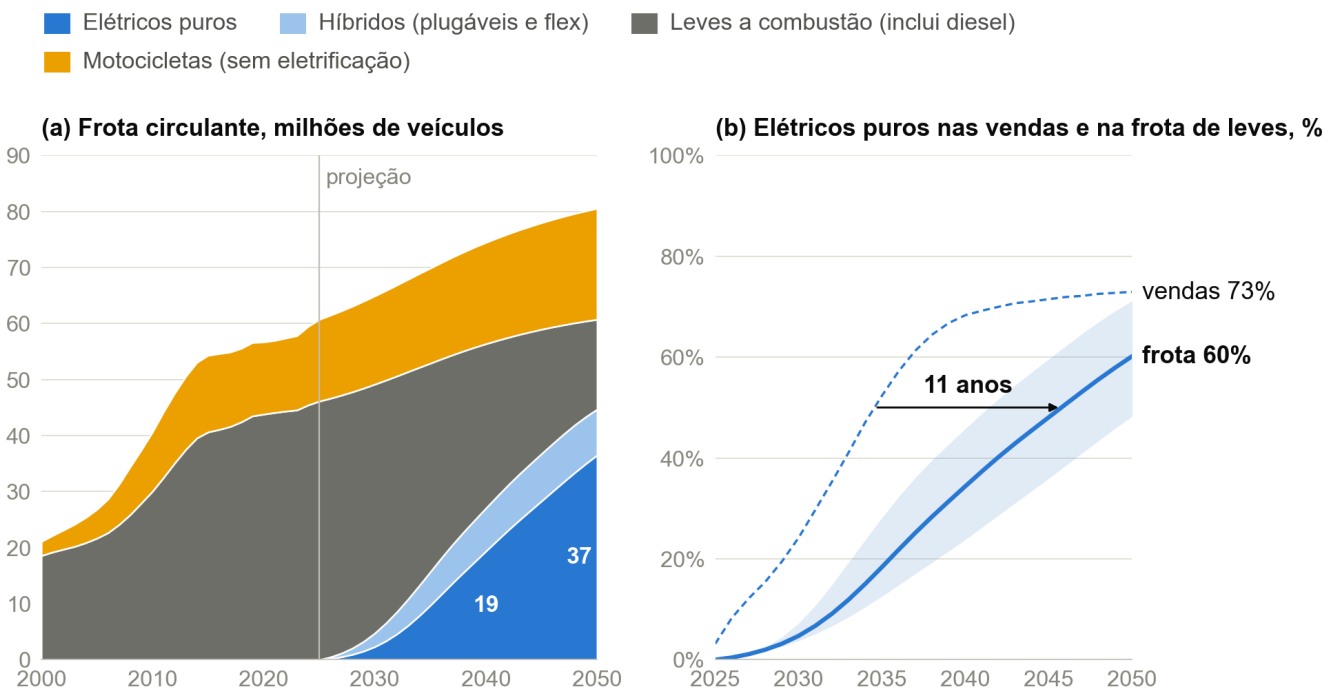


Figura 4. Frota circulante por motorização e participação dos elétricos nas vendas e na frota, 2000–2050

Fonte: elaboração dos autores a partir de Abipeças e Sindipeças (2023; 2026), Anfavea (2026a) e Abraciclo (2026). Projeção com PIB per capita de 1,5% a.a., média dos limites inferior e superior de motorização e trajetória central de eletrificação (seção 2.2.3). Antes de 2010 (leves) e de 2016 (motocicletas), frota reconstruída a partir das vendas.

Nota: no painel (b), linha tracejada: participação nas vendas; linha cheia: participação na frota de leves, ambas na trajetória central; faixa: participação na frota nas trajetórias lenta e rápida. Os elétricos passam de metade das vendas em 2035, mas da frota só por volta de 2046.

Para os leves, a faixa entre os seis cenários de motorização e renda vai de 53 a 71 milhões de veículos em 2050 (Tabela 2, Figura 5). A frota de motocicletas chega a 17–25 milhões.

Tabela 2. Frota, motorização e vendas projetadas de veículos leves e motocicletas (faixa entre os seis cenários de motorização e PIB per capita)

Ano	Automóveis e comerciais leves: Por mil adultos	Automóveis e comerciais leves: Frota (milhões)	Automóveis e comerciais leves: Vendas (milhões por ano)	Motocicletas: Por mil adultos	Motocicletas: Frota (milhões)	Motocicletas: Vendas (milhões por ano)
2025	283	46,1	2,55	89	14,6	2,20 (observado)
2030	284–298	48,2–50,6	3,10–3,87	90–98	15,3–16,6	1,62–1,98
2035	285–325	50,1–57,1	3,43–4,50	90–107	15,9–18,7	1,56–2,07
2040	286–351	51,6–63,3	2,72–3,82	91–116	16,4–21,0	1,55–2,23
2050	289–392	52,6–71,3	2,86–4,07	92–139	16,7–25,3	1,62–2,73

Fonte: elaboração dos autores a partir de IBGE (2024; 2025), Anfavea (2026a), Abraciclo (2026) e Abipeças e Sindipeças (2023; 2026).

Nota 1: valores pontuais de cada ano. As vendas de leves atingem o pico em 2033 no limite inferior (3,50 a 3,55 milhões) e em 2034 no superior (4,05 a 4,53 milhões) (Figura 6). Vendas = reposição + crescimento da frota. A reposição (saída da frota) passa de cerca de 2,0 milhões em 2026 para 2,7 milhões em 2030 e 3,1 a 3,2 milhões em 2035, quando os veículos vendidos em grande número entre 2009 e 2014 (mais de 3 milhões por ano) chegam à idade de sucateamento, e recua depois. O crescimento da frota acrescenta de 0,4 a 0,6 milhão de veículos em 2026; depois, cerca de 0,4 milhão por ano no limite inferior (0,2 milhão em 2040) e de 0,8 a 1,3 milhão no superior (2030–2040). A Anfavea projeta alta de 12,6% nos emplacamentos de automóveis e comerciais leves em 2026

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

(MOVIMENTO ECONÔMICO, 2026), acima dos 2,4 a 2,6 milhões do modelo; um teste com vendas de 2026 ainda maiores (+16%) altera a demanda de etanol de longo prazo em menos de 2%, porque a frota futura é dada pela motorização, e vendas antecipadas reduzem as dos anos seguintes.

Nota 2: as vendas de motocicletas de 2025 (2,20 milhões) refletem a recomposição da frota depois da pandemia, que cresceu 0,75 milhão em 2024 e 0,57 milhão em 2025. No modelo, a motorização passa a acompanhar a renda e a frota cresce de 0,1 a 0,4 milhão por ano; as vendas tornam-se sobretudo reposição (cerca de 1,4 a 1,5 milhão por ano até 2030), o que explica o recuo para 1,6–2,0 milhões em 2030.

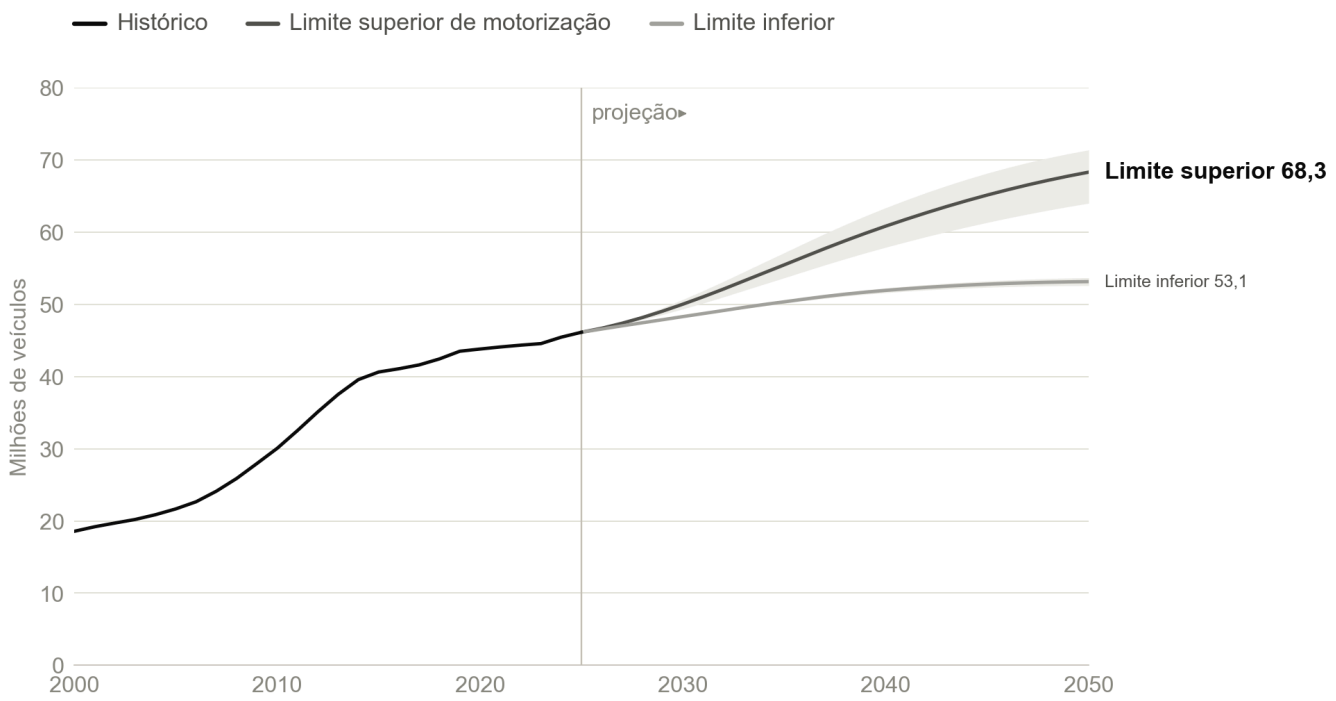


Figura 5. Frota de veículos leves, 2000–2050

Fonte: elaboração dos autores.

Nota: linhas, PIB per capita crescendo 1,5% ao ano; faixas, de 1,0% a 2,0% ao ano. Em 2050, a frota fica entre 64,0 e 71,3 milhões no limite superior de motorização e entre 52,6 e 53,7 milhões no limite inferior.

2.2.2 Vendas e sucateamento

A taxa de motorização define quantos veículos circulam; o sucateamento define quantos deles são substituídos a cada ano. As vendas de cada ano cobrem o crescimento da frota e a reposição dos veículos que saem de circulação, e é sobre essas vendas que a eletrificação atua: quanto mais lento o sucateamento, mais tempo a frota flex leva para ser renovada.

As vendas de cada ano são as necessárias para atingir a frota projetada, descontados os veículos vendidos em anos anteriores que ainda estão em circulação. Esses veículos foram estimados a partir das vendas anuais de automóveis e comerciais leves desde 1957 (ANFAVEA, 2026a) e de uma curva de sobrevivência de Weibull com taxa de atrito constante, $S(a) = \exp[-h \cdot a - (a/\lambda)^k]$, em que a é a idade (a safra vendida no ano c tem idade 1 em c, como no relatório do Sindipeças). O termo h representa as perdas ao longo da vida (acidentes, roubos e baixas), e o termo de Weibull, de forma muito íngreme, a saída concentrada por volta da idade λ. A curva foi calibrada acompanhando quantos veículos vendidos em cada ano ainda circulam, a partir das vendas da Anfavea e da estrutura etária da frota do Sindipeças (16 totais anuais e 50 faixas etárias): para automóveis, h = 0,015 (perda de 1,5% ao ano), λ = 23,4 anos e k = 16,9 (vida média de 19,2 anos); para comerciais leves, h = 0,012, λ = 19,1 anos e k = 7,6 (16,1 anos). Dentro da amostra usada na calibração, a curva reproduz a frota de 2010–2025 com erro quadrático médio de 0,4% nos automóveis e de 0,7% nos comerciais leves, e o sucateamento implícito de 2025, de 1,9 milhão de veículos, cerca de 4% da frota. É um erro de ajuste, e não uma validação fora da amostra. A forma da curva pesa pouco no balanço: com uma Weibull simples, sem o termo de atrito, que se ajusta pior ao histórico, o excedente central de 2040 fica praticamente igual, de 17,7 a 21,1 bilhões de litros (Apêndice A.9).

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

A idade média dos automóveis chegou a 11 anos e 5 meses em 2025 (ABIPEÇAS; SINDIPEÇAS, 2026), o que retarda a chegada dos elétricos ao estoque. No modelo, os carros vendidos em grande número em 2009–2014 deixam a frota sobretudo entre 2033 e 2036, numa onda de reposição que ocorre quando os elétricos já se aproximam da metade das vendas na trajetória central (Figura 6; seção 2.2.3).

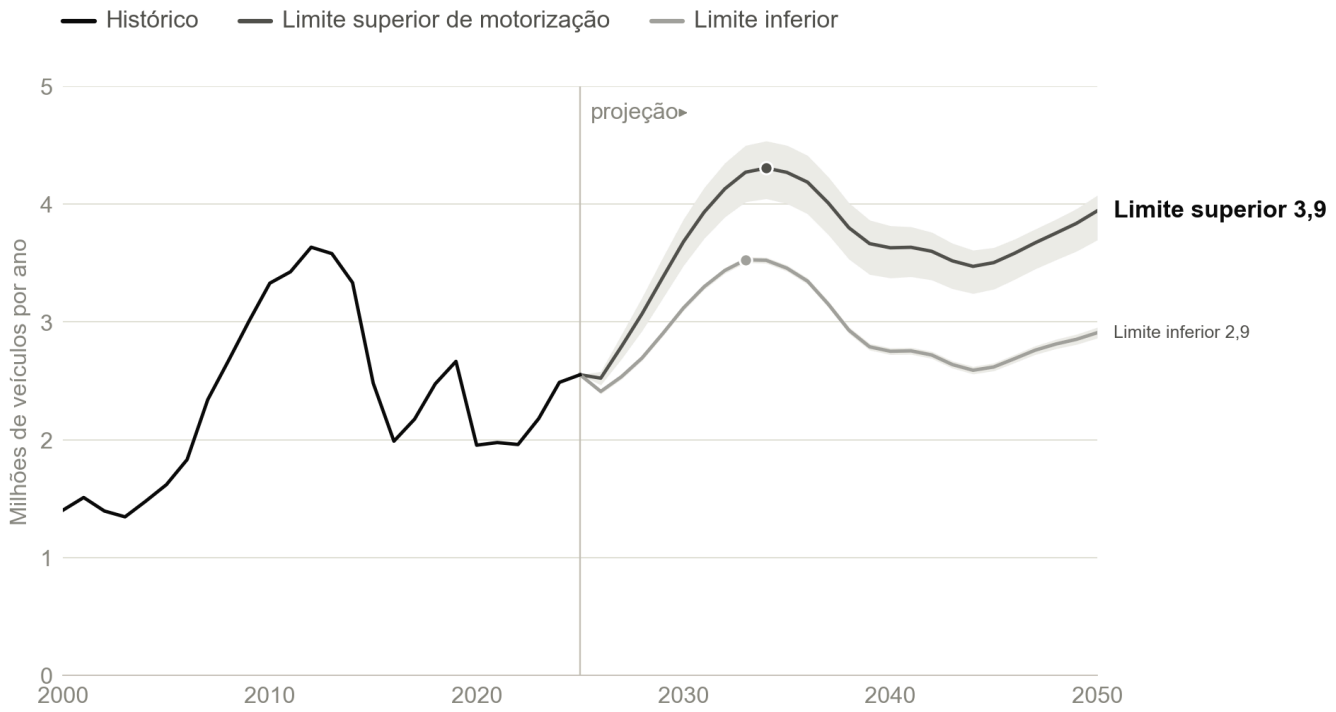


Figura 6. Vendas de veículos leves, 2000–2050

Fonte: elaboração dos autores; histórico de Anfavea (2026a).

Nota: linhas, PIB per capita crescendo 1,5% ao ano; faixas, de 1,0% a 2,0% ao ano. Pontos: picos de vendas, de 4,3 milhões em 2034 no limite superior e de 3,5 milhões em 2033 no inferior. Em 2050, as vendas ficam entre 3,7 e 4,1 milhões no limite superior e entre 2,9 e 3,0 milhões no inferior.

Para as motocicletas, a curva de mesma forma funcional, calibrada nas vendas da Abraciclo desde 1975 e nas faixas etárias do Sindipeças, tem h = 0,049, λ = 22,6 anos e k = 2,1, com corte aos 20 anos (o relatório não registra motos mais velhas), o que resulta em vida média de 10,4 anos (ABRACICLO, 2026).

2.2.3 Eletrificação: três trajetórias possíveis

Dois tipos de veículos recebem tratamento à parte:

- **comerciais leves a diesel:** ficam fora da demanda, pois não consomem etanol; representavam 9,9% das vendas de leves em 2025 (ANFAVEA, 2026b) e 6,9% da frota, fatia que sobe para cerca de 9% até 2050. A participação nas vendas é mantida constante;
- **motocicletas:** devido à presença ainda incipiente de motos elétricas no mercado, o caso-base mantém a eletrificação zerada. É uma limitação que superestima a demanda futura de etanol; a seção 2.5 testa a eletrificação das motos.

Para os demais comerciais leves e para os automóveis, foram consideradas três trajetórias de eletrificação, partindo da média observada no terceiro trimestre de 2026 (Figura 7).

As trajetórias não são ajustadas à série brasileira. Antes da inflexão, o ajuste logístico ao trecho inicial de uma curva de adoção é instável, porque o ponto de inflexão e a assíntota ainda não estão identificados: no ajuste exploratório aos dados brasileiros de 2021 a 2026, a extrapolação levaria os elétricos à metade das vendas já em 2030, qualquer que fosse a assíntota. Por isso, a velocidade vem de países que já passaram pelo patamar em que o Brasil está, e o resultado é apresentado como faixa.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

Foram usados os 23 países com pelo menos 100 mil veículos leves vendidos em 2025 em que os elétricos puros já tinham passado de 9% das vendas (média de três meses) havia pelo menos 18 meses (EMBER, 2026). Para cada um, mediu-se a velocidade de adoção em até cinco anos depois desse ponto. Medir a partir de 9%, e não do início da adoção, importa: depois dos primeiros compradores, a adoção passa a depender do consumidor médio, e em vários mercados ricos estacionou por anos. A velocidade mediana dos 23 países equivale a cerca de onze anos para ir de 20% a 80% da saturação; a dos emergentes (China, Tailândia, Turquia, Indonésia e Vietnã), a cerca de cinco anos. Medida a partir de 9%, a velocidade não acompanha a fama: Noruega e China, líderes em participação — na Noruega, os elétricos puros passaram de 20,8% dos emplacamentos em 2017 (CLEANTECHNICA, 2018) para cerca de 90% em 2024; na China, os eletrificados chegaram a quase metade das vendas em 2024 (IEA, 2025) —, ficam perto da mediana, e os mais rápidos são Vietnã, Dinamarca, Indonésia e Tailândia. Na Romênia e na Grécia, onde a participação recuou depois dos 9%, e em Taiwan, onde ficou parada, a velocidade é substituída por um piso de crescimento muito lento, e não por estagnação completa.

Com essas velocidades, foram sorteadas 2.000 trajetórias logísticas, metade com a velocidade de um país emergente e metade com a de um dos demais (os cinco emergentes têm, juntos, o mesmo peso que os outros 18 países), com ruído na velocidade, saturação entre 75% e 95% das vendas não diesel (68% a 86% do total) e partida na média de julho a setembro de 2026. O peso dado aos emergentes reflete a semelhança com o caso brasileiro: aqui os elétricos chegaram a 9% das vendas puxados pelo preço dos modelos chineses e pela produção local, sem subsídio federal à compra e com o imposto de importação subindo de zero, em 2023, para 35% em julho de 2026 (LEGISWEB, 2023). O peso é uma escolha dos autores: com peso proporcional ao número de países (5 de 23), as trajetórias ficam mais lentas, e o excedente central de etanol em 2040 cai cerca de 2 bilhões de litros, para 15,6 a 19,6 bilhões (Apêndice A.9). As trajetórias rápida, central e lenta são o quartil superior, a mediana e o quartil inferior das 2.000 curvas, ano a ano; nelas, os elétricos chegam à metade das vendas em 2031, 2035 e 2040 (Figura 7). Como os quartis são tomados ano a ano e muitas curvas ainda não saturaram em 2050, as trajetórias ficam abaixo da saturação sorteada, em 68% a 79% das vendas naquele ano. São envelopes de cenários condicionados a essas escolhas, e não intervalos de probabilidade para o Brasil: os 23 países foram escolhidos justamente por terem passado de 9%, e os quartis ano a ano não correspondem, necessariamente, a uma única curva sorteada.

As trajetórias descrevem vendas, e não frota: como cada carro vendido roda, em média, perto de duas décadas, a frota responde com grande atraso (Figura 4 e seção 2.3). Também não são metas de governos ou de montadoras: medidas a partir de 9% das vendas, as velocidades incorporam a estagnação que vários mercados ricos viveram depois dos primeiros compradores, e a trajetória lenta só leva os elétricos à metade das vendas em 2040.

Em todas as trajetórias, os híbridos plugáveis e não plugáveis são modelados explicitamente. Sua participação nas vendas não elétricas segue uma logística ancorada no valor observado em julho de 2026 (14,2% das vendas não elétricas e não diesel; ABVE, 2026a), com teto de 50% e sete anos para ir de 20% a 80% desse teto (hipóteses); chega a 33% em 2030, 47% em 2035 e praticamente ao teto em 2040. A composição de julho de 2026 é mantida até 2050: dois terços plugáveis e, entre os não plugáveis, 57% flex.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

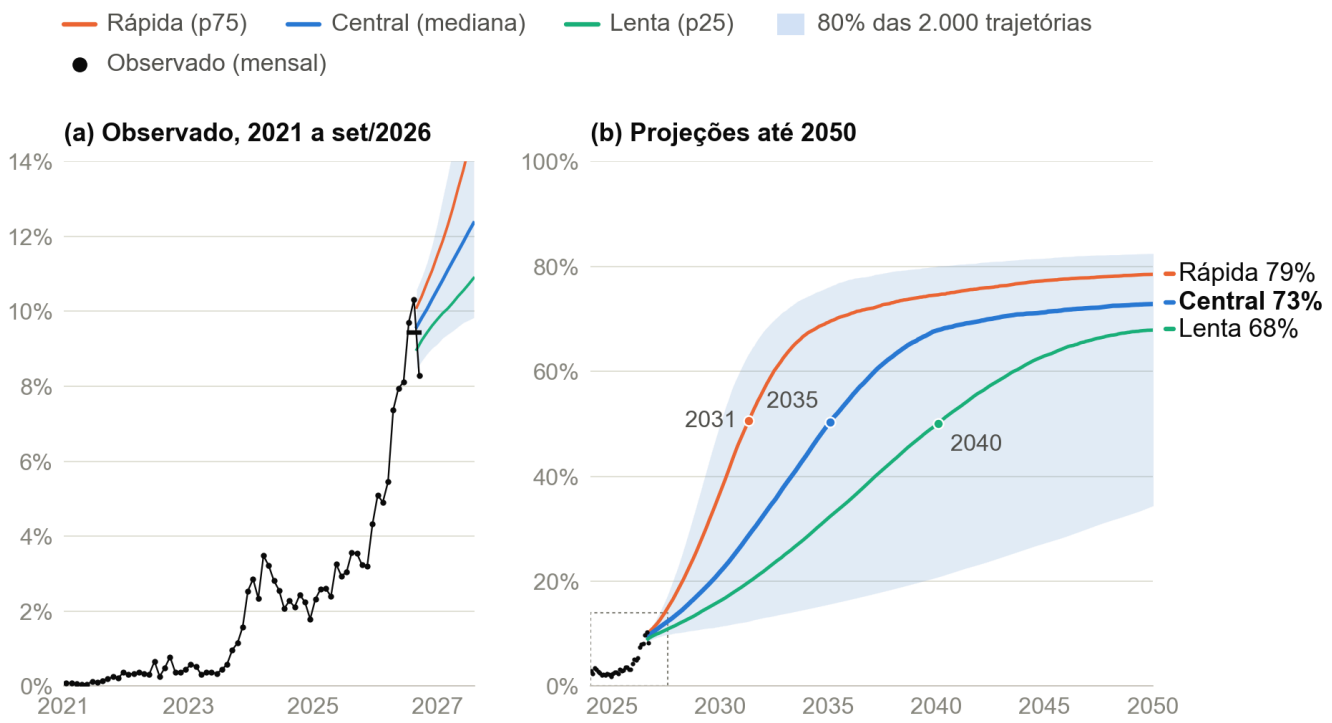


Figura 7. Participação dos veículos 100% elétricos nos emplacamentos de automóveis e comerciais leves

Fonte: elaboração dos autores; observado: Anfavea, via Ember (2026), até julho de 2026, e ABVE (2026b; 2026c), em agosto e setembro; velocidades das trajetórias a partir de Ember (2026). Até 2020, a série da Anfavea não separa elétricos de híbridos e foi omitida.

Nota: no painel (a), a barra preta marca o ponto de partida, a média de julho a setembro de 2026 (9,4%); entre 2021 e 2025, a participação passou de 0,1% para 3% das vendas. No painel (b), os pontos marcam o ano em que cada trajetória chega a 50% das vendas, e a faixa sombreada cobre 80% das 2.000 trajetórias (percentis 10 a 90). A figura mostra a participação nas vendas, e não na frota: em 2040, quando 68% das vendas da trajetória central são elétricas, os elétricos são cerca de um terço da frota de leves (Figura 4).

2.2.4 Consumo de etanol

Cada veículo da frota consome etanol conforme sua motorização. A intensidade de etanol por quilômetro, relativa ao flex convencional (1,0), parte das estimativas de consumo em uso real de Mera et al. (2023), em litros equivalentes de gasolina C: 6,6 L/100 km para o flex, 5,1 L/100 km para o híbrido e 4,3 L/100 km para o híbrido plugável. Não são medições de rodagem no Brasil. Para o flex e o híbrido, são valores do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular, que corrige os ensaios de homologação para as condições de uso. Para o plugável, vêm de ensaios de etiquetagem dos Estados Unidos e já incorporam metade da rodagem em modo elétrico, proporção observada entre usuários particulares na Alemanha e que os próprios autores consideram otimista para o Brasil. O plugável queima, assim, cerca de 65% do combustível do flex (4,3/6,6), e o coeficiente não deve ser dividido novamente por dois. Se os plugáveis rodarem só um quarto em modo elétrico, a demanda de 2040 sobe 0,6 a 0,8 bilhão de litros na trajetória central (Apêndice A.9).

Converter consumo em etanol exige saber quanto etanol há em cada litro equivalente consumido pelo flex médio. Com a mistura de 2025 (46,65 bilhões de litros de gasolina C e 21,24 bilhões de hidratado; SAMORA, 2026), o poder calorífico inferior (PCI) de 29,6 MJ/L da gasolina C e de 21,3 MJ/L do hidratado e o teor E32, cada litro equivalente de gasolina C consumido pela frota contém 0,584 L de etanol (anidro + hidratado). O flex médio consome, portanto, 6,6 × 0,584 = 3,85 L de etanol a cada 100 km, e daí saem as demais intensidades:

- **híbrido-flex:** abastece como o flex; intensidade 5,1/6,6 = 0,77;
- **híbrido que só aceita gasolina C:** consome apenas o anidro, 5,1 × 0,32 = 1,63 L/100 km; intensidade 1,63/3,85 = 0,42. Ponderados pela participação dos modelos flex entre os híbridos não plugáveis vendidos em julho de 2026 (57%; ABVE, 2026a), os dois resultam em 0,62;
- **híbrido plugável:** no Brasil, roda apenas com gasolina C; consome 4,3 × 0,32 = 1,38 L/100 km de anidro; intensidade 0,36. A Ember (2026) chega a uma relação parecida por outro caminho: pelos seus números, cada um dos cerca de 319 mil plugáveis em circulação no Brasil desloca aproximadamente um terço do petróleo

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

deslocado por um elétrico puro, o que equivale a queimar cerca de dois terços do combustível de um veículo a combustão;

- **elétrico:** intensidade zero.

Também seguindo Mera et al. (2023), os veículos a combustão vendidos a partir de 2026 ficam até 11% mais eficientes em 2030, salto equivalente ao exigido pelo programa Rota 2030 e que os próprios autores consideram otimista.

A demanda é convertida em litros pela base observada em 2025: 21,24 bilhões de litros de hidratado e 13,2 bilhões de anidro, este calculado sobre os 46,65 bilhões de litros de gasolina C com o teor médio efetivo do ano, de 28,3% (E27 até julho e E30 a partir de agosto). Em 2026, o teor médio é de 30,8% (E30 até julho e E32 a partir de agosto; AGÊNCIA CENÁRIO ENERGIA, 2026) e, de 2027 em diante, de 32%. É uma hipótese de continuidade: o E32 vale por 180 dias, prorrogáveis uma vez (ANP, 2026). Se a mistura voltar a 30% em agosto de 2027, a demanda de 2040 fica 0,6 a 0,7 bilhão de litros menor, e o excedente, maior na mesma medida (Apêndice A.9). As médias tratam toda a gasolina como comum, embora a premium tenha ficado com 25% de anidro, aproximação de efeito pequeno. Antes de qualquer efeito de frota, a base passa assim de 34,4 bilhões de litros em 2025 para 36,2 bilhões com o E32 o ano todo (+0,8 bilhão do E30 e +0,9 bilhão do E32). Da base de 2025 (34,4 bilhões de litros), 1,6 bilhão (0,9 de anidro e 0,7 de hidratado) vai para as motocicletas, segundo as participações por categoria do Inventário Nacional de Emissões (MMA; MT, 2025); os 32,8 bilhões restantes formam a base dos automóveis e comerciais leves.

2.3 Demanda de etanol

Com as premissas da seção 2.2, calculamos a demanda de etanol para as três trajetórias de eletrificação, separada por tipo de veículo (Figura 8; a série completa, ano a ano, está no repositório do modelo).

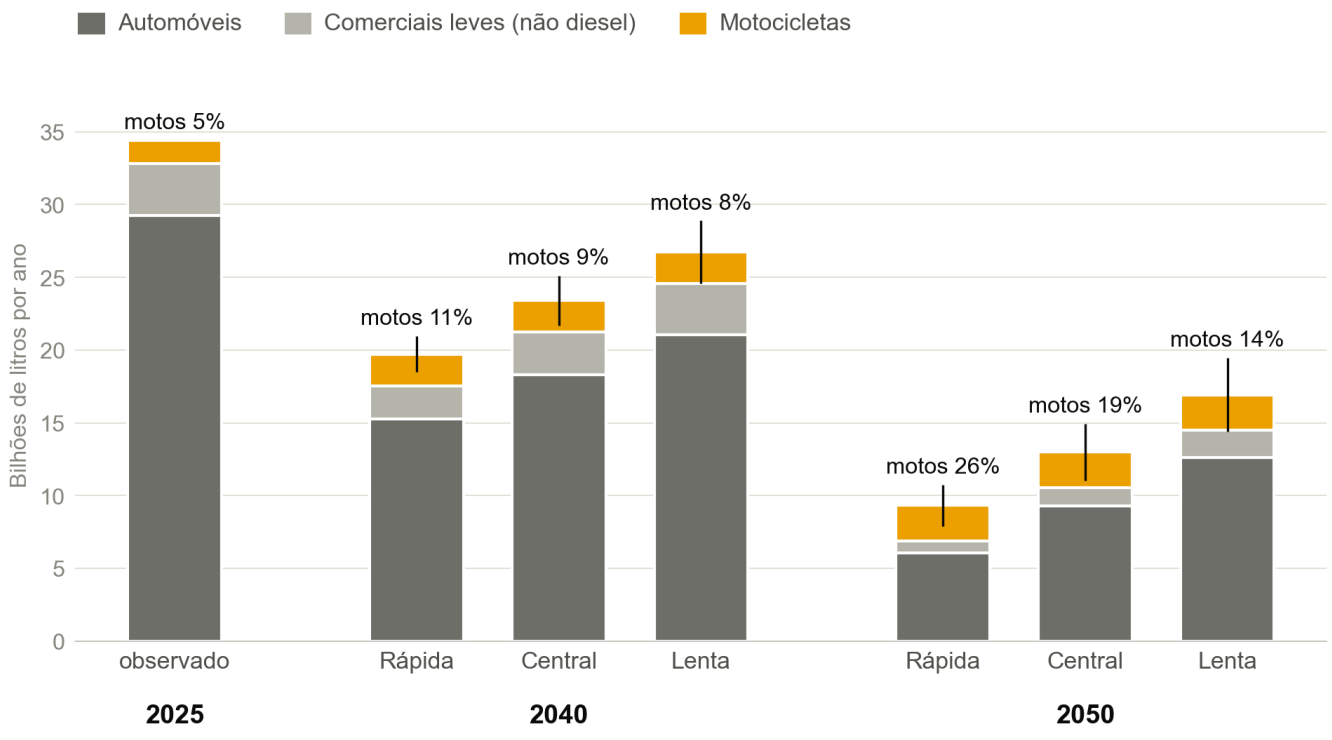


Figura 8. Consumo de etanol de automóveis, comerciais leves e motocicletas, bilhões de litros por ano (hidratado + anidro, mistura E32)

Fonte: elaboração dos autores; base de 2025 a partir de Samora (2026), dividida entre automóveis, comerciais leves e motocicletas segundo as participações de MMA e MT (2025). Os comerciais leves a diesel não consomem etanol e ficam fora.

Nota: barras, meio da faixa entre os seis cenários de frota; traços, faixa do total; rótulos, participação das motocicletas no etanol consumido.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

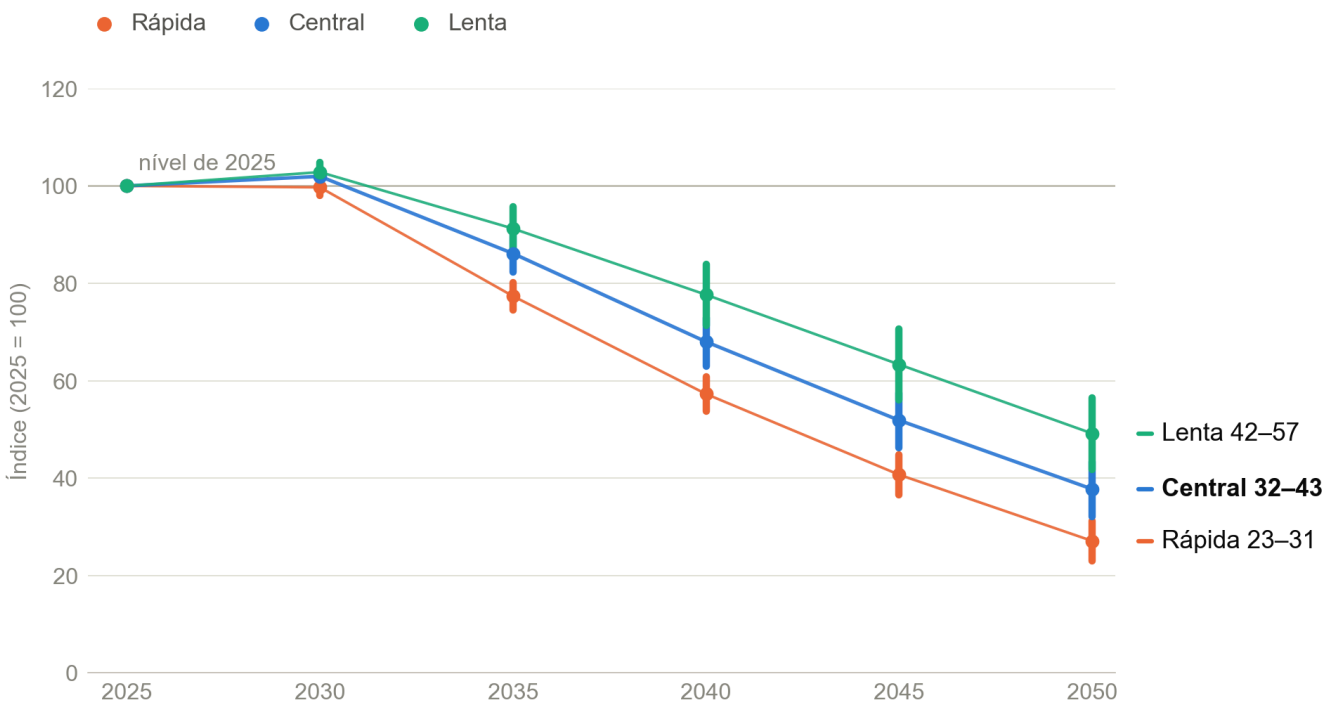


Figura 9. Demanda brasileira de etanol de automóveis, comerciais leves e motocicletas, índice 2025 = 100, com a faixa entre os cenários de frota

Fonte: elaboração dos autores.

Nota: pontos, meio da faixa; traços verticais, faixa entre os seis cenários de frota; rótulos à direita, faixa em 2050.

Até 2030, a demanda varia pouco em qualquer trajetória (entre 98 e 105, índice 2025 = 100; Figura 9), porque a frota existente predomina: os elétricos vendidos até lá ainda são uma fração pequena do estoque. Em setembro de 2026, os eletrificados vendidos no país desde 2012 chegaram a 1 milhão de unidades, pouco mais de 2% da frota de leves, embora já respondessem por cerca de 20% das vendas do mês (ABVE, 2026c). O atraso entre vendas e frota é grande: em 2040, quando se pressupõe que 68% das vendas já serão elétricas, os elétricos serão cerca de um terço da frota de leves, e a metade da frota só chega por volta de 2046 (Figura 4). Depois de 2030, a queda se acelera, e as trajetórias diferem sobretudo no momento em que ela ocorre. Em todos os cenários, os produtores de etanol (usinas) perdem volume no mercado de veículos leves; o que varia é quando.

Em 2040, a demanda projetada de etanol estará entre 54% e 84% do volume atual; em 2050, entre 23% e 57% (Figura 9).

O tamanho da frota pesa pouco nesse resultado. Em 2040, para uma mesma frota, a escolha da trajetória de eletrificação desloca a demanda em 18 a 23 pontos de índice (da rápida para a lenta); para uma mesma trajetória (a central), os seis cenários de frota e renda a deslocam em 10 pontos (de 63 a 73). O envelope conjunto vai de 54 a 84. O ritmo da eletrificação, e não o crescimento da frota, decide o volume que as usinas perderão.

As motocicletas, que hoje representam uma parcela pequena do consumo de etanol, funcionam como um piso para a demanda. Sem eletrificação, seu consumo cresce de 1,6 para 2,0–2,9 bilhões de litros até 2050, e sua fatia no etanol consumido nas ruas sobe de 5% em 2025 para 14% a 26% em 2050, conforme a trajetória (meio das faixas entre cenários de frota; extremos de 14% e 27%). Na trajetória rápida, cerca de um quarto do etanol de 2050 iria para o tanque de motos. Se o segmento vier a se eletrificar, o que é plausível, esse piso será menor (seção 2.5).

O mecanismo proposto (emplacamento → frota → demanda de combustível) é realista, como mostra um exemplo recente em grande escala. Na China, a Sinopec projetava, antes do choque de petróleo provocado pela crise do estreito de Ormuz em 2026, queda de 5% no consumo de gasolina e de 6% no de diesel no ano; a frota elétrica, leve e pesada, cresceu 33% em doze meses e evitou cerca de 36 milhões de toneladas equivalentes de petróleo no primeiro semestre (MYLLYVIRTA, 2026).

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

2.4 O efeito do híbrido-flex na demanda

A aposta defensiva do setor sucroenergético é o híbrido-flex, que ainda queima etanol. Para medi-la, é preciso separar dois efeitos. O primeiro é o da hibridização em si: contra um mundo em que toda venda eletrificada fosse de elétricos puros, os híbridos (plugáveis e não plugáveis, flex ou não) preservam de 6,5 a 8,4 pontos de demanda (índice 2025 = 100) em 2040 na trajetória central, de 8,7 a 11,3 na lenta e de 4,3 a 5,4 na rápida, sobretudo porque continuam a queimar o anidro da gasolina C. O segundo é o do motor flex dentro do híbrido: se todos os híbridos não plugáveis vendidos fossem a gasolina, a demanda de 2040 cairia apenas 0,9 a 1,2 ponto na trajetória central; se todos fossem flex, subiria 0,7 a 0,9 ponto. Cada ponto de índice equivale a cerca de 0,34 bilhão de litros. O que sustenta a demanda, portanto, não é o flex dentro do híbrido, mas a permanência de um motor a combustão na frota.

O efeito precisa de tempo e de uma categoria a combustão significativa sobre a qual atuar; na trajetória rápida, essa categoria desaparece antes que o efeito apareça. Some-se que um híbrido-flex consome cerca de três quartos do combustível por quilômetro do flex que substitui (MERA et al., 2023). Defender o motor flex dentro do híbrido é apenas uma aposta num ritmo de transição lento, sem, no entanto, proteger contra a transição em si.

O efeito é ainda mais frágil do que os coeficientes fixos sugerem. Na China, no segundo trimestre de 2026, o petróleo deslocado por veículos elétricos cresceu quase o dobro do que o aumento da frota explicaria, porque o carregamento subiu 60% e os motoristas de híbridos plugáveis passaram a rodar em eletricidade (MYLLYVIRTA, 2026). No veículo plugável, a fração de combustível queimada depende essencialmente do comportamento do consumidor. O paralelo com o flex é direto: a fração de etanol é uma decisão tomada na bomba, refeita a cada abastecimento. Em ambos os casos, o híbrido só sustenta a demanda de etanol se o etanol estiver relativamente mais barato (em relação à eletricidade ou à gasolina) — isto é, se a usina vender barato. A estratégia para garantir uma sobrevida do volume traz embutido um compromisso com o preço baixo.

2.5 Robustez do resultado: rodagem, preço, motocicletas e baterias

Três simplificações do modelo poderiam, em princípio, inverter o diagnóstico. A Figura 10 testa cada uma, isoladamente e combinadas.

Rodagem por idade. O caso-base supõe a mesma rodagem anual para veículos de qualquer idade. Como carros novos rodam mais que os antigos, e os elétricos são a parte nova da frota, isso subestima a velocidade da queda. Ponderando o estoque de cada safra pela curva de intensidade de uso do Inventário Nacional, de queda linear de 600 km/ano por ano de idade (MMA, 2014, como aplicada por MERA et al., 2023, que somam 288 mil km em 22 anos; o primeiro ano fica em cerca de 19,4 mil km, com piso de 6 mil km), os elétricos, que são 37% a 40% da frota não diesel de leves em 2040, passam a responder por 44% a 46% dos quilômetros rodados. A demanda de 2040 cai mais 1,9 a 2,3 bilhões de litros (6 a 7 pontos de índice), e o excedente central de 2040 sobe para 19,6 a 23,4 bilhões. Com a curva paulistana da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2014) para automóveis flex, bem mais plana (17,2 mil km no primeiro ano e 15 mil a partir do oitavo), o efeito é de apenas 0,3 bilhão de litros. Nos dois casos, o caso-base é conservador.

Preço na bomba. O balanço mantém a divisão entre hidratado e gasolina C da frota flex observada em 2025. Um excedente, porém, derruba o preço do etanol, e o motorista do flex troca de combustível — o mitigador mais antigo e mais rápido do setor. Cada 10 pontos percentuais a mais de hidratado na energia consumida pela frota flex absorvem 6,5 bilhões de litros hoje, 4,6 a 4,9 bilhões em 2035 e 3,3 a 3,7 bilhões em 2040: o amortecedor encolhe com a frota que o aciona. Para zerar o excedente central só pelo preço, o hidratado teria de responder por 50% a 58% da energia flex em 2035 e por 73% a 89% em 2040, contra 25% em 2025 e um máximo recente de 30% da energia do ciclo Otto em 2019, ano em que a relação de preços entre hidratado e gasolina ficou abaixo de 70% o tempo todo (ANP, 2020). Voltar ao patamar de 2019 absorveria 2,3 a 2,5 bilhões de litros em 2035 e 1,6 a 1,9 bilhão em 2040. O preço é, portanto, um quarto mitigador, ao lado dos três examinados na seção 3.1, real até 2035, mas que transfere o problema da conta de volume para a margem da usina.

Motocicletas. Se as vendas de motos elétricas seguirem a trajetória lenta dos automóveis com cinco anos de atraso, a fatia das motos no etanol de 2050 cai de 14%–27% para 7%–16%, e a demanda de 2050 encolhe mais 1,0 a 1,5 bilhão de litros; com metade da trajetória lenta, 0,6 a 0,9 bilhão. Em 2040, o efeito ainda é pequeno (0,3 a 0,4 bilhão), porque as motos em circulação até lá foram, na maior parte, vendidas a combustão.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

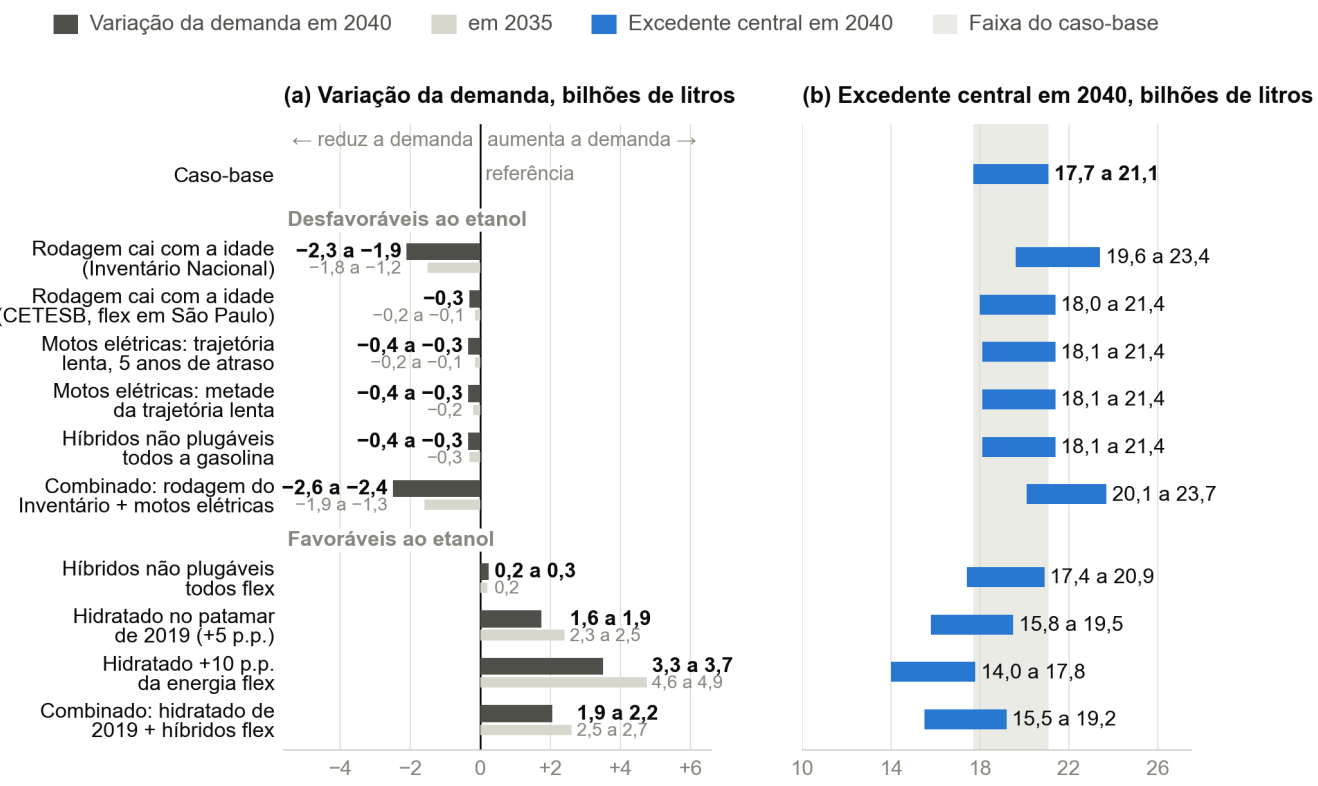


Figura 10. Robustez da demanda e do excedente de etanol aos testes de sensibilidade, trajetória central

Fonte: elaboração dos autores (repositório do modelo, script sensibilidades_figura10.py).

Nota: (a) variação da demanda de etanol em relação ao caso-base; barras, meio da faixa entre os seis cenários de frota; rótulos, a faixa (2040 em negrito; 2035 em cinza). (b) excedente central de 2040; barras e rótulos, faixa entre os seis cenários; fundo cinza, faixa do caso-base. Os testes de hidratado medem a participação do etanol hidratado na energia consumida pela frota flex (p.p., pontos percentuais).

No pior teste, o excedente central de 2040 ainda é de 14 bilhões de litros. As simplificações testadas não invertem o diagnóstico; o que mais move o resultado é o ritmo da eletrificação e, do lado da oferta, os mitigadores da seção 3.1, que a Figura 10 não inclui.

Durabilidade das baterias. Uma objeção de outra natureza é que a adoção perca fôlego quando a frota elétrica envelhecer: a bateria perde capacidade, a autonomia cai, a troca é cara em relação ao valor do carro e o usado desvaloriza. Os dados de campo indicam degradação menor do que se temia. Com telemetria de mais de 22,7 mil veículos de 21 modelos, a Geotab mede perda média de 2,3% da capacidade por ano, o que deixa cerca de 82% da capacidade original após oito anos, e estima vida útil de 13 anos ou mais para a bateria (ARGUE, 2026). A Tesla registra de 85% a 88% da capacidade após 200 mil milhas, cerca de 320 mil km (INSIDEEVS, 2024). Parte da diferença em relação ao que se temia vem do próprio método: garantias e projeções se apoiam em ensaios de laboratório com corrente constante, e, em células comerciais de níquel ensaiadas por dois anos a 35 °C, com a mesma corrente média e a mesma janela de tensão, perfis de descarga que imitam a direção real elevam em até 38% o número de ciclos completos equivalentes até o fim da vida útil (GESLIN et al., 2025). A má fama vem em boa parte da primeira geração do Nissan Leaf, cujo pacote, refrigerado passivamente a ar e sem controle térmico líquido, degradava depressa no calor (RECURRENT, 2026). Quanto ao valor dos usados, o índice IBV Auto aponta perda média de 46% para os elétricos lançados em 2023 até junho de 2026, contra 26% dos híbridos, e a atribui à queda de preço dos carros novos e à concorrência entre montadoras (ZERBINATO, 2026). Comparar o usado com o novo da mesma versão, na mesma data, desconta essa queda: na tabela da Fipe de outubro de 2026, o BYD Dolphin 2024 vale 20% menos que o 0 km da mesma versão (R$ 117,6 mil contra R$ 147,1 mil), e o Dolphin Mini 2024, 17% menos, diferenças que não são maiores que as dos hatches flex do mesmo ano-modelo, de 21% a 32% para versões de Polo, Onix, Argo e HB20 (FIPE, 2026). É uma referência descritiva, e não a perda do proprietário desde a compra: não permite isolar um eventual desconto associado à bateria, que pode coexistir com efeitos de garantia, equipamento, oferta de usados e concorrência.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

A incerteza que resta é a idade. O carro brasileiro roda em média 19 anos (seção 2.2.2), mais que a vida estimada pela Geotab para a bateria, e não há dados de campo de baterias atuais com essa idade. Para o veículo inteiro, porém, a evidência já chega perto desse horizonte. Com quase 300 milhões de registros da inspeção veicular anual da Grã-Bretanha, de 2005 a 2022, Nguyen-Tien et al. (2025) estimam vida mediana de 18,4 anos para os elétricos puros, contra 18,7 anos dos carros a gasolina e 16,8 dos a diesel, e cerca de 200 mil km rodados na vida toda, mais que os carros a gasolina; a cada ano-modelo, o risco de o elétrico sair de circulação cai 12%, contra 6,7% no carro a gasolina. Os autores ressalvam que as primeiras gerações eram menos confiáveis e que os elétricos da amostra (41,6 mil) ainda estão no começo da curva de adoção. Na China, dados de seguro de 2018 a 2020, que cobrem sobretudo essas primeiras gerações, ainda indicavam vida média menor para os elétricos puros que para os carros a combustão (YU et al., 2022). Dois fatores atenuam o risco no Brasil: os modelos chineses que lideram as vendas no país usam majoritariamente baterias de fosfato de ferro-lítio (LFP), que tendem a suportar mais ciclos que as de níquel e, em ensaios com células comerciais de grande formato, se mostraram menos sensíveis à temperatura que as de níquel (GASPER et al., 2023), vantagem relativa num país quente, onde o calor acelera a degradação de todas as químicas (cerca de 0,4 ponto percentual a mais por ano, segundo a Geotab; ARGUE, 2026); e a quilometragem de toda a vida de um carro brasileiro, cerca de 290 mil km pela curva do Inventário Nacional, é menor que a da medição da Tesla. Os dados de campo da LFP chinesa ainda são poucos e vêm de clima frio, mas são favoráveis: em 9.954 testes de baterias de carros usados na Suécia, o Tesla Model 3 com células LFP da CATL mantinha 93,3% da capacidade após 100 mil km, contra 88,2% a 91,5% das versões com baterias de níquel (ELECTRIVE, 2026). Para a bateria Blade, da BYD, que equipa os elétricos mais vendidos no Brasil, ainda não há dados de frota publicados; o indicador disponível é a garantia europeia, de oito anos ou 250 mil km com ao menos 70% da capacidade (BYD, 2026). Se aparecer, é de esperar que o efeito recaia mais sobre o valor de revenda do que sobre a velocidade de adoção, hipótese que os dados ainda não permitem testar. Se, ainda assim, a percepção de risco frear o elétrico puro, o espaço vai para o híbrido, cuja bateria é pequena e cujo motor a combustão garante a autonomia; o modelo já o inclui (seção 2.4), e o caso extremo, com o híbrido-flex no lugar do elétrico, está na seção 3.3.

2.6 Contraste com o planejamento oficial (PDE 2035)

O Plano Decenal de Expansão de Energia 2035 parte de outra leitura. Seu caderno de eletromobilidade projeta que os eletrificados (elétricos puros, plugáveis, híbridos e micro-híbridos) chegarão a 23% dos licenciamentos de leves em 2035 (784 mil unidades), com frota de 3,7 milhões, cerca de 8% do total, e o flex ainda em 76% da frota (MME; EPE, 2025b). O caderno de oferta de biocombustíveis projeta para 2035 demanda total de 48,2 bilhões de litros de etanol e oferta de cerca de 51 bilhões, com saldo positivo em todo o horizonte. Dos 48,2 bilhões, 46,2 são etanol combustível do transporte rodoviário (33,5 bilhões de hidratado e 12,7 bilhões de anidro), e os 2,0 bilhões restantes vão para combustível de aviação, navegação e usos não energéticos; a exportação fica fora da conta (MME; EPE, 2025a). A nota técnica de demanda dos veículos leves chega aos mesmos 33,5 e 12,7 bilhões de litros, sobre um consumo do ciclo Otto de 66,2 bilhões de litros de gasolina equivalente e com a mistura mantida em 30% (EPE, 2026a).

Os dados de 2026 já alcançaram a premissa: em julho de 2026, os eletrificados chegaram a 21% dos emplacamentos de leves, perto dos 23% que o PDE previa para 2035, e os elétricos puros sozinhos, a 9,4% no terceiro trimestre. A Figura 11 marca os números do PDE. Em 2035, a demanda rodoviária do PDE, de 46,2 bilhões de litros, fica 15 a 18 bilhões acima da trajetória central deste modelo (28,3 a 31,0 bilhões). A comparação inclui as motocicletas dos dois lados, porque o consumo do ciclo Otto do PDE em 2025 (62,1 bilhões de litros de gasolina equivalente) já corresponde a todo o volume vendido pelas distribuidoras. O hiato se decompõe assim (repositório do modelo, script pde_hiato.py):

- **eletrificação:** 5,6 a 7,1 bilhões de litros. Mesmo com a participação dos elétricos e dos híbridos nas vendas congelada no nível de 2026, o modelo dá 34 a 38 bilhões de litros em 2035, e não 46;
- **preço na bomba:** cerca de 9 bilhões, a maior parte do hiato, da hipótese de que o hidratado passe de 25% para 36% da energia do ciclo Otto, patamar acima do máximo de 2019 e que só se sustenta com etanol barato;
- **consumo de energia e mistura:** pouco, e em sentidos opostos. Com a eletrificação congelada, o consumo do ciclo Otto deste modelo (59 a 67 bilhões de litros de gasolina equivalente) fica perto dos 66 bilhões do PDE, diferença que vale de −0,5 a 3,8 bilhões de litros de etanol; a mistura, que o PDE mantém em 30%, e não em

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

32%, tira outros 0,8 bilhão.

O PDE fecha o balanço supondo, ao mesmo tempo, eletrificação lenta e, sobretudo, etanol competitivo na bomba. Os emplacamentos de 2026 já contradizem a primeira hipótese; a segunda é o mitigador de preço da seção 2.5, que existe, mas encolhe com a frota flex e é pago com a margem do produtor. Recomendamos que o próximo ciclo do PDE incorpore trajetórias de eletrificação calibradas em análogos internacionais e explicite a relação de preços entre hidratado e gasolina implícita na projeção de demanda.

3 Oferta futura

Enquanto a demanda futura se decide nos emplacamentos, a oferta futura está em boa parte decidida. Em 2017/18, o Brasil produziu cerca de meio bilhão de litros de etanol de milho; em 2025/26, 10,17 bilhões, com crescimento composto acima de 30% ao ano desde 2020, período em que a produção de cana ficou estagnada (CONAB, 2026; UNEM, 2026); o milho já responde por mais de um quarto da produção nacional (UNEM, 2025). A União Nacional do Etanol de Milho (UNEM) contava 25 biorrefinarias em operação em fevereiro de 2026, cerca de 33 até o fim do ano e 20 estudos em análise, e estima que o país possa dobrar a produção até 2032, para algo próximo de 20 bilhões de litros (UNEM, 2026). Em 2024, a Inpasa produziu 3,7 bilhões de litros, contra 3,1 bilhões da Raízen, e tornou-se a maior produtora de etanol do país (NEOFEED, 2025). Está investindo R$ 2,77 bilhões em uma unidade de 1 bilhão de litros em Rondonópolis (MT), com início da operação previsto para o primeiro trimestre de 2027 (INPASA, 2025). Nem toda a expansão tem o mesmo grau de compromisso: as plantas em construção estão financiadas; os estudos em análise, não.

A expansão do milho não é um erro: sua segunda safra é a colheita que a logística não escoa e a armazenagem não comporta. O etanol foi a resposta racional de produtores e investidores a um excedente agrícola, a mesma resposta que a cana deu em 1931. E o próprio setor de milho reconhece o limite: a UNEM projeta para 2026/27 uma adição de oferta de 10% a 12% em um único ciclo, contra crescimento de consumo de cerca de 2%, e resume o dilema dizendo que o setor pode ser grande demais para o mercado atual no curto prazo e ainda pequeno demais para navegação e aviação (UNEM, 2026).

O que existe, portanto:

- o centro de gravidade da expansão do etanol brasileiro deslocou-se da cana paulista para o milho do Centro-Oeste;
- parte do deslocamento está financiada e em execução, e parte depende de projetos ainda em estudo.

A Figura 11 confronta as duas curvas. A oferta supõe cana estável em 27,3 bilhões de litros e milho subindo em linha reta de 10 para 20 bilhões até 2032, o que leva a oferta de 37,3 para 47,3 bilhões de litros. É um cenário de expansão baseado na projeção da UNEM, e não um inventário de capacidade contratada; se só metade da expansão se realizar, com o milho em 15 bilhões de litros, o excedente cai 5 bilhões (Figura 12). A demanda de automóveis, comerciais leves e motocicletas parte de 34,4 bilhões em 2025 (vendas das distribuidoras; SAMORA, 2026), incorpora a mistura E32 e segue a Figura 8. Os demais usos — exportação, usos não carburantes (bebidas, cosméticos, farmacêutica e química, inclusive o eteno verde) e variação de estoques — somam 3,0 bilhões de litros em 2025. Esse valor é obtido por diferença, para que o balanço do ano-base feche (−0,1 bilhão de litros, diferença que cabe na variação de estoques entre o ano-safra e o ano civil e no arredondamento da safra de 2025/26 para 27,3 bilhões de litros de cana e 10,0 de milho), e é coerente com os dados disponíveis: as exportações foram de 1,6 bilhão de litros em 2025 (DATAGRO, 2026), e o restante, cerca de 1,4 bilhão, cobre os usos industriais e os estoques. Os demais usos são, portanto, uma hipótese agregada do cenário, e não uma estimativa observada de cada componente. Os demais usos crescem em linha reta até 4,5 bilhões em 2040 e ficam constantes depois; o acréscimo de 1,5 bilhão corresponde ao combustível de aviação (cerca de 1 bilhão em 2040, seção 3.1) e à química. O excedente — oferta menos demanda veicular e demais usos — sobe de 5 a 7 bilhões de litros por ano em 2030 para 10 a 18 bilhões em 2035, 14 a 24 bilhões em 2040 e 23 a 35 bilhões em 2050.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

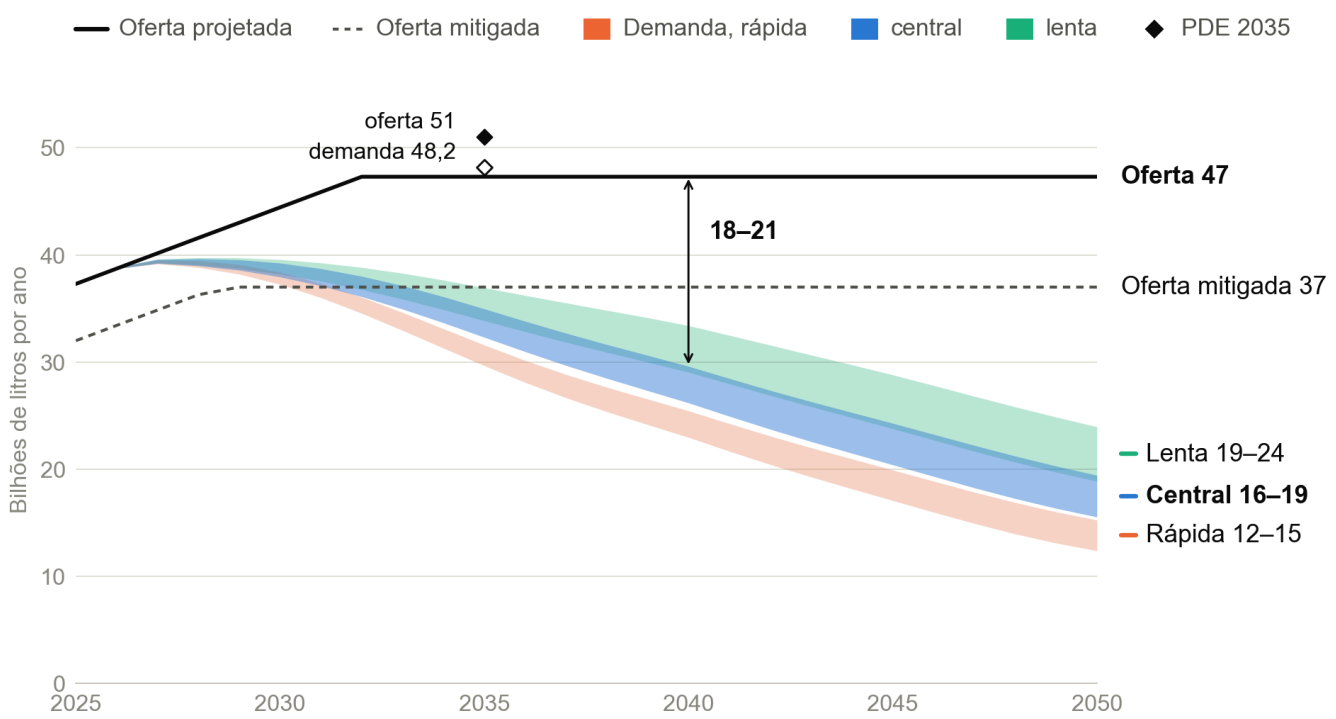


Figura 11. Balanço de oferta e demanda de etanol, 2025–2050, bilhões de litros por ano

Fonte: elaboração dos autores. Cana: Conab (2026); milho: UNEM (2026); E32: ANP (2026); PDE 2035: MME e EPE (2025a). A linha tracejada mostra a oferta com os dois mitigadores de oferta acionados (mix de 60% para açúcar, −5,3 bilhões de litros, e expansão do milho limitada a 15 bilhões, −5,0 bilhões): 37 bilhões a partir de 2029.

Nota: as faixas somam a demanda dos veículos (mistura E32) e os demais usos, entre os seis cenários de frota e renda. Losangos: oferta (51 bilhões de litros) e demanda total (48,2 bilhões, com aviação, navegação e usos não energéticos e sem exportação) do PDE 2035. Seta: excedente central de 2040.

3.1 Fatores de mitigação

Do lado da oferta, esse balanço é um limite superior, porque a trata como inelástica. Ela tem flexibilidade, e o mercado tem quatro mitigadores:

- **o mix açúcar–etanol** da própria usina, que em 2025/26 ficou em 50,4% para açúcar no Centro-Sul (UNICA, 2026) e que já desviou sacarose para o adoçante quando o etanol perdeu preço;
- **o preço ao produtor**, que desacelera a expansão do milho;
- **a mistura à gasolina**, com três pontos percentuais ainda disponíveis até o teto de 35% (seção 3.2);
- **o preço na bomba**, que leva o motorista do flex a trocar gasolina por hidratado (seção 2.5).

A Figura 12 mede os três primeiros sobre a trajetória central e compara com o efeito de abrir novos destinos para o etanol (seção 4.1).

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

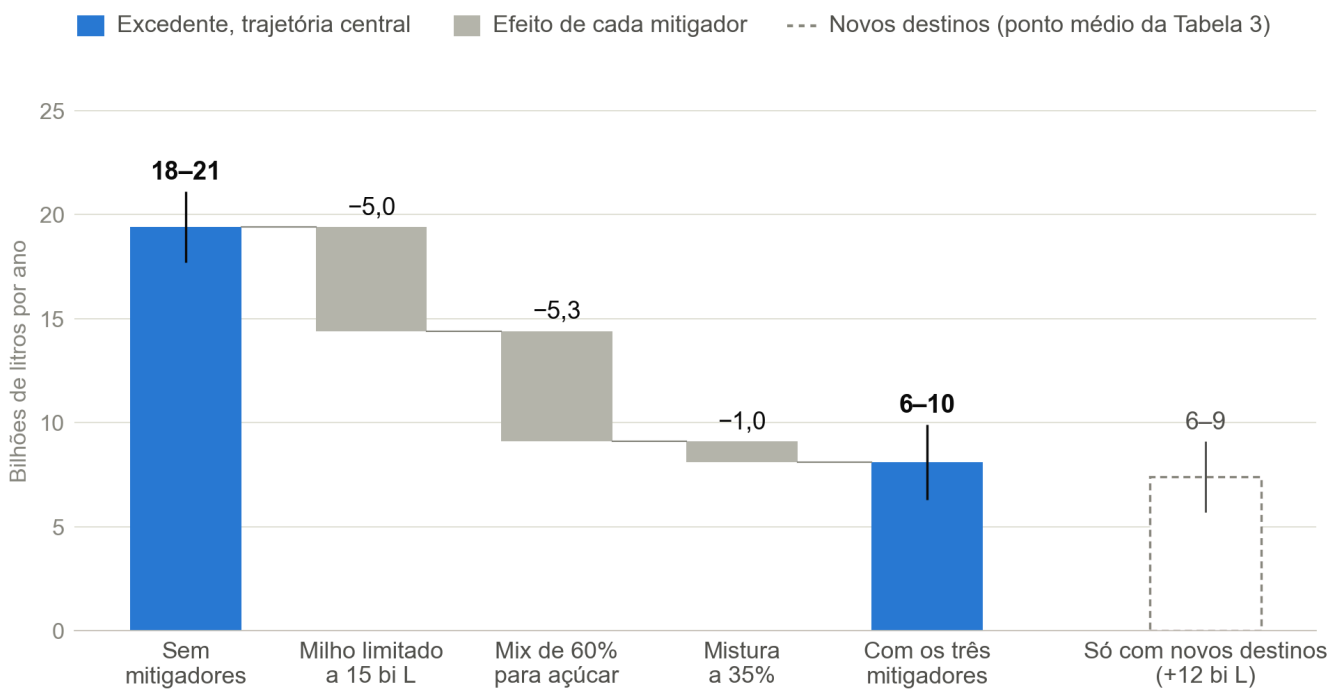


Figura 12. Efeito dos fatores de mitigação e dos novos destinos sobre o excedente central de 2040, bilhões de litros por ano

Fonte: elaboração dos autores.

Nota: barras, meio da faixa entre os seis cenários de frota; traços, faixa entre os cenários. A barra tracejada supõe que os novos destinos da Tabela 3 (seção 4.1) — combustíveis para navegação e aviação, diesel renovável, química e exportação certificada — absorvam juntos 12 bilhões de litros adicionais por ano, ponto médio da faixa de 6 a 18 bilhões, usado como cenário intermediário ilustrativo, e não como estimativa central. No extremo inferior da faixa, o excedente central de 2040 ficaria em 12 a 15 bilhões de litros; no superior, em 0 a 3 bilhões. Nenhum desses destinos está contratado.

Os três mitigadores de volume atrasam o problema em sete a nove anos. Acionados juntos, absorvem a maior parte do excedente de 2035, restando de 1 a 4 bilhões de litros. Em 2040, absorvem pouco mais da metade: mesmo com o mix em 60%, o milho freado e a mistura no teto, restam de 6 a 10 bilhões de litros por ano, contra 18 a 21 bilhões sem eles. Na trajetória lenta, o milho limitado e o mix de 60% absorvem quase todo o excedente de 2035 (restam de 0,1 a 3,1 bilhões de litros), mas não o de 2040 (restam de 3,6 a 7,9 bilhões). O quarto mitigador, o preço na bomba, absorve outros 2 a 5 bilhões em 2035, mas só 2 a 4 bilhões em 2040 (faixa dos testes de +5 e +10 pontos percentuais da Figura 10), e cobra da margem do produtor (seção 2.5). Somados os quatro, com o hidratado de volta ao patamar de 2019, o balanço central de 2035 se aproxima do equilíbrio (de −1,7 a 1,2 bilhão de litros), mas o excedente de 2040 fica em 4,4 a 8,2 bilhões; com eletrificação lenta, em 0,2 a 5,0 bilhões, e, com o hidratado 10 pontos acima do patamar de 2025, além do máximo histórico, de −2,0 a 3,2. Só a combinação de todos os mitigadores, no limite, com eletrificação lenta, aproxima o balanço de 2040 do equilíbrio. A soma é aditiva e não modela as interações entre mistura, preço e oferta (Apêndice A.9). E cada mitigador tem custo:

- o mix a 60% só funciona se o mercado mundial de açúcar absorver cerca de 8 milhões de toneladas adicionais do Brasil, o que ficaria mais difícil se a redução no consumo de doces e lanches observada entre usuários de medicamentos agonistas do peptídeo semelhante ao glucagon 1 (GLP-1) nos Estados Unidos (HRISTAKEVA; LIAUKONYTE; FELER, 2026) se generalizar. No curto prazo, porém, o mercado ajuda: a Green Pool elevou para 6,28 milhões de toneladas o déficit mundial projetado, com a safra do Centro-Sul abaixo do previsto e o açúcar bruto no maior preço em 19 meses (TEIXEIRA, 2026);
- o freio no milho é um freio no investimento do Centro-Oeste e na oferta de ração;
- o E35 exige testes de durabilidade e esgota o instrumento;
- o etanol barato na bomba transfere o excedente para a margem da usina.

O freio no milho também é menos automático do que a Figura 12 sugere. Grãos secos de destilaria (DDG) e óleo de milho podem responder por até 25% da receita do processamento, de modo que margens positivas nos coprodutos sustentem a expansão mesmo quando o etanol perde preço (EPE, 2025). Cada bilhão de litros de etanol de milho

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

coproduz cerca de 0,5 milhão de toneladas de DDG (4,83 milhões de toneladas para os 9,9 bilhões de litros que a UNEM projetava para 2025/26; NOVACANA, 2025a): limitar o milho a 15 bilhões de litros retiraria do mercado cerca de 2,4 milhões de toneladas por ano de ração proteica que hoje sustenta a intensificação da pecuária no Centro-Oeste, com a liberação de pastagens que ela permite. É mais um argumento para redirecionar o amido e o etanol do milho, e não para suprimir a biorrefinaria.

O choque de petróleo provocado pela crise do estreito de Ormuz em 2026 dá ao etanol um alívio de preço e ao CNPE um motivo para aumentar o teor na mistura com gasolina — é o que aconteceu com o E32. Mas a experiência chinesa do mesmo semestre mostra o outro lado: o combustível caro acelerou a eletrificação além do que qualquer projeção previa, e a resposta de política foi tratar o carro elétrico como instrumento de segurança energética (MYLLYVIRTA, 2026). Para o etanol brasileiro, o choque traz alívio por uma safra, mas tende a acelerar a eletrificação ao longo da década. No longo prazo, a pressão se inverte: só a frota elétrica chinesa evitou, no primeiro semestre de 2026, o equivalente a cerca de 1,5 milhão de barris de petróleo por dia (MYLLYVIRTA, 2026), e, quando outros mercados seguirem o mesmo caminho, sobrará petróleo, e gasolina barata concorre com o etanol na bomba. Há, ainda, um valor que o balanço não captura: num choque como o de Ormuz, a capacidade instalada de etanol funciona como reserva estratégica de combustível, que o país aciona elevando a mistura. A matriz de barreiras do IEA Bioenergy Task 39 (grupo de biocombustíveis do programa de bioenergia da Agência Internacional de Energia) propõe tornar a segurança energética objetivo explícito da política de combustíveis, ao lado da redução de emissões (IEA BIOENERGY TASK 39, 2026c). É um argumento para manter capacidade de etanol mesmo quando o balanço de volumes indicar sobra (seção 9).

3.1.1 Novos mercados de combustível

Os novos mercados de combustível mudaram de escala em 2026. Três frentes se destacam.

Navegação. Em outubro de 2026, a Maersk fez o primeiro abastecimento comercial de um navio com etanol: 5 mil toneladas (cerca de 6,3 milhões de litros), fornecidas pela Raízen em Singapura, depois de testes com misturas de 10%, 50% e 100% (RAMOS, 2026). O navio, um porta-contêineres adaptado em 2024 para receber metanol e etanol, mostra que a frota bicombustível a metanol, em vez de barreira, é o canal de entrada: o centro de pesquisa ligado à própria Maersk considera o etanol uma opção *drop-in* promissora para esses motores, com combustão, emissões e compatibilidade de materiais parecidas com as do metanol e cerca de um terço mais energia por litro (MMMC, 2026b). A SCA Brasil estima que 10% do mercado mundial de combustível marítimo, de 250 a 298 bilhões de litros por ano, corresponderiam a cerca de 30 bilhões de litros de etanol (NOVACANA, 2026b); a conta é em volume e, como o etanol tem pouco mais da metade da energia por litro do óleo combustível, 10% da energia exigiria quase o dobro.

O custo favorece o etanol. Ao custo de produção de 2024/25 estimado pelo BTG Pactual, R$ 1,88 por litro no milho e R$ 2,36 na cana (VISÃO AGRO, 2025), a energia do etanol brasileiro sai por US$ 15 a 22 por gigajoule (câmbio de R$ 5 a R$ 6), contra US$ 40 a 80 do metanol de rota elétrica e US$ 39 a 75 da amônia renovável (IRENA; METHANOL INSTITUTE, 2021; IRENA; AEA, 2022).

O risco está na regra. A regulação europeia do combustível marítimo atribui aos biocombustíveis de culturas alimentares, como cana e milho, o fator de emissão do pior combustível fóssil, dispositivo que os produtores europeus de etanol contestam na Justiça (UNIÃO EUROPEIA, 2023b; EPURE, 2024); e a adoção do marco de emissões líquidas zero da Organização Marítima Internacional (IMO), cujas regras de ciclo de vida definirão quanto vale a redução de emissões do etanol, foi adiada em outubro de 2025, por 57 votos a 49, por um ano (DNV, 2025). A rodada de negociação de setembro de 2026 terminou sem acordo, e a retomada da sessão de adoção ficou marcada, sob condição, para 4 de dezembro de 2026, ao fim da 85ª reunião do Comitê de Proteção do Meio Marinho; se os países não aceitarem que as emendas cumpriram o prazo de circulação, a adoção pode ficar para outubro de 2027 (MMMC, 2026a). Há, ainda, uma complementaridade: o metanol de rota elétrica mais barato usa CO_2 biogênico de baixo custo (IRENA; METHANOL INSTITUTE, 2021), exatamente o que a fermentação libera (seção 6.4), de modo que a mesma usina pode vender etanol para navios a metanol e, com o próprio CO_2, metanol de rota elétrica. O tema já é discutido no âmbito do Programa Nacional de Combustível Sustentável de Navegação, e a expansão depende de terminais portuários, adaptação das embarcações e previsibilidade regulatória (NOVACANA, 2026b).

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

Aviação e diesel renovável. O combustível sustentável de aviação (SAF, na sigla em inglês) tem mandato: o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) obriga as companhias aéreas a reduzir as emissões em 1% em 2027 e em 10% em 2037 com o uso de SAF (BRASIL, 2024b), num mercado de querosene da ordem de 7 bilhões de litros por ano. O etanol disputa essa fatia com a rota de óleos e gorduras, que a Petrobras já opera em Duque de Caxias (MACHADO, 2025) e para a qual aprovou investimento de US$ 1,2 bilhão em Cubatão (FIGUEIREDO, 2026); capturando metade de todo o SAF brasileiro, o destino do etanol seria de cerca de 1 bilhão de litros em 2040. O que muda a escala é o diesel, mercado cinco vezes maior que o de querosene de aviação, segundo a JetBio. A JetBio, controlada pelo Summit Agriculture Group, vai investir US$ 2 bilhões em Paulínia (SP) numa planta capaz de converter 1,8 bilhão de litros de etanol por ano em querosene de aviação ou em diesel renovável, conforme a demanda, com tecnologia da Honeywell UOP e etanol de milho da FS (VALIM, 2026); a decisão de investimento está prevista para 2027 e a produção, para 2030 (NOVACANA, 2026a). A Petrobras selecionou a mesma tecnologia para até 10 mil barris por dia de SAF na Replan, também em Paulínia, sujeito a aprovação (S&P GLOBAL, 2026), o que exigiria da ordem de 1 bilhão de litros de etanol por ano. Se os dois projetos saírem do papel, absorverão cerca de 3 bilhões de litros por ano, três vezes o combustível de aviação já incluído nos demais usos do balanço para 2040.

Veículos pesados e máquinas. O modelo trata apenas de automóveis, comerciais leves e motocicletas, mas o diesel do campo e da mineração é outro mercado potencial. Na Agrishow de 2026, a AGCO apresentou um motor a etanol de 200 a 300 cv desenvolvido no Brasil, com cerca de 10 mil horas de testes em cana e grãos e lançamento previsto para 2028 num trator Massey Ferguson; a Valtra, do mesmo grupo, também passa de 10 mil horas de testes; a John Deere valida a versão a etanol do trator 8R; a Case IH testa uma colhedora de cana e um trator a etanol; e a Jacto, pulverizadores (ONDEI, 2026). Na mineração, Cummins, Vale e Komatsu desenvolvem um motor para máquinas pesadas que deve rodar com 70% de etanol e 30% de diesel, com testes de campo previstos para 2026 (RODRIGUES, 2025). São mercados ainda sem escala, e a Tabela 3 não os quantifica; têm, porém, a vantagem de operar perto da oferta, nas próprias usinas e fazendas.

Num cenário favorável, esses mercados, somados à química e à exportação, podem absorver a maior parte do excedente de 2040 (seção 4.1). Não estão, porém, contratados: dependem de regras internacionais, de infraestrutura portuária e de decisões de investimento que o país não controla sozinho. Por isso, abrem a resposta, mas não a esgotam.

3.2 Aumento na mistura

Uma objeção frequente no setor é que o CNPE pode elevar novamente a mistura. A objeção é pertinente, pois foi o que ocorreu duas vezes em doze meses. É um reflexo antigo, documentado na cronologia oficial do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2022): em 1931, diante de açúcar encalhado e preços em colapso, o Decreto nº 19.717 fixou até 5% de álcool na gasolina importada; em 1938, o Decreto-Lei nº 737 estendeu a obrigação a toda a gasolina. Desde então, o teor pendeu nos dois sentidos (entre 1998 e 2015 houve treze mudanças, incluindo cinco reduções entre 2000 e 2011 por escassez de álcool ou alta do açúcar), e nenhuma decorreu de mudança na tecnologia dos motores: o movimento foi sempre político.

As duas últimas mudanças, o E30 em agosto de 2025 e o E32 em agosto de 2026, ocorreram pelos motivos usuais: excedente agrícola (safra de milho recorde) e balança de importação (choque de petróleo). O E32 adiciona cerca de 900 milhões de litros à demanda anual por anidro, e a pergunta para o setor de cana é quem fornece esse volume. O teor da mistura não distingue a origem da molécula: a demanda nova é atendida por quem tem capacidade nova, e a capacidade nova é de milho do Centro-Oeste, já que a de cana está estagnada desde o início da década. É plausível (e propomos verificá-lo com os dados da ANP) que a mistura, defendida pelo setor de cana como proteção, entregue a maior parte da demanda incremental ao milho.

Além disso, o mitigador tem três limites:

- **defende só o anidro:** o hidratado, vendido isoladamente na bomba, fica exposto integralmente à eficiência da frota;
- **tem teto:** com o E32, restam três pontos percentuais até o E35 e, alcançados, a contração passa a agir sem atenuação;

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

- **encolhe com a frota:** à medida que a eletrificação reduz a base de gasolina, cada ponto adicional absorve menos etanol, e o teto chega justamente quando o volume começa a cair.

Novos destinos podem ampliar esse espaço: se os da Tabela 3 absorverem juntos 12 bilhões de litros adicionais por ano — o ponto médio da faixa de 6 a 18 bilhões —, o excedente central cai para 6 a 9 bilhões em 2040 (Figura 12). O mercado externo de mistura é parte disso. Mais de 57 países têm mandatos de mistura de etanol, tipicamente de 5% a 30%, e o cenário de emissões líquidas zero da Agência Internacional de Energia exige multiplicar por 2,5 o consumo mundial de biocombustíveis até 2030 (SOUZA; NOGUEIRA; ROSSETTO, 2025). Os veículos eletrificados já respondem por 42% das vendas mundiais, mas a eletricidade supre só 1,5% da energia do transporte; entre 2000 e 2023, a demanda de energia do transporte cresceu 37 EJ fora da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE), contra 3,7 EJ dentro dela (IEA BIOENERGY TASK 39, 2026a). É nos países em desenvolvimento, com frotas grandes, redes de recarga limitadas e longas distâncias, que os biocombustíveis têm mais espaço para crescer (BNDES; CGEE, 2024; SOUZA; NOGUEIRA; ROSSETTO, 2025). As conclusões do *Industry Hearing* do Task 39, que reuniu 103 respondentes da indústria, da pesquisa e de governos, propõem o mesmo enquadramento em portfólio que este artigo adota: biocombustíveis, eletrificação e eficiência como rotas complementares, combinadas conforme a frota, a rede elétrica e os recursos de cada região (IEA BIOENERGY TASK 39, 2026a; 2026b).

Duas ressalvas, porém. A exportação não está contratada e depende de veículos, bombas e regras de comercialização compatíveis em cada mercado, a mesma barreira que travou os Estados Unidos no E10, a chamada *blend wall* (EIA, 2024); e muitos países querem atender os próprios mandatos com produção local, como a Indonésia, que pretende adotar o E10 em 2027, uma demanda de cerca de 1,4 bilhão de litros por ano, com cooperação técnica brasileira (RINALDI, 2025). Além disso, os compradores também eletrificam, e os emergentes eletrificam depressa: foram os mais rápidos da amostra de 23 países (seção 2.2.3), e na própria Indonésia os elétricos puros passaram de 20% das vendas de leves em 2026 (EMBER, 2026). O argumento da rede elétrica e do território vale com mais força para os países de renda baixa e de grande extensão. Converter mandatos alheios em demanda para o Brasil exige diplomacia comercial, certificação e reconhecimento mútuo de sistemas de contabilidade de carbono, tarefa conjunta do governo e do setor privado (seção 9).

3.3 E se o setor frear a eletrificação?

Uma resposta possível do setor ao excedente é tentar adiar sua causa: imposto mais alto sobre o carro elétrico, incentivo ao híbrido-flex, mistura no teto. A Figura 13 mede essas respostas no mesmo modelo. No freio, os elétricos seguem a trajetória do décimo percentil das 2.000 curvas da seção 2.2.3 e ficam em cerca de 21% das vendas em 2040, como nos mercados em que a adoção estacionou.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

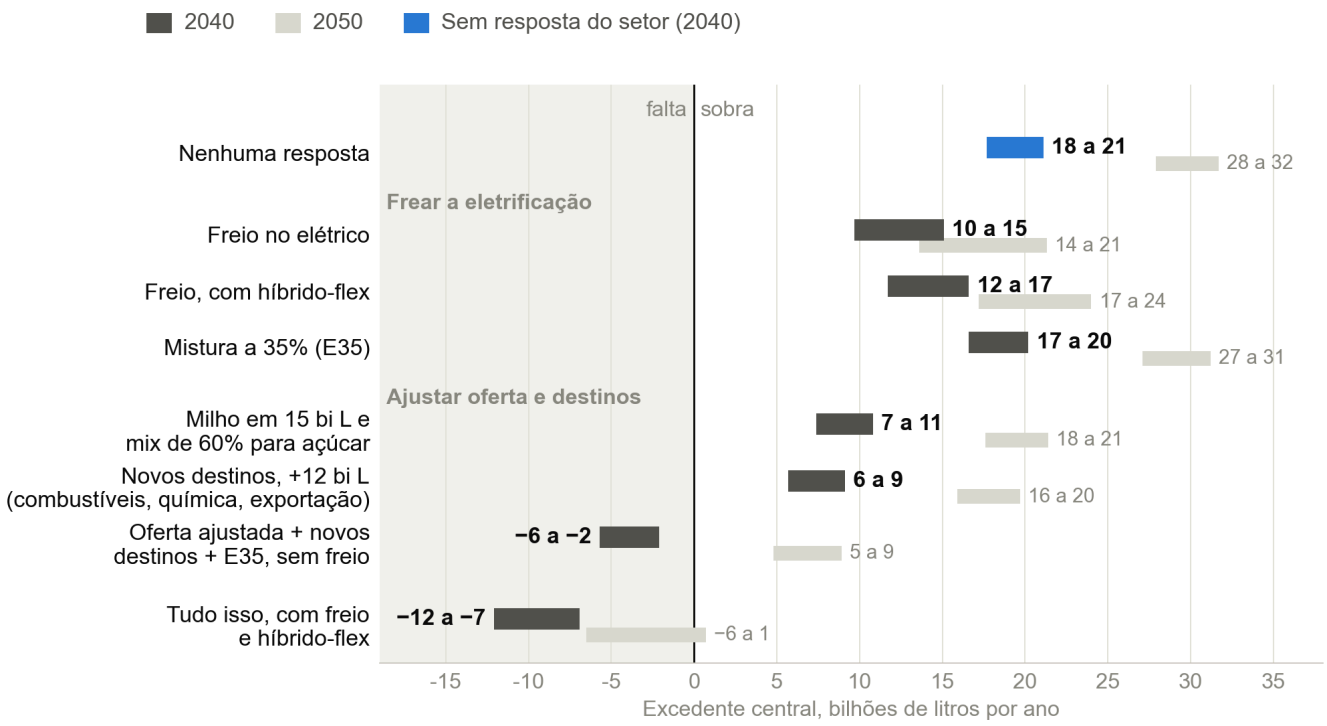


Figura 13. Excedente central de etanol sob respostas do setor, 2040 e 2050, bilhões de litros por ano

Fonte: elaboração dos autores. Freio: elétricos na trajetória do décimo percentil (seção 2.2.3). Híbrido-flex: híbridos chegam a 80% das vendas não elétricas, todos flex. Novos destinos: combustíveis para navegação e aviação, diesel renovável, química e exportação certificada absorvem 12 bilhões de litros adicionais, ponto médio da Tabela 3. Barras escuras: 2040; barras claras: 2050; a extensão de cada barra é a faixa entre os seis cenários de frota. Valores negativos indicam falta de etanol.

Frear a eletrificação não resolve: mesmo com o elétrico estacionado, sobram de 10 a 15 bilhões de litros em 2040. O primeiro excedente vem do milho, e não do carro elétrico; em 2030, a demanda ainda está no nível de 2025, e já sobram de 5 a 7 bilhões de litros. Pôr o híbrido-flex no lugar do elétrico segura menos que o freio puro, porque o híbrido consome cerca de três quartos do combustível do flex que substitui (seção 2.4). Os novos destinos, sozinhos, levam o excedente de 2040 a 6 a 9 bilhões de litros, tanto quanto os três mitigadores de volume juntos. Somados ao ajuste de oferta e à mistura no teto, sem frear o elétrico, faltariam de 2 a 6 bilhões de litros em 2040: se os novos mercados de combustível se confirmarem, o ajuste de oferta pode ser parcial, e o milho não precisa ser freado por inteiro. Em 2050, porém, voltam a sobrar de 5 a 9 bilhões de litros. Somar o freio a todas essas medidas, por outro lado, leva à falta de 7 a 12 bilhões de litros em 2040: etanol caro e carro caro. O freio compra pouco tempo e cobra caro por ele; o tempo que vale a pena comprar é o do ajuste de oferta e dos novos mercados de combustível, que permite construir a rota das moléculas.

Desde 1931, a resposta a todo excedente agrícola foi aumentar a demanda via mistura, para queimar em motores. O programa proposto aqui pede duas coisas novas: levar o etanol a mercados de combustível fora do carro de passeio e tratar o excedente como insumo industrial.

4 Estratégias para excedentes

Antes de ser uma destilaria, uma usina de cana é a colocalização de três ativos:

- açúcar fermentescível entregue na dorna a um dos menores custos de produção do mundo;
- vapor e eletricidade de bagaço a baixo custo durante a safra (o custo de oportunidade é a eletricidade que deixa de ser exportada);
- uma força de trabalho que opera fermentação em escala de milhões de litros há cinco décadas.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

A biorrefinaria de milho reúne ativos análogos, com três diferenças relevantes (seção 5.2): glicose de amido no lugar da sacarose, operação o ano inteiro com grão armazenado e vapor de caldeiras a biomassa comprada (sobretudo cavaco de eucalipto), em vez de bagaço próprio. E acrescenta um quarto ativo: dióxido de carbono concentrado, produto direto da fermentação. O foco deixa de ser "como salvar o etanol" e passa a ser "qual é o uso de maior valor para cada tonelada de carbono biogênico que esta fábrica produz".

A escala física importa. Cada litro de etanol corresponde a cerca de 1,63 kg de sacarose fermentada (com 90% do rendimento teórico), ou 1,55 kg de amido de milho, e libera 0,75 kg de CO_2 na dorna. O excedente de 14 a 24 bilhões de litros de 2040 equivale, portanto, a 23 a 39 milhões de toneladas de açúcar por ano (22 a 37 milhões, se medido em amido) — de cinco a nove vezes toda a produção mundial de polímeros de base biológica, de 4,5 milhões de toneladas (NOVA-INSTITUTE, 2025) —, e a produção atual de 37,5 bilhões de litros libera 28 milhões de toneladas de CO_2 biogênico quase puro por ano. Nenhum mercado de especialidade absorve essa escala, o que obriga a separar as moléculas de alto valor unitário das que absorvem volume (seção 4.2).

É preciso separar ainda dois elementos que o debate costuma confundir. A sacarose (ou a glicose) ainda não passou pela fermentação e pode se transformar em qualquer substância que um microrganismo saiba fabricar. O etanol, já fermentado, só pode ser queimado, exportado ou convertido quimicamente. O excedente da Figura 11 é de etanol; a tese da biomanufatura consome açúcar. São movimentos opostos, e a estratégia precisa de duas etapas. Além do açúcar, a usina tem resíduos, conexão à rede e CO_2 concentrado; a escada da seção 6 usa todos esses ativos, não só a dorna.

4.1 Primeira frente (2026–2040): novos mercados para o etanol que já existe

Não exige tecnologia nova: redireciona um produto para quem paga mais que o tanque de um carro. Todas as rotas já operam, no Brasil ou no exterior, ou têm projeto anunciado no país (Tabela 3).

Tabela 3. Novos destinos para o etanol existente

Destino	Escala plausível em 2040	Prova em operação ou projeto anunciado
Química: etanol → eteno → polietileno	2–4 bi L	Braskem, Triunfo (RS): eteno verde desde 2010, capacidade ampliada a 260 mil t/ano de polietileno, consumindo da ordem de 600 milhões de litros de etanol por ano (BRASKEM, 2010; 2021)
Combustível de aviação e diesel renovável (rota álcool-para-querosene ou diesel)	1–4 bi L	JetBio: US$ 2 bilhões em Paulínia (SP) para converter 1,8 bilhão de litros de etanol por ano em querosene ou diesel, conforme a demanda; decisão de investimento prevista para 2027 e produção a partir de 2030 (VALIM, 2026; NOVACANA, 2026a). Petrobras: tecnologia da Honeywell UOP selecionada para até 10 mil barris/dia na Replan, sujeito a aprovação (S&P GLOBAL, 2026)
Navegação	1–5 bi L	Primeiro abastecimento comercial de navio com etanol: 5 mil t fornecidas pela Raízen à Maersk em Singapura, em outubro de 2026 (RAMOS, 2026); motores bicombustível a metanol aceitam etanol com ajustes limitados (MMMC, 2026b)
Exportação para mistura na gasolina de outros países, com certificação de baixo carbono	2–5 bi L	Mais de 57 países têm mandatos de mistura (SOUZA; NOGUEIRA; ROSSETTO, 2025); mercados com precificação de carbono remuneram a menor intensidade de carbono, e não o volume; a captura do CO_2 de fermentação amplia o prêmio (seção 6.4)
Caminhões e máquinas agrícolas e de mineração	Emergente, não quantificado	Motores a etanol em teste no campo (AGCO, Valtra, John Deere, Case IH e Jacto; ONDEI, 2026); motor de 70% de etanol para máquinas de mineração (Cummins, Vale e Komatsu; RODRIGUES, 2025)
Hidrogênio a partir do etanol	Emergente	Estação experimental na Cidade Universitária da Universidade de São Paulo (USP), com Shell, Raízen, Hytron e o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), em testes desde 2025 (RCGI, 2025)

Fonte: elaboração dos autores.
Nota: as linhas são usos finais que não se sobrepõem: a navegação inclui o abastecimento de navios no exterior, e a exportação conta só o etanol para mistura rodoviária em outros países. As escalas são adicionais aos demais usos do balanço (seção 3), cujo acréscimo de 1,5 bilhão de litros até 2040 já inclui cerca de 1 bilhão de combustível de aviação e 0,5 bilhão de química. Aviação e diesel: o limite inferior equivale a uma das plantas anunciadas em Paulínia, descontado o combustível de aviação já incluído nos demais usos; o superior, às duas plantas (cerca de 3 bilhões de litros por ano) mais uma terceira de porte semelhante até 2040, com o mesmo desconto. Navegação: o limite inferior equivale a cerca de 13% da energia do combustível marítimo vendido no Brasil, estimado pela Associação Brasileira de Bunker (Abrabunker) em 4 milhões de toneladas por ano (ARGUS MEDIA, 2024); o superior, a um sexto do

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

potencial mundial estimado pela SCA Brasil (NOVACANA, 2026b), fração menor que a participação brasileira de cerca de 30% na produção mundial de etanol (SOUZA; NOGUEIRA; ROSSETTO, 2025). Química e exportação também são adicionais: a exportação de 2025 (1,6 bilhão de litros) e a química já existente, como os cerca de 600 milhões de litros de Triunfo, estão nos demais usos.

Somadas, as quatro rotas quantificadas podem absorver de 6 a 18 bilhões de litros por ano em 2040, faixa larga porque três delas dependem de regras e investimentos ainda não decididos. No extremo superior, absorveriam quase todo o excedente central de 2040; no inferior, cerca de um terço. Ganham tempo, geram caixa e curva de aprendizado para financiar o longo prazo e mantêm o ativo de destilação produtivo, em vez de ocioso.

4.2 Segunda frente (2030–2050): mudar o destino do açúcar

A sacarose pode ser fermentada por leveduras para se transformar em etanol, ou por outros microrganismos, em fermentações dedicadas, para virar ácido orgânico (como o ácido láctico, base do bioplástico PLA, que depois é polimerizado), bioplástico acumulado pela própria bactéria (PHA), lipídio microbiano, ativo cosmético ou proteína. A Figura 14 compara esses destinos pela receita bruta potencial por tonelada de açúcar convertida, isto é, o preço do produto multiplicado pelo rendimento mássico da conversão. É uma comparação exploratória de receita, e não de rentabilidade: não desconta recuperação do produto, aeração, nutrientes, efluentes, capital nem a utilização da fábrica, que podem inverter posições, e os preços vêm de regiões, graus e datas diferentes. O etanol combustível fica na base, ao lado dos lipídios microbianos vendidos como óleo comum e abaixo do próprio açúcar (o que ajuda a explicar o mix de 2025/26). O eteno verde fica no nível do açúcar. Ácidos orgânicos, bioplásticos e proteína para ração geram, pelo meio das faixas, de três a sete vezes a receita bruta do etanol combustível por tonelada de sacarose; é esse potencial que cada produto precisa confirmar com rendimento recuperado, pureza, custos e o volume que o mercado absorve ao preço considerado.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

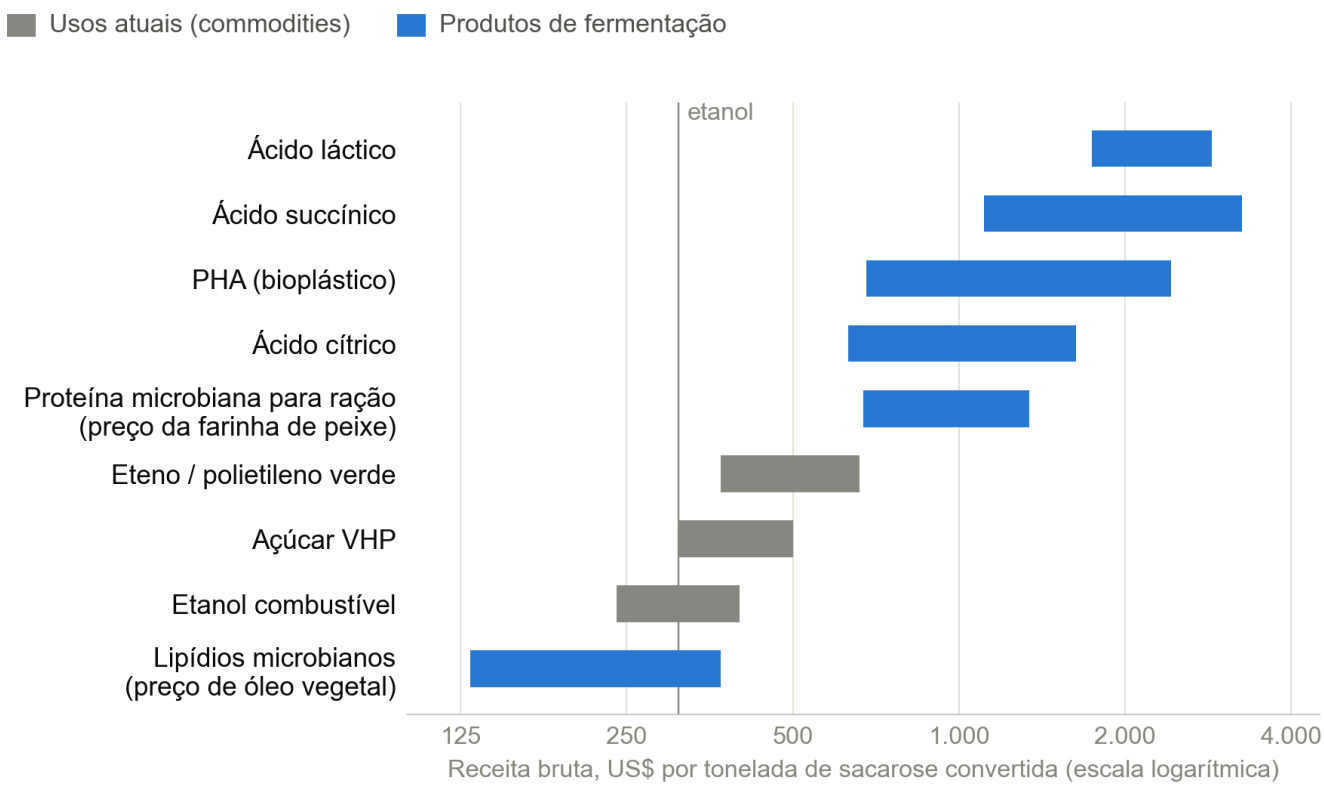


Figura 14. Receita bruta potencial da tonelada de sacarose por uso final, faixas indicativas 2024–2026

Fonte: elaboração dos autores. Preços de 2024–2026: CEPEA (2026a; 2026b), World Bank (2026), IMARC Group (2025; 2026a; 2026b; 2026c; 2026d), Expert Market Research (2026a; 2026b), Businessanalytiq (2026) e Siracusa e Blanco (2020). Rendimentos: UNICA (2025), Max et al. (2010), Fan, Dai e Wu (2013), Xu e Xu (2014), Tian et al. (2021), Kim et al. (1994), Rossell et al. (2001), Andersson et al. (2007), Lee et al. (2016), Bommareddy et al. (2015), Tai e Stephanopoulos (2013), Hoek et al. (2000) e Fonseca et al. (2007). Detalhamento por produto no repositório do modelo (dados/figura14_fontes.csv).

Nota: receita bruta por tonelada de sacarose = preço × rendimento (1 t de sacarose = 1,053 t de açúcares redutores totais); cada faixa vai do menor preço com o menor rendimento ao maior preço com o maior rendimento; no etanol, o limite inferior é o do hidratado e o superior, o do anidro, cada um com o próprio rendimento. Não é uma ordem de margem nem de retorno: os preços são de regiões, graus e datas diferentes, e parte dos rendimentos vem de ensaios de fermentação, e não de produto recuperado em escala comercial. Cinza: usos atuais (commodities); azul: produtos de fermentação; a linha vertical marca o meio da faixa do etanol combustível. O eteno e o polietileno verdes entram como referência de receita por tonelada de sacarose equivalente, pela desidratação do etanol (primeira frente, Tabela 3), e não por fermentação dedicada; o preço é o do polietileno fóssil com prêmio de 30%. A proteína microbiana é avaliada pela paridade com a farinha de peixe, e os lipídios microbianos, pelo preço dos óleos vegetais; como especialidade (ômega-3, por exemplo), valem mais, mas não há preço e rendimento publicados que permitam incluí-los, nem os ativos cosméticos. Para o milho, o custo de oportunidade não é o açúcar bruto de alta polarização (VHP, na sigla em inglês), que a biorrefinaria não produz, e sim o etanol com DDG e óleo, ou o próprio grão.

Valor unitário e volume andam em sentidos opostos. Ativos cosméticos, fragrâncias e ácido succínico têm mercados mundiais de dezenas a poucas centenas de milhares de toneladas por ano: remuneram uma planta, mas não absorvem 23 a 39 milhões de toneladas de açúcar sem derrubar o próprio preço. O volume só cabe em três tipos de destino: polímeros e intermediários de base biológica que substituem petroquímicos de grande escala (o polietileno, alvo do eteno verde, é o maior polímero de uma produção mundial da ordem de 400 milhões de toneladas, da qual os de base biológica são cerca de 1%; NOVA-INSTITUTE, 2025), proteína para nutrição animal e humana e combustíveis de difícil eletrificação. Na proteína, a ordem de grandeza é favorável: a biomassa microbiana rende cerca de 0,5 kg por quilograma de açúcar, perto de 0,3 kg de proteína, e 10 milhões de toneladas de açúcar dariam cerca de 3 milhões de toneladas de proteína, a contida em 6 a 7 milhões de toneladas de farelo de soja. Ao contrário dos ácidos orgânicos, do PLA, do PHA e dos lipídios, feitos só de carbono, hidrogênio e oxigênio, a proteína leva cerca de 16% de nitrogênio: 3 milhões de toneladas exigem perto de 0,5 milhão de toneladas de nitrogênio por ano, que a fermentação não fixa e que viria de amônia ou ureia — uma sinergia possível com amônia de biometano ou de hidrogênio renovável. A estratégia precisa das duas classes: moléculas de alto valor unitário, que podem financiar as primeiras plantas e o aprendizado, e moléculas de volume, que de fato resolvem o excedente na origem.

À medida que essa capacidade entra, menos açúcar vira etanol, e o excedente se resolve na origem. No milho, há um cuidado: o DDG é recuperado depois da destilação, e desviar a glicose antes da fermentação alcoólica o reduz, salvo se a planta fracionar o grão antes (separando gérmen, fibra e proteína) ou se a nova fermentação produzir

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

justamente proteína para ração. A capacidade de destilação que ficar ociosa é a reserva estratégica de combustível da seção 3.1, e o ritmo da segunda frente precisa respeitar a amortização das plantas de milho em construção. A diversificação ganha peso porque os dois destinos tradicionais da sacarose podem perder demanda ao mesmo tempo: o combustível, pela eletrificação, e o açúcar de mesa, se a queda no consumo de doces observada entre usuários de GLP-1 se confirmar em escala (HRISTAKEVA; LIAUKONYTE; FELER, 2026). A estratégia demanda as duas etapas em conjunto. Separadamente, a de curto prazo representaria adiamento, e a de longo prazo criaria um vale de dez anos sem receita.

5 A produção de moléculas

5.1 A analogia

A analogia vem da indústria de semicondutores. A TSMC não inventa os chips que fabrica; é a fábrica sob contrato (*foundry*, no jargão do setor) onde empresas de projeto do mundo inteiro produzem seus desenhos, e captura valor por se especializar em fazer, deixando o risco de produto com os clientes. A vantagem da TSMC é conhecimento de processo. A vantagem brasileira é outra: insumo, utilidades e território. O modelo de negócio é o mesmo, fabricação sob contrato (CDMO, na sigla em inglês para desenvolvimento e fabricação sob contrato, que inclui o escalonamento do processo) colocalizada em usinas e biorrefinarias, em que a usina fornece terreno, utilidades, açúcar ou glicose esterilizável por tubulação (*over-the-fence*), tratamento de efluentes e operação, e o parceiro traz a cepa, o produto e o mercado; a fonte da vantagem é diferente, e isso define onde competir.

A analogia tem um limite de engenharia que precisa ficar explícito. As dornas de etanol de primeira geração operam em regime não estéril: fermentação anaeróbia, com reciclo de levedura e tratamento ácido do fermento (processo Melle-Boinot), em que a contaminação bacteriana é controlada, e não eliminada. A fermentação de precisão com cepas geneticamente modificadas é, na maior parte dos casos, aeróbia e asséptica: exige biorreatores herméticos de aço inoxidável sanitário, esterilização e limpeza no local (SIP/CIP), ar comprimido estéril e controle estrito de contaminação (PEREIRA et al., 2026). As dornas existentes não servem a esses produtos, salvo em rotas anaeróbias robustas (alguns álcoois e ácidos orgânicos). O investimento contratual inclui, portanto, os biorreatores assépticos dedicados e a recuperação do produto; a usina contribui com o que é escasso e caro de replicar — açúcar a custo de produção, vapor e eletricidade renováveis, água, tratamento de efluentes, licença de operação e equipe. A fermentação aeróbia acrescenta ainda uma restrição térmica: libera cerca de 14 MJ de calor por quilograma de oxigênio consumido, que precisam ser removidos a 30–37 °C. Num clima tropical, com a água de resfriamento já perto dessa temperatura, isso exige refrigeração e eletricidade, e a cogeração deixa de ser detalhe para virar vantagem de processo. Os efluentes também mudam: o caldo exaurido de uma fermentação com cepas geneticamente modificadas, com sais, nitrogênio residual e restos celulares, exige inativação e tratamento próprios e não pode ir para a fertirrigação como a vinhaça.

5.2 Onde temos vantagem: dentro e fora do portão

O custo de um produto de fermentação se divide basicamente em:

- matérias-primas, incluída a fonte de carbono, com peso que depende da rota e da pureza: no ácido láctico de milho, respondem por 39% a 44% do custo total, a maior parte pelo grão (MANANDHAR; SHAH, 2020); num estudo de caso de proteína unicelular, só a glicose responde por 36% (GOOD FOOD INSTITUTE, 2025). Em produtos de alta pureza, o peso cai: as matérias-primas respondem por 7% a 23% do custo da alfa-lactalbumina e por 12% a 35% do dos fosfolipídios (GFI EUROPE; ARTHUR D. LITTLE, 2025) e por 25% numa enzima recombinante (FERREIRA; AZZONI; FREITAS, 2018), e passam a dominar consumíveis, capital e purificação;
- utilidades (vapor, energia elétrica e refrigeração);
- recuperação do produto (separação, purificação e secagem), frequentemente o maior bloco.

Dentro do portão, o Brasil tem vantagem potencial nos dois primeiros itens, a confirmar sítio a sítio e estação a estação, e não tem vantagem no terceiro. A consequência é priorizar o portfólio pelos produtos em que o insumo pesa mais no custo e combinar, desde o início, moléculas de alto valor e de volume (Tabela 4). As prioridades são

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

uma proposta de triagem, e não o resultado de uma análise de custos.

Tabela 4. Priorização de portfólio pela vantagem comparativa real

Prioridade	Classe de produto	Razão	Papel no excedente
Alta	Ácidos orgânicos e ácido láctico para poli(ácido láctico) (PLA)	Insumo e utilidades pesam muito no custo; recuperação de complexidade moderada, maior no ácido láctico de grau polimérico	Volume e valor
Alta	Poli-hidroxialcanoatos (PHA)	Insumo pesa muito no custo; polímero acumulado dentro da célula, de recuperação exigente em energia e reagentes (SAAVEDRA DEL OSO; MAURICIO-IGLESIAS; HOSPIDO, 2021)	Volume e valor
Alta	Proteína microbiana para ração e alimentos	Grande mercado; insumo domina o custo; purificação moderada (ração) a exigente (alimentos)	Volume
Média	Sabores, fragrâncias, ativos cosméticos e lipídios de especialidade (ômega-3)	Vantagem no insumo; purificação exigente; via CDMO com parceiro detentor de mercado	Valor
Seletiva	Proteínas alimentares de alto valor	Purificação complexa; entrar com sócio que traga tecnologia e canal	Valor

Fonte: elaboração dos autores.
Nota: prioridades propostas pelos autores para triagem, condicionadas, em cada rota, a título, produtividade, rendimento recuperado, pureza exigida e custo de separação.

As usinas de cana e as biorrefinarias de milho não são sítios equivalentes, e a diferença é complementar (Tabela 5). A cana tem bagaço próprio e vapor de baixo custo na safra, mas opera de 200 a 240 dias por ano e entrega um caldo com sais, cinzas e compostos fenólicos que exigem clarificação. Plantas de biomanufatura precisam de mais de 330 dias por ano para diluir a depreciação dos biorreatores e da recuperação do produto, o bloco mais caro; na cana, isso exige estocar xarope concentrado ou melaço para a entressafra, ou integrar cana e milho na mesma unidade, como já fazem as usinas flex (cana e milho) do Centro-Oeste. O milho opera o ano inteiro, com hidrolisado de amido livre dos sais e fenólicos do caldo, mas compra a biomassa da caldeira; na moagem seca, o mosto carrega fibra, proteína e óleo do grão, e fermentações de alta pureza exigem fracionar o grão ou clarificar o hidrolisado, como numa fábrica de dextrose. Na entressafra, que no Centro-Sul coincide com o verão, a usina de cana não mói, e vapor e eletricidade deixam de ser baratos: manter compressores, esterilização e refrigeração o ano todo exige estocar bagaço, comprar biomassa ou integrar milho. O xarope estocado consome vapor de evaporação e tanques, degrada-se e concentra sais que encarecem a purificação, justamente o bloco em que o país não tem vantagem. O contrato de fabricação precisa definir quem paga a clarificação, a estocagem e as utilidades da entressafra. Na prática, biorrefinarias de milho e usinas flex levam vantagem nas fermentações que precisam operar o ano inteiro, desde que o substrato atenda à pureza do produto; a usina só de cana se presta melhor a produtos robustos, como ácidos orgânicos e bioplásticos, ou a campanhas na safra.

Tabela 5. Usina de cana e biorrefinaria de milho como sítios de biomanufatura

Atributo	Usina de cana	Biorrefinaria de milho
Substrato	Caldo, xarope ou melaço de sacarose; exige clarificação	Hidrolisado de amido; na moagem seca, com fibra, proteína e óleo do grão, que exigem fracionamento ou clarificação para produtos de alta pureza
Calendário	Safra de 200 a 240 dias; operação anual exige estocar xarope ou melaço, ou integrar com milho	Ano inteiro, com grão armazenado
Vapor e eletricidade	Bagaço próprio, baixo custo na safra (custo de oportunidade: a eletricidade exportada)	Caldeira a biomassa comprada (sobretudo eucalipto): custo positivo, baixa intensidade de carbono
Resíduos e coprodutos	Vinhaça e torta de filtro (biometano)	DDG e óleo de milho (ração e biodiesel)
CO_2 de fermentação	Disponível, em plantas dispersas	Disponível, em plantas grandes e concentradas; primeiro projeto de captura e estocagem de CO_2 do país
Primeiro degrau da escada (seção 6)	Biometano	DDG e óleo já em receita; captura de CO_2 onde há reservatório e comprador de remoções
Região	Centro-Sul, com núcleo em São Paulo	Mato Grosso, Goiás e Mato Grosso do Sul

Fonte: elaboração dos autores.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

Fora do portão, a vantagem potencial é ainda maior e menos discutida: margem para expandir a produção sem desmatamento. O Brasil ocupava com lavouras menos de 8% do território em 2018 (EMBRAPA TERRITORIAL, 2018) e tem cerca de 110 milhões de hectares de pastagens cultivadas com degradação intermediária ou severa, dos quais 28 milhões têm alto potencial agrícola quando se consideram aptidão do solo, risco climático, logística e exclusão de terras indígenas, quilombolas e áreas prioritárias para a biodiversidade (BOLFE et al., 2024). O Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas (Decreto nº 11.815/2023, hoje Caminho Verde Brasil) mira converter até 40 milhões de hectares em dez anos em sistemas produtivos, sem desmatamento (BRASIL, 2023). A safrinha é a demonstração em curso: o milho de segunda safra produz amido na mesma área da soja, sem área nova. A conta de área do excedente é pequena diante desse estoque: os 14 a 24 bilhões de litros de 2040 equivalem a 2–3,5 milhões de hectares de cana ou a 6–10 milhões de hectares de safrinha, área que, no caso do milho, já é ocupada pela soja. No horizonte deste artigo, a restrição brasileira não é terra; é demanda. O redirecionamento do carboidrato já produzido não exige área nova; o crescimento além dele dependerá de recuperar pastagens com rastreabilidade e de controlar os efeitos diretos e indiretos sobre o uso da terra e a produção de alimentos, porque o potencial mapeado não é área imediatamente disponível. Por isso, o excedente deve ser lido não como passivo agrícola a conter, mas como capacidade ociosa de carbono biogênico — exatamente o insumo de que a biomanufatura precisa.

A segunda camada é o conhecimento. O baixo custo do açúcar e do amido brasileiros não é acidente geográfico: é o acúmulo de décadas de pesquisa pública e privada em rede, que reúne a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), institutos estaduais como o Instituto Agronômico (IAC) e o Instituto Biológico (IB), em São Paulo, a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) e a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), universidades como a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), a Universidade Estadual Paulista (Unesp) e a Universidade Federal de Viçosa (UFV) e centros privados como o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC). Essa rede entregou variedades de cana adaptadas, a tropicalização da soja e do milho de segunda safra, a fixação biológica de nitrogênio, o plantio direto na palha, o controle biológico em larga escala e o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC). É essa base que dá estabilidade à oferta física de biomassa quando extremos climáticos atingem as colheitas. A estabilidade não é garantida — a geada de 2021 e a seca e os incêndios de 2024 nos canaviais paulistas mostram o contrário —, mas é diversificada: cana no Sudeste e milho no Centro-Oeste, em calendários distintos, são um seguro natural para quem contrata suprimento de longo prazo.

5.3 A concorrência da China e o papel de fornecedor confiável

A maior capacidade de fermentação industrial do planeta (aminoácidos, ácido cítrico, vitaminas) está na China, com glicose de milho barata e capital estatal, e o próprio setor de rações chinês está migrando para proteína fermentada com investimento estrangeiro, como a linha da Louis Dreyfus em Tianjin (ZHANG; JACKSON, 2026). O Meio-Oeste americano tem glicose competitiva. Uma empresa de biotecnologia que aluga capacidade escolhe entre essas plantas, e a pergunta “por que o Brasil?” tem de ter resposta: açúcar a custo de produção entre os mais baixos do mundo, vapor de bagaço com uma intensidade de carbono que nenhum parque a carvão iguala, uma etiqueta de origem renovável que os mercados regulados de carbono começam a pagar e uma oferta de biomassa expansível sem desmatamento. É uma vantagem real. No milho, a resposta é outra, mas existe: amido de safrinha, colhido na mesma área da soja; caldeiras a cavaco de eucalipto, e não a carvão ou gás; e reservatórios geológicos sob as próprias biorrefinarias para estocar o CO_2 (seção 6.4). E o concorrente direto nas moléculas de cana não é só a China. A Tailândia tem a mesma base de cana e bagaço, abriga uma planta de 75 mil toneladas por ano de PLA feito de ácido láctico de cana, da TotalEnergies Corbion, em Rayong (CHEMICAL ENGINEERING, 2019), e atraiu o projeto de eteno de etanol de cana da própria Braskem com a SCG Chemicals, de 200 mil toneladas por ano, anunciado em 2023, com conclusão prevista para 2028 e decisão final de investimento esperada para o segundo trimestre de 2026 (HYDROCARBON PROCESSING, 2023; SCG CHEMICALS, 2025). Diante de produtores asiáticos com pouca terra, o que distingue o Brasil no longo prazo é a margem de expansão sem desmatamento (seção 5.2) e a diversificação de culturas e regiões.

O 15º Plano Quinquenal (2026–2030), aprovado pela Assembleia Nacional Popular em 12 de março de 2026, eleva a segurança alimentar ao plano da segurança nacional e inclui, entre suas diretrizes agrícolas, explorar novas fontes de proteína por biotecnologia sintética (DCZ, 2026). Estudos independentes projetam que a substituição de farelo de

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

soja em rações e os ganhos de eficiência já reduziram a demanda chinesa por soja em 15 milhões de toneladas entre 2021 e 2024, e que as importações possam cair 25% até 2030 (THE AGRIBIZ, 2026). Um Estado continental acaba de validar, com metas e orçamento, que a biomanufatura de proteína é um mercado real e iminente. Ele será cliente e concorrente, e o Brasil precisa se posicionar para ambos os papéis. Para a soja brasileira, o recado é o mesmo deste artigo para o etanol: o maior comprador está dizendo que pretende comprar menos molécula bruta e fabricar mais molécula.

Há um terceiro papel possível, que nenhum dos dois concorrentes ocupa. Em 2022, 32 países impuseram 77 restrições à exportação de alimentos (IFPRI, 2023), e as cadeias de insumos estratégicos passaram a ser desenhadas por critérios de segurança, e não só de custo. Um fornecedor com excedente estrutural de carbono biogênico, matriz elétrica renovável e comércio com todos os blocos tem valor estratégico próprio: pode ser, para as moléculas e os alimentos, o que a Suíça é para as finanças — um porto seguro onde qualquer país ancora suprimento de longo prazo. A condição não é automática. O Brasil está exposto a tarifas, como mostrou o tarifaço norte-americano de 2025, que reduziu os embarques de etanol para os Estados Unidos (DATAGRO, 2026), e a exigências de rastreabilidade, como o regulamento europeu contra o desmatamento (UNIÃO EUROPEIA, 2023a). A biomanufatura por contrato é precisamente o instrumento que converte vantagem territorial em confiança contratual: capacidade reservada por cinco a dez anos, origem rastreável e pegada de carbono auditável — inclusive negativa, com a captura do CO_2 de fermentação (seção 6.4).

5.4 A prova brasileira

A Amyris opera fermentação de precisão em xarope de cana no interior paulista desde 2012, em Brotas, e desde 2022 em Barra Bonita, adjacente à usina, produzindo especialidades químicas para cosméticos, alimentos e fragrâncias. Em 2023, a empresa pediu recuperação judicial nos Estados Unidos, com mais de US$ 1 bilhão em dívidas (REUTERS, 2023). Duas coisas a quebraram: a verticalização em marcas de consumo, que exigiu marketing e capital de giro que o caixa não sustentava, e o estouro de custo e o atraso de partida da própria planta de Barra Bonita. A reestruturação vendeu as marcas e manteve a manufatura. Em maio de 2025, a empresa ressurgida comprou os 31% da Ingredion na *joint venture* RealSweet e assumiu o controle integral da planta, cuja quarta linha de fermentação, menor que as três originais, teve a construção concluída em março de 2026 (AMYRIS, 2025; 2026). O caso sustenta a viabilidade de uma operação industrial integrada a uma usina, e não, sozinho, a de uma rede de usinas operando como fabricante multiproduto. É evidência a favor do modelo por uma razão precisa: o que sobreviveu foi o ativo de fermentação em cana, e o que morreu foi o risco de produto e de marca, exatamente o risco que a fabricação sob contrato deixa com o cliente. Barra Bonita também confirma a ressalva de engenharia da seção 5.1: é uma planta dedicada, asséptica, anexa à usina, e não uma reconversão das dornas. Mas é também um aviso: construir a planta no prazo e no orçamento certos é parte do que o Brasil ainda precisa provar.

A Amyris prova as especialidades, e não o volume. A colocalização em escala industrial também tem precedente no país, inclusive em produto de volume. A Evonik inaugurou em 2016, em Castro (PR), dentro do complexo da Cargill, uma planta com capacidade para cerca de 80 mil toneladas por ano de Biolys, aditivo para ração com 60% a 62% de L-lisina, fermentado a partir de dextrose de milho; compra da Cargill serviços de sítio e logística e matérias-primas da região (EVONIK INDUSTRIES, 2016; 2023). A Corbion fabrica óleo de microalga rico em ômega-3 (AlgaPrime DHA) para ração aquícola em Orindiúva (SP), numa planta adjacente a uma usina de açúcar então da Bunge, com contratos de longo prazo de fornecimento de açúcar e utilidades (WORLD GRAIN, 2018). O primeiro é produto de volume para ração, num complexo de processamento de grãos; o segundo, lipídio de especialidade para a aquicultura, numa usina de cana.

6 A escada de risco

Nenhum diretor de usina com margens estreitas e voláteis converterá o negócio em aposta de biotecnologia. O programa precisa de uma escada em que cada degrau gere caixa para o seguinte. Antes dos degraus, porém, uma restrição que 2026 tornou impossível omitir.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

6.1 O crédito

O agronegócio registrou 1.990 pedidos de recuperação judicial em 2025, alta de 56,4% sobre os 1.272 de 2024 e quase quatro vezes os 534 de 2023, o maior número da série da Serasa Experian; Mato Grosso (332) e Goiás (296) lideram (INFOMONEY, 2026). No primeiro trimestre de 2026 foram 474 pedidos, alta de 21,9% sobre igual período, e a inadimplência rural chegou a 8,8% (METRÓPOLES, 2026). O aumento dos pedidos desvalorizou cotas de fundos e certificados de recebíveis do agronegócio na bolsa e levantou dúvidas sobre a execução das garantias, o que restringiu o acesso do setor ao capital de mercado.

O caso de maior repercussão é do próprio setor de cana. Em março de 2026, a Raízen, maior produtora mundial de etanol de cana, protocolou o maior pedido de recuperação extrajudicial da história corporativa brasileira, com cerca de R$ 65 bilhões de dívida sujeita ao plano em um endividamento total superior a R$ 73 bilhões; o plano, com adesão de mais de 75% dos credores, prevê conversão de dívida em ações, aporte de R$ 3,5 bilhões da Shell, cisão da companhia em duas até o fim de 2027 e desinvestimento de usinas (BRAZIL JOURNAL, 2026; XP INVESTIMENTOS, 2026). Entre as causas apontadas estão a aposta na expansão acelerada em etanol de segunda geração, os juros, o clima e a queda do açúcar. A principal promotora do etanol celulósico e do SAF no Brasil está reestruturando seu passivo, e seus cronogramas de 2027 devem ser lidos com essa incerteza.

Esse quadro reforça o argumento deste artigo. A crise é de um modelo de receita exposto a preço de *commodity*, câmbio e clima, e de investimentos de transição feitos com dívida cara. A fabricação sob contrato, com capacidade alugada, receita em dólar e contraparte industrial, tem outro perfil de risco. E há um veículo institucional subutilizado: o sistema cooperativista, que agrega escala, dilui risco de contraparte e tem a governança que um contrato de colocalização de longo prazo exige. Há, porém, uma restrição jurídica a resolver no desenho: a prestação de serviços industriais a terceiros não associados, como uma empresa de biotecnologia, é ato não cooperativo, cujo resultado é contabilizado em separado e tributado integralmente (Lei nº 5.764/1971, arts. 86, 87 e 111); a mesma lei permite à cooperativa participar de sociedades não cooperativas para atividades complementares (art. 88). O arranjo natural é uma sociedade de propósito específico controlada pela cooperativa, que contrata com o cliente e compra açúcar e utilidades da cooperativa e de seus associados (BRASIL, 1971). A cooperativa, por meio desse veículo, pode ser contratante mais viável que a usina isolada, e essa é a primeira hipótese que o piloto deve testar. A sociedade de propósito específico é empresa comum, tributada integralmente sobre a própria margem de conversão; sua virtude não é fiscal, e sim a governança, o suprimento de várias usinas e o isolamento patrimonial em relação às dívidas das usinas, que o contrato reforça com direito de superfície sobre o terreno dos biorreatores e cláusula que permite ao parceiro assumir a operação (*step-in*). O piloto deve modelar a fronteira tributária e os preços de transferência entre a cooperativa e a sociedade.

6.2 Primeiro degrau: biometano de vinhaça e torta de filtro

O biometano de vinhaça e torta de filtro usa tecnologia comercial, tem rota regulatória estabelecida na ANP e demanda crescente para substituir diesel na frota própria, para injeção na rede ou para abastecimento de veículos. A Cocal opera desde 2021, em Narandiba (SP), a primeira planta dedicada a biometano de resíduos sucroenergéticos, com R$ 139 milhões de investimento e cerca de 9 milhões de metros cúbicos anuais, abastecendo uma rede isolada até Presidente Prudente (COPERSUCAR, 2021; ARSESP, 2025). A Raízen opera desde 2020 a usina de biogás de Bonfim, em Guariba (SP), com 21 MW, e desde setembro de 2024 injeta biometano da unidade Costa Pinto, em Piracicaba, na rede da Comgás (ARSESP, 2025). Esse degrau financia a curva de aprendizado dos seguintes, desde que haja crédito para o investimento inicial, o que hoje não está garantido.

O degrau é específico da cana. Nas biorrefinarias de milho, os resíduos da destilação já se convertem em DDG e óleo, e esse fluxo de caixa, de até 25% da receita (seção 3.1), existe desde a partida da planta e é o primeiro degrau. A captura do CO_2 de fermentação (seção 6.4) vem logo atrás onde há reservatório geológico e comprador de remoções, como em Lucas do Rio Verde; nas demais plantas, depende do preço de carbono do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), previsto em fases de 2027 a 2030, ou do uso químico do CO_2, como no metanol de rota elétrica (seção 3.1.1). O CO_2 purificado tem mercado também na indústria de alimentos e bebidas — talvez um mercado pequeno, mas não desprezível.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

6.3 Segundo degrau: fabricação sob contrato e combustível de aviação

Na fabricação sob contrato, a usina não vende produto: vende capacidade. O contrato típico reserva volume de fermentação por prazo longo (cinco a dez anos), com pagamento fixo pela capacidade e variável pelo uso, e cabe ao parceiro fornecer a cepa, o protocolo de processo e o comprador final. A usina entra com terreno, utilidades, açúcar ou glicose e operação; o investimento incremental fica concentrado nos biorreatores assépticos dedicados e na recuperação do produto (seção 5.1), que costumam ser financiados ou compartilhados com o parceiro. O risco de mercado permanece com quem detém a marca, a lição central do caso Amyris (seção 5.4). O contrato aloca riscos, mas não os elimina: contaminação, perda de título ou de produtividade na mudança de escala, lote reprovado, ociosidade e inadimplência do parceiro continuam possíveis, e o contrato-tipo precisa dizer quem responde pelo desempenho, pela aceitação dos lotes, pela utilização mínima e pelo custo da falha. Por isso, esse degrau não precisa esperar o caixa do primeiro: o capital dos biorreatores vem do balanço do parceiro, desde que o contrato isole os equipamentos dele dos credores da usina (seção 6.1).

A usina aluga infraestrutura. É a etapa de curto prazo da seção 4.1 combinada à entrada da etapa de longo prazo da seção 4.2. O SAF é o caso mais maduro: a aviação não se eletrifica no horizonte relevante e tem mandato compulsório e prêmio de preço. É etanol que o Brasil já produz. Resolve preço e posicionamento e, com a rota para diesel renovável que a mesma tecnologia permite, também pode agregar volume (seção 3.1.1).

6.4 Terceiro degrau: baterias e captura de carbono

O terceiro degrau reúne dois ativos com economias distintas: o armazenamento de eletricidade em baterias, remunerado pelo setor elétrico, e a captura e estocagem do CO_2 de fermentação, remunerada pelo carbono. Nas biorrefinarias de milho sobre reservatório geológico e com comprador de remoções, a captura pode vir antes (seção 6.2).

Baterias. A usina tem conexão à rede, terreno e, com cogeração, um ativo de geração: é um dos melhores sítios de armazenamento do país. A economia mudou: segundo a BloombergNEF, o pacote de baterias para armazenamento estacionário caiu para US$ 70/kWh em 2025, 45% abaixo de 2024, tornando-se pela primeira vez o segmento mais barato; a média de todos os segmentos, incluídos os veículos, ficou em US$ 108/kWh (BLOOMBERGNEF, 2025). Duas advertências:

- arbitragem de preço, reserva de capacidade e serviços ancilares têm economias distintas e devem ser dimensionados separadamente;
- a arbitragem comprime o próprio diferencial de preço que a remunera: na Austrália, com a capacidade de baterias saltando de 2,2 GW para 6,1 GW em 2025, o preço de atacado caiu A$ 32,73/MWh em Queensland e A$ 31,66/MWh em Nova Gales do Sul, e as baterias passaram a definir o preço em 16,3% do tempo, deslocando gás e hidrelétrica (AER, 2026). Os primeiros investidores capturam esse diferencial; os seguintes encontram margens já reduzidas.

Bioenergia com captura e estocagem de carbono (BECCS). A fermentação alcoólica libera CO_2 biogênico com pureza superior a 99%, de modo que a captura se resume a desidratação e compressão. Nos Estados Unidos, o custo estimado de captura em usinas de etanol vai de US$ 0 a 35 por tonelada, contra US$ 40 a 290 em termelétricas e siderurgia (GAO, 2022), e, nos Estados Unidos, um crédito de US$ 60 por tonelada cobriria captura, transporte e estocagem de cerca de 30 milhões de toneladas por ano (SANCHEZ et al., 2018). Cada litro de etanol libera 0,75 kg de CO_2 na dorna: os 37,5 bilhões de litros de 2025/26 equivalem a 28 milhões de toneladas de CO_2 por ano, 7,7 milhões só no milho. Capturado e estocado, esse CO_2 reduz a intensidade de carbono do etanol em cerca de 35 g de CO_2 por MJ, redução bruta que, para o etanol de milho produzido com caldeira a biomassa, pode levar a pegada para perto de zero ou abaixo dele. Os 28 milhões de toneladas são CO_2 gerado, e não remoção: entre um e outro estão a fração efetivamente capturada, as emissões e perdas do transporte e da estocagem, a permanência, a verificação e a metodologia que define o que é elegível a crédito sem dupla contagem.

O marco legal existe. A Lei do Combustível do Futuro (Lei nº 14.993/2024, arts. 26 a 29) submeteu captura, transporte e estocagem geológica de CO_2 à autorização da ANP, por 30 anos renováveis (BRASIL, 2024b), e o Decreto nº 13.095/2026 regulamentou a atividade, com estímulo a polos multiusuários e infraestrutura compartilhada (BRASIL, 2026). O primeiro projeto está em curso: a FS, em Lucas do Rio Verde (MT), captura o CO_2

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

da fermentação do milho para injeção em reservatório salino da Bacia dos Parecis, sob a própria unidade, com meta de 423 mil toneladas por ano; o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) aprovou R$ 384,3 milhões para o projeto em dezembro de 2025 (UDOP, 2025). A empresa vendeu em 2025 os primeiros créditos futuros de remoção do país, um deles a US$ 150 por tonelada, e, em junho de 2026, ao fechar nova venda de 10 mil créditos, previa iniciar a injeção em setembro daquele ano (NOVACANA, 2025b; FORBES BRASIL, 2026).

O que falta é preço. A conta por litro mostra por quê. Ao custo de referência de US$ 60 por tonelada (captura, transporte e estocagem, estimado para os Estados Unidos), o custo é de cerca de US$ 0,045 por litro de etanol. Ao preço do Crédito de Descarbonização (CBIO) de abril de 2026, R$ 29, cerca de US$ 5 por tonelada, a receita de carbono seria de US$ 0,004 por litro, um décimo do custo; o CBIO está nos menores níveis desde 2020, em mercado de sobreoferta estrutural (RPANEWS, 2026). A US$ 150 por tonelada, preço de uma das vendas da FS, a receita chega a US$ 0,11 por litro, cerca de R$ 0,60 — fração relevante do preço do etanol na usina. Na Europa, a permissão de emissão foi leiloada, no terceiro trimestre de 2026, a € 82 por tonelada em média, valor que a Comissão Europeia adota como preço dos certificados do ajuste de carbono na fronteira (COMISSÃO EUROPEIA, 2026). São instrumentos diferentes, e a diferença de preço reflete o desenho de cada mercado, e não o valor climático. Na prática, a viabilidade da captura em escala depende de três decisões regulatórias: o reconhecimento das remoções por BECCS como Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE) no Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE; Lei nº 15.042/2024; BRASIL, 2024c); uma regra de interação entre CRVE e CBIO que evite a dupla contagem sem eliminar a receita; e a valorização da menor intensidade de carbono nos mandatos de SAF (ProBioQAV) e nas certificações de exportação (seção 4.1). Esse é o argumento mais forte a favor de um mercado regulado de carbono com preço, e o elo que torna o terceiro degrau viável.

6.5 Uma janela que exige preparo

Um caso real mostra por que é preciso estar pronto para esse degrau: a Portaria Normativa MME nº 136, de 1º de junho de 2026, criou os dois primeiros leilões de reserva de capacidade para armazenamento em baterias. O cadastramento na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) abriu em 15 de junho e fechou em 31 de julho, prorrogado por horas por sobrecarga do sistema. Encerrou com 6.091 projetos cadastrados, somando 296.807 MW, recorde absoluto do setor elétrico brasileiro, para uma contratação que o MME estima entre 5 GW e 6 GW nas duas etapas, marcadas para 2 e 4 de dezembro, com contratos de quinze anos a partir de 2028 (EPE, 2026b; MME, 2026). A capacidade cadastrada é de 50 a 60 vezes a contratação prevista, antes ainda da habilitação técnica de novembro; mede interesse, e não capital comprometido. A EPE não identifica os empreendedores, e não há registro público de projetos de usinas sucroenergéticas entre os cadastrados; o ponto não é quem ficou de fora, e sim o que é preciso para entrar. Uma usina com conexão ao Sistema Interligado Nacional (SIN), terreno e ativo de geração tem o que o leilão procura, e a portaria permite instalar a bateria no ponto de conexão de outro agente (MME, 2026), mas só disputa o certame quem tem projeto, licenças e parceiro prontos antes de a janela abrir. O certame “Nacional” ainda vincula habilitação a conteúdo nacional, o que conecta o pleito diretamente à agenda de redução de dependência tecnológica. Preparar o setor para janelas como essa é um dos objetivos deste programa.

Duas qualificações evitam ler essa janela como promessa de lucro. O leilão contrata disponibilidade de potência por quinze anos, com receita fixa, e não arbitragem; a advertência australiana da seção 6.4 vale para a operação no mercado de curto prazo, e não para esse contrato. E a fila de quase 300 GW mostra que não falta interesse de investidores em baterias: a vantagem da usina não é o dinheiro, mas a conexão, a subestação e o terreno, que ela pode alugar a quem traz a bateria, no mesmo modelo da fabricação sob contrato. Como a portaria põe toda a potência contratada à disposição do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a bateria do leilão não pode ser contada como armazenamento de uso livre da usina nem como garantia de energia para os biorreatores; uma bateria para dar energia firme à fábrica seria outro ativo, fora do leilão. Há também um limite físico: na safra, a capacidade de escoamento da conexão já está ocupada pela cogeração, e um contrato de reserva exige disponibilidade o ano inteiro, o que obriga a dimensionar bateria e despacho em conjunto.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

7 Pilotagem e escalonamento

Recomendamos começar por São Paulo como ambiente regulatório experimental, com gatilho explícito de escalonamento nacional. A justificativa é de engenharia de implementação, e a métrica é o tempo até o primeiro piloto operacional comprovado.

São Paulo possui:

- a maior concentração de usinas;
- os ativos físicos da tese (Amyris em Barra Bonita, Cocal em Narandiba, Raízen em Piracicaba, Petrobras e JetBio em Paulínia), no mesmo perímetro regulatório;
- uma rede de pesquisa agronômica e de bioprocessos concentrada (IAC, IB, ESALQ/USP, Unicamp, Unesp, CTC e as faculdades de tecnologia);
- uma agência de fomento, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), capaz de lançar uma chamada estruturante em maturidade tecnológica 6 a 9 em ciclo de meses.

Provar contratos-tipo de fabricação sob contrato, protocolo de colocalização, partilha de utilidades e licenciamento ambiental da instalação num estado é uma questão de tempo (estimados 18 a 24 meses para o piloto completo). Em escala federal, passaria a ser problema de disputa federativa. O licenciamento estadual, porém, cobre a instalação, as emissões e os efluentes, e não a cepa nem o produto: o uso industrial de microrganismos geneticamente modificados depende de Certificado de Qualidade em Biossegurança e de deliberação da Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio), nos termos da Lei nº 11.105/2005 (BRASIL, 2005), e os ingredientes de ração e de alimento dependem de registro no Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) e na Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). O piloto precisa articular essas instâncias federais desde o início e deixar claro, no contrato-tipo, o que cabe à usina (a licença da instalação) e o que cabe ao cliente (a cepa e o registro do produto). A rede da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e os Institutos SENAI de Inovação podem dividir com a FAPESP o escalonamento de processo.

O limite precisa ser estabelecido com a mesma clareza. O excedente é majoritariamente de milho, e as biorrefinarias de milho estão em Mato Grosso e Goiás. São Paulo é onde a solução estrutural se demonstra, pois a sacarose e os ativos-âncora estão lá. O escalonamento se daria no Centro-Oeste, e a biorrefinaria de milho (com glicose de amido, dióxido de carbono concentrado, vapor e coprodutos) é candidata tão natural à biossíntese quanto a usina de cana — com operação o ano inteiro e o primeiro projeto de BECCS do país já em curso. O gatilho deve estar formalizado no programa: ao atingir um número definido de pilotos operacionais e um custo-alvo, o modelo é submetido como proposta nacional e passa a ser elegível às linhas da Nova Indústria Brasil — Missão 1, cadeias agroindustriais sustentáveis, e Missão 5, bioeconomia, descarbonização e segurança energética —, operadas pelo BNDES e pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) (BRASIL, 2024d), e às ações da Estratégia Nacional de Bioeconomia (Decreto nº 12.044/2024; BRASIL, 2024a). Os contratos-tipo e os protocolos testados em São Paulo funcionam como critério técnico de elegibilidade para o crédito federal no Centro-Oeste. Nem tudo o que se prova em São Paulo, porém, vale para o milho. São universais a governança da sociedade de propósito específico, a alocação de risco e de propriedade intelectual, os protocolos de assepsia e a reserva de capacidade; o preço do vapor de biomassa comprada, o substrato de glicose de amido e a dispensa de estocagem de xarope precisam ser parametrizados numa biorrefinaria de milho. Como o primeiro excedente é do milho e o crédito está mais apertado justamente em Mato Grosso e Goiás (seção 6.1), o crédito do Centro-Oeste não deve esperar o fim do piloto paulista: os itens universais podem ser adotados assim que validados, e os específicos do milho, calibrados numa trilha paralela com uma biorrefinaria da região. A correta gestão do excedente exige soluções que ultrapassem as fronteiras de São Paulo, integrando o milho como um aliado na estratégia agrícola e industrial do país.

O piloto precisa de critérios de avanço definidos antes da seleção dos projetos, por produto e por edital, em seis dimensões: processo (título, rendimento recuperado, produtividade e especificação no substrato local); mercado (contrato com especificação, volume e regra de preço, com contraparte examinada); economia (margem depois das utilidades, da recuperação do produto, do capital e do custo de oportunidade dos coprodutos); integração (balanço anual de energia, água, resfriamento e entressafra); ambiente (avaliação de ciclo de vida e rastreabilidade compatíveis com o que se alega); e replicabilidade (resultado reproduzido numa biorrefinaria de milho). Um projeto

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

cuja receita dependa de preço de nicho extrapolado para grande volume, de crédito de carbono ainda não elegível ou de utilidades não previstas no investimento deve ser revisto ou interrompido. O programa não precisa saber de antemão qual classe de moléculas vencerá; precisa de regras para descobrir.

8 A ciência necessária

Embora já exista tecnologia para o aproveitamento de matérias-primas de cana-de-açúcar e milho para além da produção de biocombustíveis, há muitas opções adicionais e desenvolvimentos científicos que podem acelerar ou melhorar os processos ou mesmo gerar novas moléculas. O potencial e as possibilidades que a pesquisa pode oferecer são incomensuráveis. Para isso, são necessárias ações direcionadas e apoiadas por órgãos de fomento, como a FAPESP e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), além de aproveitar a infraestrutura e a experiência acumuladas em instituições de pesquisa estaduais e federais.

Não menos importante é incentivar a criação de novas empresas e startups que, por meio de pesquisa inovadora e disruptiva, possam explorar as inúmeras possibilidades de desenvolvimento de tecnologias e de síntese de produtos a partir das matérias-primas atualmente empregadas na produção de biocombustíveis. Apoios financeiros e a criação de ambientes para pesquisas de alto risco, em ecossistemas de inovação ligados ou não a instituições já existentes, poderão dar origem a produtos, processos e tecnologias que abram novos horizontes nesta área. As universidades atualmente formam um grande contingente de cientistas que talvez não tenham oportunidades ou não queiram trabalhar no ambiente acadêmico. Esse pessoal tem potencial para empreender, arriscar e inovar. Embora o setor privado no Brasil tenha pouca tradição em fundos de capital de risco (*venture capital*) para financiar pesquisas de alto risco, os exemplos do exterior podem gradativamente ser copiados por aqui: apostar em ideias que darão frutos e altos lucros no futuro. E o assunto deste artigo, com as externalidades positivas do Brasil, como a oferta de matéria-prima barata e abundante, aumenta as chances de êxito.

9 Recomendações de política

Boa parte dos instrumentos já existe: a Nova Indústria Brasil, cuja Missão 5 trata de bioeconomia e descarbonização, a Estratégia Nacional de Bioeconomia, as linhas da Finep e do BNDES e o Combustível do Futuro (BRASIL, 2024a; 2024d). Eles nem sempre funcionam como solução, porque falta conexão entre os setores. A política energética (MME, CNPE e ANP) decide o destino do etanol; a política industrial (MDIC, BNDES e Finep), o da biomanufatura; e a usina e a biorrefinaria de milho ficam entre as duas. A Tabela 6 lista os instrumentos propostos para fazer essa ponte, cada um com responsável e prazo.

Tabela 6. Instrumentos de política, responsáveis e prazos propostos

Instrumento	Responsável	Prazo	Função
Chamada FAPESP "Biorrefinaria Pós-Etanol", maturidade tecnológica 6–9	FAPESP	Próximo ciclo	Âncora do programa; pilotos de fabricação sob contrato em sítio de usina
Linha de crédito para o degrau 1 (biometano), com garantia estruturada	BNDES e bancos cooperativos	12 meses	Viabiliza o primeiro degrau em período de crédito restrito
Piloto de contratação via cooperativa, por sociedade de propósito específico	Secretaria estadual e sistema cooperativista	18 meses	Testa a cooperativa como contraparte, com segregação dos atos não cooperativos, isolamento patrimonial e preços de transferência
Estruturação de usinas para o próximo leilão de armazenamento	Usinas, EPE e ANEEL	12 meses	Prepara as usinas para disputar o próximo leilão com projeto, licenças e parceiro definidos
Contratos-tipo e protocolo de colocalização	Secretaria estadual, setor e assessoria jurídica	12–18 meses	Entregável reproduzível do piloto, separando itens universais e itens específicos do milho
Licenciamento ambiental da instalação de fermentação de precisão	CETESB	12–18 meses	Reduz a incerteza que impede o investimento

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

Instrumento	Responsável	Prazo	Função
Biossegurança da cepa e registro do produto (ração, alimento, cosmético)	CTNBio (Lei nº 11.105/2005), MAPA e ANVISA	12–24 meses	Sem eles, a planta licenciada não produz nem vende
Via regulatória para proteína microbiana em ração e apoio a biopolímeros de escala	MAPA, MDIC e BNDES	12–24 meses	Destrava as moléculas de volume, e não só as especialidades
Escalonamento de processo e financiamento da passagem da demonstração à escala industrial (maturidade tecnológica 6–9), com trilha paralela no Centro-Oeste	EMBRAPII, Institutos SENAI de Inovação, Finep e BNDES	Próximo ciclo (12–36 meses)	Divide com a FAPESP o risco técnico, combina recursos não reembolsáveis e reembolsáveis e calibra o modelo no milho
Capital para a expansão comercial	BNDESPar e fundos de investimento	Após a demonstração	Aporta capital (*equity*) para a expansão sem depender só de dívida
Rastreamento da origem (cana ou milho) do anidro incremental do E30 e do E32	ANP e EPE	6 meses	Indica se a mistura protege a cana ou o milho
Trajetórias de eletrificação por análogos e relação de preços hidratado/gasolina explícitas no PDE	EPE e MME	Próximo ciclo do PDE	Alinha o planejamento oficial aos emplacamentos de 2026
Autorização de estocagem geológica de CO_2 e polos multiusuários no Centro-Oeste	ANP (Lei nº 14.993/2024; Decreto nº 13.095/2026)	12–24 meses	Leva o BECCS além do projeto pioneiro
Reconhecimento das remoções por BECCS como CRVE e regra de interação com o CBIO	Órgão gestor do SBCE e MME (RenovaBio)	12–24 meses	Cria receita de remoção sem dupla contagem
Mercado regulado de carbono com preço	Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima e órgão gestor do SBCE (Lei nº 15.042/2024)	Fases de 2027–2030	Sem preço de carbono, a captura não é viável
Rede de P&D agronômica para carboidratos fermentescíveis (cultivares, ZARC, integração sobre pastagens degradadas)	Embrapa, institutos estaduais (IAC, IB, EPAMIG, EPAGRI) e universidades	Contínuo	Mantém a vantagem de custo e a estabilidade da oferta sob estresse climático
Segurança energética como objetivo explícito da política de combustíveis, com regra de acionamento da mistura e capacidade de etanol tratada como reserva estratégica	MME, CNPE e ANP	Próximo ciclo do PDE	Valoriza a capacidade que o balanço de volumes trata como sobra
Etanol na navegação: especificação, terminais portuários e posição brasileira nas regras de ciclo de vida da IMO e da União Europeia	MME, ANP, Ministério de Portos e Aeroportos e MRE	12–24 meses	Abre o maior mercado novo de combustível para o excedente
Abertura de mercados externos: certificação, reconhecimento mútuo de sistemas de contabilidade de carbono e acordos comerciais	MRE, MDIC, MAPA, ApexBrasil e setor privado	Contínuo	Converte mandatos de mistura de outros países em demanda contratada
Gatilho de escalonamento nacional, articulado à Nova Indústria Brasil	MDIC (Secretaria de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria) e CNDI, BNDES e Finep, com MME e CNPE (Combustível do Futuro)	Por metas	Leva o modelo comprovado a Mato Grosso e Goiás, com crédito federal, e o integra à Missão 5 da Nova Indústria Brasil; os itens universais não esperam o fim do piloto paulista
Fundos de capital de risco (*venture capital*) para incentivar pesquisas disruptivas	BNDES, MDIC e secretarias estaduais de Ciência e Tecnologia	2 a 5 anos	Criação de startups e empresas inovadoras em ecossistemas de pesquisa de risco

Fonte: elaboração dos autores.
Nota: responsáveis e prazos são recomendações dos autores, e não compromissos das instituições. ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; ApexBrasil, Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos; CNDI, Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial; MDIC, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços; MRE, Ministério das Relações Exteriores; RenovaBio, Política Nacional de Biocombustíveis.

A mensagem para cada ator do processo precisa ser personalizada:

- **setor sucroenergético e de milho:** os novos destinos (navegação, diesel renovável e querosene de aviação, química e exportação) são a primeira frente e podem absorver de 6 a 18 bilhões de litros em 2040, e máquinas agrícolas a etanol já estão em teste; como esses mercados ainda não estão contratados, a diversificação em moléculas é o seguro;

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

- **diretores de usina:** começar pelo biometano, alugar infraestrutura e estruturar-se para o próximo leilão, sem comprometer o negócio principal;
- **produtores e biorrefinarias de milho:** o excedente é tanto seu quanto da cana, assim como a produção de moléculas. A glicose de amido é o insumo-padrão da fermentação industrial no mundo, o CO_2 de fermentação é o ativo de remoção mais barato do país, e o programa que nasce em São Paulo tem de chegar a Lucas do Rio Verde e Rondonópolis;
- **FAPESP e formuladores paulistas:** São Paulo pode definir o modelo nacional de uma indústria nascente de alto valor, com um instrumento que só São Paulo dispara nesta velocidade;
- **MME, EPE, BNDES e CNPE:** o conteúdo nacional do leilão, a agenda de SAF e a lei de captura e estocagem de carbono já apontam nessa direção, mas faltam o elo com a infraestrutura instalada, o preço de carbono, um planejamento que incorpore os emplacamentos de 2026 e saber para quem o teor da mistura está entregando demanda;
- **MRE, MDIC e MAPA:** os mandatos de mistura de mais de 57 países e o novo mercado marítimo só viram demanda para o Brasil com certificação, reconhecimento mútuo e presença nas negociações da IMO;
- **MDIC (Secretaria de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria) e CNDI:** conduzir o escalonamento nacional, articulando os instrumentos federais e a expansão do modelo para outras regiões produtoras, especialmente o Centro-Oeste, e integrar os modelos validados à Missão 5 da Nova Indústria Brasil, para inserir a transição das usinas e biorrefinarias para a biomanufatura na estratégia nacional de bioeconomia e descarbonização;
- **Finep, EMBRAPII e BNDES:** articular instrumentos não reembolsáveis e reembolsáveis para reduzir o risco tecnológico da biomanufatura, apoiando pilotos e demonstrações (maturidade tecnológica 5 a 7) e o escalonamento industrial das soluções validadas (7 a 9), para que a passagem da demonstração à escala comercial não dependa só do capital e do risco das próprias usinas;
- **BNDESPar e fundos de investimento:** atuar depois da demonstração tecnológica, quando o desafio deixa de ser comprovar a rota e passa a ser financiar a expansão comercial. A participação acionária (*equity*) aporta capital sem transformar todo o investimento em dívida, o que importa num setor pressionado pelo endividamento (seção 6.1);
- **Embrapa e institutos estaduais de pesquisa agronômica:** a vantagem de insumo depende de cultivares de cana e de milho com mais açúcar e amido fermentescíveis por hectare, de zoneamento de risco sob clima mais extremo e da intensificação sobre pastagens degradadas; é a base física do programa;
- **academia e ensino técnico:** operadores de bioprocesso, cepas e purificação são o gargalo que decide se vantagem de insumo vira vantagem de produto. É o papel direto das faculdades de tecnologia e das universidades no programa.

Ter os instrumentos não basta. Eles estão espalhados entre as esferas federal e estadual e entre a política energética e a industrial, cada um com suas regras e prazos. Separados, não levam uma rota da pesquisa à escala industrial, que é a etapa de maior risco. O desafio é articulá-los; por isso, cada instrumento da Tabela 6 tem responsável e prazo, e a coordenação do escalonamento nacional fica com o MDIC e o CNDI. O programa também precisa de indicadores próprios, acompanhados desde o início, que mostrem onde estão os gargalos e permitam ajustar as iniciativas. O volume de etanol redirecionado é um desses indicadores, mas não mede sozinho o sucesso da transição. A receita por tonelada também não: um ácido orgânico ou um bioplástico pode render de três a sete vezes a receita bruta do etanol por tonelada de sacarose (seção 4.2) e, ainda assim, não pagar o capital investido. A transição deve ser avaliada também pela viabilidade econômica de cada rota, isto é, pelo retorno do investimento, e pelas tecnologias e novas cadeias produtivas que ela criar no país.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

10 Conclusão

Três fatos de 2026 abriram este artigo: a produção de etanol trocou de matéria-prima, a mistura chegou a três pontos do teto e, em julho, um em cada três hatches pequenos vendidos foi elétrico. Projetados num modelo de frota, eles indicam que em 2040 a demanda de etanol de automóveis, comerciais leves e motocicletas estará entre 54% e 84% da atual, enquanto a oferta do milho, pela expansão projetada pelo setor, continua a crescer. O excedente, de 14 a 24 bilhões de litros por ano em 2040, resiste às simplificações testadas: rodagem decrescente com a idade, motos elétricas e resposta do consumidor ao preço deixam, no pior caso, um excedente central de 14 bilhões de litros em 2040 (Figura 10). Os três mitigadores de volume — o mix açúcar–etanol, o freio no milho e a mistura no teto — adiam o problema em sete a nove anos; o etanol barato na bomba acrescenta 2 a 4 bilhões de litros em 2040 e é pago com a margem do produtor; somados, os quatro só aproximam o balanço de 2040 do equilíbrio com eletrificação lenta; e frear a eletrificação tampouco resolve, porque o primeiro excedente vem do milho. O planejamento oficial só chega ao equilíbrio supondo, ao mesmo tempo, eletrificação lenta, que os emplacamentos de 2026 já desmentem, e etanol competitivo na bomba, que é pago com a margem do produtor. O tamanho do problema não é decidido por quantos carros o país terá, mas pela velocidade com que eles deixam de queimar etanol.

Nada disso decreta o fim do etanol combustível; decreta o fim do etanol exclusivamente combustível. A resposta proposta parte de uma distinção. O etanol já produzido precisa de mercados além do tanque do carro de passeio, e 2026 mostrou que eles existem: navegação, diesel renovável e querosene de aviação, química e exportação certificada podem absorver de 6 a 18 bilhões de litros por ano em 2040, desde que regras e investimentos se confirmem, e máquinas agrícolas a etanol já estão em teste. O açúcar ainda não fermentado pode virar moléculas cuja receita bruta por tonelada de sacarose é de três a sete vezes a do etanol, potencial que cada produto precisa confirmar em custo e mercado, e esse é o seguro de longo prazo, porque em 2050 o excedente volta a crescer: depois de 2040, os demais usos e os novos destinos ficam constantes no modelo, enquanto a frota segue se eletrificando. Usinas e biorrefinarias de milho reúnem o que essa indústria exige: açúcar ou glicose entre os mais baratos do mundo, energia renovável, CO_2 de fermentação de alta pureza e décadas de fermentação em escala. Narandiba, Triunfo, Castro, Orindiúva, Barra Bonita e Lucas do Rio Verde mostram que as primeiras etapas não esbarram em tecnologia; a Amyris mostra que o maior risco esteve no produto e na execução da planta, e que contratos podem alocá-lo, embora não eliminem o risco biológico e de escalonamento. A escada de risco permite que cada degrau financie o seguinte, desde que o crédito volte a chegar ao setor. São Paulo é o caminho mais curto para provar o modelo; o Centro-Oeste, onde está a maior parte do excedente, é onde ele ganha escala.

Para além dos mecanismos já existentes, é preciso fomentar pesquisas inovadoras em startups e novas empresas, em ecossistemas que estimulem pesquisas de alto risco, sem a preocupação de resultados imediatos.

O maior risco é a demora em decidir: o leilão de baterias de 2026 mostrou que essas janelas se abrem e se fecham em semanas. Por quase um século, a resposta a todo excedente agrícola foi queimá-lo em motores, elevando a mistura; restam só três pontos percentuais. Mas o esgotamento desse instrumento não encerra a vantagem comparativa brasileira: permite emancipá-la. Num mundo sob estresse climático crescente e com cadeias de suprimento vulneráveis, o Brasil reúne condições biofísicas e institucionais raras: ocupava com lavouras menos de 8% do território em 2018, tem dezenas de milhões de hectares de pastagens degradadas com potencial de intensificação sem desmatamento, opera cadeias agroindustriais mecanizadas e se apoia em décadas de ciência tropical desenvolvida pela Embrapa, pelos institutos estaduais e pelas universidades. Convertendo o excedente de sacarose e amido em proteínas, polímeros, moléculas e remoções de carbono, o país deixa de ser apenas exportador de *commodities* exposto a choques de demanda e pode se tornar o porto seguro com o qual outros países contratam suprimento de longo prazo. A destilaria foi o ativo do século XX e continua a sê-lo, agora também para navios, aviões e máquinas; a biorrefinaria integrada de combustíveis, alimentos, moléculas e carbono pode ser o do século XXI. O Brasil tem as duas no mesmo território. A decisão é se usará a primeira para construir a segunda.

Disponibilidade de dados e código

O código do modelo, os dados de entrada e os resultados estão em acesso aberto no Zenodo (https://doi.org/10.5281/zenodo.23889788): o código sob licença MIT e os resultados sob CC BY 4.0. As séries originais pertencem às fontes citadas no texto. Numa cópia limpa do pacote, os resultados e as 14 figuras foram

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

reproduzidos de forma idêntica.

Contribuição dos autores

Papéis segundo a taxonomia CRediT.

- **Alberto Issamu Honda:** Escrita – revisão e edição.
- **Franklin Weise:** Software, Metodologia, Escrita – revisão e edição.
- **Antonio Cesar Dall Evedove:** Escrita – revisão e edição.
- **Carlos Otoboni:** Escrita – revisão e edição.
- **Marcela Campista B. Carvalho:** Escrita – revisão e edição.
- **Igor Polikarpov:** Escrita – revisão e edição.
- **Heitor Cantarella:** Escrita – revisão e edição.
- **Hannes Fischer:** Conceituação, Metodologia, Análise formal, Visualização, Administração do projeto, Escrita – rascunho original, Escrita – revisão e edição.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento

Este trabalho não recebeu financiamento específico.

Uso de inteligência artificial

Na preparação deste trabalho, os autores usaram o Claude (Anthropic), um assistente de inteligência artificial generativa, como apoio na programação e na verificação do modelo, na produção das figuras, na busca e na conferência das fontes e das referências e na redação e revisão do texto. Os autores revisaram e editaram todo o conteúdo e assumem total responsabilidade pelo resultado.

Agradecimentos

Alberto Issamu Honda, Antonio Cesar Dall Evedove, Carlos Otoboni e Hannes Fischer agradecem à Fundação Shunji Nishimura de Tecnologia (FSNT) e ao Centro de Inovação da Alta Paulista (CITAP) por todo o apoio em infraestrutura e condições de trabalho. Antonio Cesar Dall Evedove, Carlos Otoboni e Hannes Fischer agradecem também ao Centro Paula Souza pelo apoio financeiro (salários).

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

Apêndice A – Especificação do modelo

O modelo é dirigido pelo estoque e roda ano a ano de 2026 a 2050, para seis cenários de frota (dois limites de motorização × três taxas de crescimento do PIB per capita) e três trajetórias de eletrificação. Código, dados e resultados estão no repositório indicado na primeira página; as equações abaixo correspondem aos scripts motorizacao.py, calibrar_por_safra.py, projecao_2050.py, motos_projecao.py, trajetorias_analogos.py, etanol_por_segmento.py, balanco_2050.py, sensibilidades_figura10.py, estrategias_setor.py, pde_hiato.py e testes_revisao_rev19.py.

A.1 Motorização. Limite superior (leves): $m^*(y_t) = M \cdot \exp[-\alpha \cdot \exp(-\beta \cdot y_t/100)]$ e $m_t = m_{t-1} + \theta \cdot [m^*(y_t) - m_{t-1}]$, com M = 500 veículos por mil adultos, α = 12,91, β = 2,422 e θ = 0,174 (ajuste a 2000–2025). Na projeção, a curva é reancorada para que 2025 seja ponto de equilíbrio: M é substituído por $M' = M \cdot m_{2025}/m^*(y_{2025}) \approx 425$, com y_{2025} = 142,8 (2000 = 100) e m_{2025} = 283, de modo que $m^*(y_{2025}) = m_{2025}$. Limite inferior: $m_t = m_{2025} \cdot (y_t/y_{2025})^{\varepsilon}$, com ε = 0,08. Motocicletas: a mesma forma de potência, com ε = 0,11 (inferior) e 0,89 (superior), arredondadas para 0,1 e 0,9 no texto. O PIB per capita cresce 1,0%, 1,5% ou 2,0% ao ano.

A.2 Frota-alvo. $F_t = m_t \cdot P_t/1.000$, com P_t a população com 18 anos ou mais (IBGE, 2024).

A.3 Sobrevivência. $S(a) = \exp[-h \cdot a - (a/\lambda)^k]$, idade a = t − c + 1. Automóveis: h = 0,0149, λ = 23,44, k = 16,89; comerciais leves: h = 0,0117, λ = 19,06, k = 7,60; motocicletas: h = 0,0494, λ = 22,64, k = 2,144, com S = 0 acima de 20 anos.

A.4 Vendas. $V_t = [F_t - L_t - \Sigma_{c<t} V_c \cdot S(t - c + 1)]/S(1)$, em que L_t é a frota legada (safras até 2025, reconstruída com as vendas da Anfavea desde 1957 e alinhada à frota de 2025). A fatia diesel das vendas de leves é constante (9,91%).

A.5 Mix das vendas não diesel. Elétricos puros: b_c = quartis, ano a ano, de 2.000 logísticas $L/\{1 + \exp[-k \cdot (c - t_m)]\}$, com k sorteado entre as velocidades observadas em 23 países (metade dos sorteios entre os cinco emergentes e metade entre os outros 18), multiplicado por ruído lognormal (desvio de 0,15 no logaritmo) e limitado inferiormente a 0,02 por ano (piso em que ficam Romênia, Grécia e Taiwan), L uniforme entre 0,75 e 0,95 das vendas não diesel e t_m definido pela partida em jul–set/2026 (10,5% das vendas não diesel), com ruído normal de desvio 0,009. Os quartis são tomados ano a ano e não correspondem, necessariamente, a uma única curva sorteada. Híbridos: $h_c = (1 - b_c) \cdot 0{,}5/\{1 + \exp[-(\ln 16/7) \cdot (c - t_h)]\}$, ancorada em 14,2% das vendas não elétricas de julho de 2026, o que dá $t_h \approx$ 2028,9; ln 16/7 corresponde a sete anos para ir de 20% a 80% do teto de 50%; 67,7% plugáveis. As participações são avaliadas no meio do ano de cada safra (c + 0,5). Combustão flex: $1 - b_c - h_c$.

A.6 Intensidade de etanol por quilômetro. $I_c = \Sigma_j s_{j,c} \cdot \iota_j \cdot e_c$, com ι = 1,00 (flex), 0,62 (híbrido), 0,36 (plugável) e 0 (elétrico), e $e_c = 1 - 0{,}11 \cdot \min\{1; \max[0; (c - 2025)/5]\}$ o ganho de eficiência das safras novas a combustão; $s_{j,c}$ é a participação da motorização j nas vendas não diesel da safra c, na ordem de ι: $1 - b_c - h_c$ (flex), $0{,}323 \cdot h_c$ (híbrido), $0{,}677 \cdot h_c$ (plugável) e b_c (elétrico), do item A.5. A frota legada (safras até 2025) entra com I = 1.

A.7 Demanda. $D_t = [(L_t + \Sigma_{c=2026\ldots t} N_{c,t} \cdot I_c)/L_{2025}] \cdot B_t + D^{motos}{}_t$, em que L_t é a frota legada não diesel (com I = 1) e $N_{c,t}$ o estoque não diesel da safra c no ano t, de modo que o índice vale 1 em 2025. $B_t = H_{2025} + G_{2025} \cdot \tau_t$ é a base de 2025 dos leves, sem as motos: H_{2025} = 20,55 e G_{2025} = 43,50 bilhões de litros (de 21,24 e 46,65 no total), com o teor de anidro τ_t (28,3% em 2025, 30,8% em 2026 e 32% depois, hipótese de continuidade da medida temporária do E32). Automóveis e comerciais leves são acompanhados separadamente, com 10,9% do etanol dos leves nos comerciais leves (MMA; MT, 2025). Motocicletas: $D^{motos}{}_t = (0{,}69 + 3{,}15 \cdot \tau_t) \cdot F^{motos}{}_t / F^{motos}{}_{2025}$, em bilhões de litros, sem ganho de eficiência. PCI_G e as intensidades ι_j ficam fixos entre E28 e E35, como aproximação de primeira ordem. O anidro, base do teste de E35 (+3/32 do anidro), separa o consumo dos veículos que só aceitam gasolina C (plugáveis e a fatia não flex dos híbridos), todo ele anidro; o consumo restante se divide entre hidratado e anidro na proporção da base de 2025.

A.8 Balanço. $X_t = O_t - D_t - U_t$, com oferta $O_t = 27{,}3 + \min[20; 10 + 10 \cdot (t - 2025)/7]$ bilhões de litros e demais usos $U_t = 3{,}0 + 1{,}5 \cdot \min[1; (t - 2025)/15]$, hipótese agregada calibrada por diferença no ano-base.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

A.9 Sensibilidades. Rodagem por idade: cada $N_{c,t}$ passa a ser ponderado pela rodagem anual da idade, $r(t - c + 1)$, e o índice é renormalizado em 2025, com $r(a) = \max[19.390 - 600\cdot(a - 1); 6.000]$ km/ano (Inventário Nacional) ou $r(a) = 17.220 - 2.220\cdot(a - 1)/7$ até 8 anos e 15.000 depois (CETESB). Preço na bomba: $\Delta D_t = \Delta s \cdot E^{flex}_t \cdot (PCI_G/PCI_H - \tau_t)$, em que Δs é a variação da participação do hidratado na energia da frota flex, E^{flex}_t a energia consumida pela frota flex (combustão flex e híbridos flex), em litros de gasolina C equivalente, calculada como o índice de A.7 com intensidades energéticas de 1 (flex) e 5,1/6,6 para os 57% de híbridos flex, a partir de $E^{flex}_{2025} \approx 58$ bilhões de litros (o ciclo Otto dos leves em 2025), e $PCI_G = 29,6$ MJ/L e $PCI_H = 21,3$ MJ/L. Motos elétricas: o estoque a combustão de motos passa a excluir a fração elétrica das vendas de cada safra. Testes adicionais (script testes_revisao_rev19.py): soma aditiva dos três mitigadores de volume e do preço na bomba, nas trajetórias central e lenta; sobrevivência pela Weibull simples $S(a) = \exp[-(a/\lambda)^k]$ ajustada aos mesmos dados (automóveis: $\lambda = 21,48$ e $k = 3,24$; comerciais leves: $\lambda = 17,76$ e $k = 4,03$), com a mesma frota-alvo; plugáveis com intensidade 0,54 ou 0,18 (25% ou 75% da rodagem em modo elétrico); E32 até julho de 2027, com E30 depois; e trajetórias de eletrificação com os emergentes em 5/23 dos sorteios, e não na metade.

A.10 Novos destinos. $X^{ND}_t = X_t - N$, com $N = 12$ bilhões de litros por ano (ponto médio da Tabela 3), constante no tempo e somado às demais respostas nos testes da Figura 13 (parâmetro N do script estrategias_setor.py). Como os mitigadores de oferta (A.8), N é aplicado com valor pleno desde o início do horizonte, o que exagera seu efeito nos primeiros anos; as comparações relevantes são as de 2035 a 2050. Como U_t e N ficam constantes depois de 2040, enquanto a frota segue se eletrificando, o excedente volta a crescer até 2050.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

Referências

ABIPEÇAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE AUTOPEÇAS; SINDIPEÇAS – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Relatório da frota circulante*: edição de 2023. São Paulo, 2023. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2023/05/RelatorioFrotaCirculante_2023.pdf. Acesso em: 11 out. 2026.

ABIPEÇAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE AUTOPEÇAS; SINDIPEÇAS – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Relatório da frota circulante*: edição de 2026. São Paulo, mar. 2026. Disponível em: https://sindipecas.org.br/uploads/documentos/1781782103_R_Frota%20Circulante%202026.pdf. Acesso em: 11 out. 2026.

ABRACICLO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE MOTOCICLETAS, CICLOMOTORES, MOTONETAS, BICICLETAS E SIMILARES. *Anuário da indústria brasileira de duas rodas 2026*. São Paulo, 2026.

ABVE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Eletrificados conquistam 21% de participação de mercado e devem atingir 450 mil em 2026. 11 ago. 2026a. Disponível em: https://abve.org.br/eletrificados-conquistam-21-de-participacao-de-mercado-em-julho-e-devem-passar-de-450-mil-este-ano/. Acesso em: 28 set. 2026.

ABVE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Com 57 mil emplacamentos em agosto, eletrificados abrem a corrida para o milhão em setembro. 9 set. 2026b. Disponível em: https://abve.org.br/com-57-mil-emplacamentos-em-agosto-eletrificados-abrem-a-corrida-para-o-milhao-em-setembro/. Acesso em: 15 out. 2026.

ABVE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Eletrificados leves ultrapassam a marca de 1 milhão de unidades vendidas no Brasil. 8 out. 2026c. Disponível em: https://abve.org.br/eletrificados-leves-ultrapassam-a-marca-de-1-milhao-de-unidades-vendidas-no-brasil/. Acesso em: 15 out. 2026.

AER – AUSTRALIAN ENERGY REGULATOR. *Wholesale electricity market performance report 2026*. Melbourne, 2026. Síntese disponível em: https://www.energy-storage.news/one-market-into-many-aer-says-battery-storage-systems-are-reshaping-australias-nem/. Acesso em: 1 set. 2026.

AGÊNCIA CENÁRIO ENERGIA. CNPE publica resolução do E32 e nova mistura de etanol na gasolina entra em vigor neste sábado. *Cenário Energia*, 31 jul. 2026. Disponível em: https://cenarioenergia.com.br/2026/07/31/cnpe-publica-resolucao-gasolina-e32-etanol-anidro/. Acesso em: 11 out. 2026.

AMYRIS. Amyris takes full ownership of Brazilian industrial fermentation plant and invests in completion of fourth precision fermentation line. Emeryville, 29 maio 2025. Disponível em: https://www.amyris.com/news-insights/amyris-takes-full-ownership-of-brazilian-industrial-fermentation-plant-and-invests-in-completion-of-fourth-precision-fermentation-line. Acesso em: 1 set. 2026.

AMYRIS. Amyris, Inc. launches new production line at Brazil precision fermentation plant. Barra Bonita, 10 mar. 2026. Disponível em: https://amyris.com/news-insights/amyris-inc-launches-new-production-line-at-brazil-precision-fermentation-plant. Acesso em: 22 out. 2026.

ANDERSSON, Christian *et al*. Effect of different carbon sources on the production of succinic acid using metabolically engineered *Escherichia coli*. *Biotechnology Progress*, v. 23, n. 2, p. 381-388, 2007. DOI: https://doi.org/10.1021/bp060301y.

ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Emplacamento de automóveis e comerciais leves*: série anual 1957–2025. São Paulo, 2026a. Base de dados. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/central-de-dados/. Série usada no artigo depositada em: https://doi.org/10.5281/zenodo.23889788 (pasta dados). Acesso em: 11 out. 2026.

ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Emplacamento de veículos leves por combustível*: série anual 2017–2025. São Paulo, 2026b. Base de dados. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/central-de-dados/. Série usada no artigo depositada em: https://doi.org/10.5281/zenodo.23889788 (pasta dados). Acesso em: 11 out. 2026.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Síntese mensal de comercialização de combustíveis*: dezembro de 2019. Brasília, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/sinteses/scc/2019/2019-dezembro-sintese-volume.pdf. Acesso em: 16 out. 2026.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. E32: gasolina com 32% de etanol passa a valer, temporariamente, a partir de amanhã (1/8). Brasília, 31 jul. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/e32-gasolina-com-32-de-etanol-passa-a-valer-temporariamente-a-partir-de-amanha-1-8. Acesso em: 1 set. 2026.

ARGUE, Charlotte. How long do electric car batteries last? The updated guide to real-world EV battery health. *Geotab*, 28 abr. 2026. Disponível em: https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/. Acesso em: 21 out. 2026.

ARGUS MEDIA. Falando de mercado: o potencial do mercado de biobunker. São Paulo, 28 ago. 2024. *Podcast*. Disponível em: https://www.argusmedia.com/pt/news-and-insights/energy-and-commodity-podcasts/falando-de-mercado-o-potencial-do-mercado-de-biobunker. Acesso em: 21 out. 2026.

ARSESP – AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Plantas de biometano*. São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.arsesp.sp.gov.br/Documentosgerais/G%C3%A1s%20no%20transporte_Plantas%20de%20Biometano%202.pdf. Acesso em: 1 set. 2026.

BLOOMBERGNEF. Lithium-ion battery pack prices fall to $108 per kilowatt-hour, despite rising metal prices. Nova York, 9 dez. 2025. Disponível em: https://about.bnef.com/insights/clean-transport/lithium-ion-battery-pack-prices-fall-to-108-per-kilowatt-hour-despite-rising-metal-prices-bloombergnef/. Acesso em: 1 set. 2026.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Bioethanol*: fast track to mobility decarbonization – summary for policy makers. Rio de Janeiro: BNDES; CGEE, 2024.

BOLFE, Édson Luis *et al*. Potential for agricultural expansion in degraded pasture lands in Brazil based on geospatial databases. *Land*, v. 13, n. 2, 200, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/land13020200.

BOMMAREDDY, Rajesh Reddy *et al*. Metabolic network analysis and experimental study of lipid production in *Rhodosporidium toruloides* grown on single and mixed substrates. *Microbial Cell Factories*, v. 14, 36, 2015. DOI: https://doi.org/10.1186/s12934-015-0217-5.

BRASIL. Lei nº 5.764, de 16 de dezembro de 1971. Define a Política Nacional de Cooperativismo, institui o regime jurídico das sociedades cooperativas, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 10354, 16 dez. 1971.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

BRASIL. Lei nº 11.105, de 24 de março de 2005. Regulamenta os incisos II, IV e V do § 1º do art. 225 da Constituição Federal, estabelece normas de segurança e mecanismos de fiscalização de atividades que envolvam organismos geneticamente modificados – OGM e seus derivados, cria o Conselho Nacional de Biossegurança – CNBS, reestrutura a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança – CTNBio, dispõe sobre a Política Nacional de Biossegurança – PNB, revoga a Lei nº 8.974, de 5 de janeiro de 1995, e a Medida Provisória nº 2.191-9, de 23 de agosto de 2001, e os arts. 5º, 6º, 7º, 8º, 9º, 10 e 16 da Lei nº 10.814, de 15 de dezembro de 2003, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 28 mar. 2005.

BRASIL. Decreto nº 11.815, de 5 de dezembro de 2023. Institui o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis e o seu Comitê Gestor Interministerial. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 18, 6 dez. 2023.

BRASIL. Decreto nº 12.044, de 5 de junho de 2024. Institui a Estratégia Nacional de Bioeconomia. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 3, 6 jun. 2024a.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999, 8.723, de 28 de outubro de 1993, e 13.033, de 24 de setembro de 2014; e revoga dispositivo da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 9 out. 2024b.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nºs 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), 6.385, de 7 de dezembro de 1976 (Lei da Comissão de Valores Mobiliários), e 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 4, 12 dez. 2024c.

BRASIL. Decreto nº 13.095, de 12 de agosto de 2026. Regulamenta os art. 26 a art. 29 da Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024, quanto às condições para o exercício das atividades de captura, de transporte por meio de dutos e de estocagem geológica de dióxido de carbono. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 6, 13 ago. 2026.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Nova Indústria Brasil – forte, transformadora e sustentável*: plano de ação para a neoindustrialização 2024–2026. Brasília: MDIC; CNDI, 2024d.

BRASKEM. Braskem inaugura fábrica de eteno verde em Triunfo-RS e assume a liderança global em biopolímeros. Triunfo, 24 set. 2010. Disponível em: https://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/Braskem-inaugura-fabrica-de-eteno-verde-em-Triunfo-RS-e-assume-a-lideranca-global-em-biopolimeros. Acesso em: 1 set. 2026.

BRASKEM. Braskem investe US$ 61 milhões na expansão da produção de biopolímeros. 2021. Disponível em: https://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/braskem-investe-us-61-milhoes-na-expansao-da-producao-de-biopolimeros. Acesso em: 1 set. 2026.

BRAZIL JOURNAL. Raízen ganha adesão de 75% dos credores para recuperação extrajudicial histórica. 29 jun. 2026. Disponível em: https://braziljournal.com/raizen-ganha-adesao-de-75-dos-credores-para-recuperacao-extrajudicial-historica/. Acesso em: 1 set. 2026.

BUSINESSANALYTIQ. HDPE price index. 2026. Disponível em: https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/hdpe-price-index/. Acesso em: 22 out. 2026.

BYD. BYD extends warranty of Blade Battery to eight years or 250,000km. 15 jan. 2026. Disponível em: https://media.byd.com/byd-extends-warranty-of-blade-battery-to-eight-years-or-250000km/. Acesso em: 22 out. 2026.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. *Indicador semanal do etanol anidro CEPEA/ESALQ – São Paulo*. Piracicaba: CEPEA/ESALQ/USP, 2026a. Disponível em: https://www.cepea.org.br/br/indicador/series/etanol.aspx?id=104. Acesso em: 22 out. 2026.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. *Indicador semanal do etanol hidratado combustível CEPEA/ESALQ – São Paulo*. Piracicaba: CEPEA/ESALQ/USP, 2026b. Disponível em: https://www.cepea.org.br/br/indicador/series/etanol.aspx?id=103. Acesso em: 22 out. 2026.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Curvas de intensidade de uso por tipo de veículo automotor da frota da cidade de São Paulo*. São Paulo: CETESB, 2014. Disponível em: https://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/11/2015/02/curvas-intensidade-uso-veiculos-automotores-cidade-sao-paulo.pdf. Acesso em: 16 out. 2026.

CHEMICAL ENGINEERING. Total Corbion JV inaugurates PLA bioplastics plant in Thailand. Set. 2019. Disponível em: https://chemengonline.com/total-corbion-jv-inaugurates-pla-bioplastics-plant-in-thailand. Acesso em: 22 out. 2026.

CLEANTECHNICA. Over 50% of new car registrations in Norway in 2017 = plug-in vehicles or hybrids. 4 jan. 2018. Disponível em: https://cleantechnica.com/2018/01/04/50-new-car-registrations-norway-2017-plug-vehicles-hybrids/. Acesso em: 12 out. 2026.

COMISSÃO EUROPEIA. *Price of CBAM certificates*. Bruxelas, 5 out. 2026. Disponível em: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism/price-cbam-certificates_en. Acesso em: 22 out. 2026.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar*: safra 2025/26, 4º levantamento. Brasília, abr. 2026. Síntese disponível em: https://www.novacana.com/noticias/producao-cana-atinge-673-2-mi-t-em-2025-26-aponta-conab-recorde-etanol-170426. Acesso em: 1 set. 2026.

COPERSUCAR. Grupo Cocal inicia produção de biogás em Narandiba (SP). 5 jul. 2021. Disponível em: https://www.copersucar.com.br/noticias/grupo-cocal-inicia-producao-pioneira-de-biogas-no-brasil/. Acesso em: 1 set. 2026.

DARGAY, Joyce; GATELY, Dermot; SOMMER, Martin. Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960–2030. *The Energy Journal*, v. 28, n. 4, p. 143-170, 2007.

DATAGRO. Exportações brasileiras de etanol registram pior desempenho em oito anos. *Notícias Agrícolas*, jan. 2026. Disponível em: https://www.noticiasagricolas.com.br/noticia/413639. Acesso em: 16 out. 2026.

DCZ – DEUTSCH-CHINESISCHES AGRARZENTRUM. China's 15th Five-Year Plan emphasizes agriculture, food security, and rural development. 13 mar. 2026. Disponível em: https://www.dcz-china.org/2026/03/13/chinas-15th-five-year-plan-emphasizes-agriculture-food-security-and-rural-development/. Acesso em: 1 set. 2026.

DNV. Decision on the IMO Net-Zero Framework delayed for one year. Høvik, 17 out. 2025. Disponível em: https://www.dnv.com/news/2025/decision-on-the-imo-net-zero-framework-delayed-for-one-year/. Acesso em: 21 out. 2026.

EIA – U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Ethanol explained*: use of ethanol. Washington, D.C., 23 fev. 2024. Disponível em: https://www.eia.gov/energyexplained/biofuels/ethanol-use.php. Acesso em: 4 set. 2026.

ELECTRIVE. Study: Kia e-Niro leads battery health ranking after high mileage. 21 jul. 2026. Disponível em: https://electrive.com/2026/07/21/study-kia-e-niro-leads-battery-health-ranking-after-high-mileage. Acesso em: 22 out. 2026.

EMBER. *EV sales tracker*. Londres, 15 out. 2026. Dados mensais de emplacamento por motorização, por país (no Brasil, da Anfavea), licença CC BY 4.0. Disponível em: https://ember-energy.org/data/ev-sales-tracker/. Acesso em: 15 out. 2026.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

EMBRAPA TERRITORIAL. *Agricultura e preservação ambiental*: uma análise do Cadastro Ambiental Rural. Campinas: Embrapa Territorial, 2018. Disponível em: https://www.embrapa.br/web/territorial/car/inicial. Acesso em: 22 out. 2026.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Análise de conjuntura dos biocombustíveis*: ano-base 2024. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-904/NT-EPE-DPG-SDB-2025-06_An%C3%A1lise%20de%20Conjuntura_Ano%20base%202024.pdf. Acesso em: 4 set. 2026.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Demanda de energia dos veículos leves*: 2026–2035. Nota técnica EPE/DPG/SDB/2026/01. Rio de Janeiro, mar. 2026a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-827/NT-EPE-DPG-SDB-2026-01_Demanda%20de%20energia%20VL_2026-2035.pdf. Acesso em: 16 out. 2026.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. LRCAP Armazenamento 2026: EPE registra recorde de projetos cadastrados. Rio de Janeiro, ago. 2026b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/lrcap-armazenamento-2026-epe-registra-recorde-de-projetos-cadastrados. Acesso em: 1 set. 2026.

EPURE – EUROPEAN RENEWABLE ETHANOL. European ethanol producers raise legal challenge to EU maritime legislation. Bruxelas, jan. 2024. Disponível em: https://www.epure.org/press-release/european-ethanol-producers-raise-legal-challenge-to-eu-maritime-legislation/. Acesso em: 21 out. 2026.

EVONIK INDUSTRIES. Evonik's Biolys® plant comes on stream in Castro, Brazil. Essen, 19 jul. 2016. Comunicado à imprensa. Disponível em: https://publications.evonik.com/en/media/press-releases/corporate/attachment/10681?rev=1. Acesso em: 22 out. 2026.

EVONIK INDUSTRIES. Evonik launches updated Biolys® product for animal feeds. Essen, 2 jun. 2023. Comunicado à imprensa. Disponível em: https://www.evonik.com/en/news/press-releases/2023/06/evonik-launches-updated-biolys--product-for-animal-feeds.html. Acesso em: 22 out. 2026.

EXPERT MARKET RESEARCH. *Polyhydroxyalkanoates price trend and forecast 2026-2027*. 16 out. 2026a. Disponível em: https://www.expertmarketresearch.com/price-forecast/polyhydroxyalkanoates-price-trends. Acesso em: 22 out. 2026.

EXPERT MARKET RESEARCH. *Succinic acid price trend and forecast 2026-2027*. 2026b. Disponível em: https://www.expertmarketresearch.com/price-forecast/succinic-acid-price-trends. Acesso em: 22 out. 2026.

FAN, Denise; DAI, Der-Jong; WU, Ho-Shing. Ethylene formation by catalytic dehydration of ethanol with industrial considerations. *Materials*, v. 6, n. 1, p. 101-115, 2013. DOI: https://doi.org/10.3390/ma6010101.

FENABRAVE – FEDERAÇÃO NACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Informativo – Emplacamentos*: julho de 2026. São Paulo, ed. 283, ago. 2026. Disponível em: https://www.fenabrave.org.br/portal/files/2026_07_02.pdf. Acesso em: 22 out. 2026.

FERREIRA, Rafael da Gama; AZZONI, Adriano Rodrigues; FREITAS, Sindelia. Techno-economic analysis of the industrial production of a low-cost enzyme using *E. coli*: the case of recombinant β-glucosidase. *Biotechnology for Biofuels*, v. 11, n. 1, 81, 2018. DOI: https://doi.org/10.1186/s13068-018-1077-0.

FIGUEIREDO, Maria Júlia de. Petrobras aprova US$ 1,2 bilhão em projeto de biorrefino em Cubatão. *Times Brasil*, São Paulo, 22 jun. 2026. Disponível em: https://timesbrasil.com.br/brasil/petrobras-aprova-us-12-bilhao-em-projeto-de-biorrefino-em-cubatao/. Acesso em: 12 out. 2026.

FIPE – FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS. *Preço médio de veículos*: tabela de outubro de 2026. São Paulo, 2026. Base de dados. Disponível em: https://veiculos.fipe.org.br/. Acesso em: 21 out. 2026.

FONSECA, Gustavo Graciano *et al*. Physiology of the yeast *Kluyveromyces marxianus* during batch and chemostat cultures with glucose as the sole carbon source. *FEMS Yeast Research*, v. 7, n. 3, p. 422-435, 2007. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1567-1364.2006.00192.x.

FORBES BRASIL. FS vende 10 mil créditos de remoção de carbono para trading global Freepoint Europe. *Forbes Agro*, 19 jun. 2026. Com Reuters. Disponível em: https://forbes.com.br/forbes-agro/2026/06/fs-vende-10-mil-creditos-de-remocao-de-carbono-para-trading-global-freepoint-europe/. Acesso em: 16 out. 2026.

GAO – U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. *Decarbonization*: status, challenges, and policy options for carbon capture, utilization, and storage. GAO-22-105274. Washington, D.C., set. 2022.

GASPER, Paul *et al*. Degradation and modeling of large-format commercial lithium-ion cells as a function of chemistry, design, and aging conditions. *Journal of Energy Storage*, v. 73, 109042, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109042.

GESLIN, Alexis *et al*. Dynamic cycling enhances battery lifetime. *Nature Energy*, v. 10, n. 2, p. 172-180, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41560-024-01675-8.

GFI EUROPE – GOOD FOOD INSTITUTE EUROPE; ARTHUR D. LITTLE. *Pathfinding towards precision fermentation viability*. [S. l.]: GFI Europe, jul. 2025. Disponível em: https://gfieurope.org/wp-content/uploads/2025/07/Pathfinding-towards-precision-fermentation-viability.pdf. Acesso em: 22 out. 2026.

GOOD FOOD INSTITUTE. *Driving down costs*: insights and recommendations from a meta-analysis of techno-economic models of fermentation-derived ingredients. Washington, D.C.: GFI, jun. 2025. DOI: https://doi.org/10.62468/trxj5734. Disponível em: https://gfi.org/wp-content/uploads/2025/06/Driving-down-costs-Insights-and-recommendations-from-a-meta-analysis-of-techno-economic-models-of-fermentation-derived-ingredients.pdf. Acesso em: 22 out. 2026.

HOEK, Pim van *et al*. Fermentative capacity in high-cell-density fed-batch cultures of baker's yeast. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 68, n. 5, p. 517-523, 2000. DOI: https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(20000605)68:5\<517::AID-BIT5>3.0.CO;2-O.

HRISTAKEVA, Sylvia; LIAUKONYTE, Jura; FELER, Leo. The No-Hunger Games: how GLP-1 medication adoption is changing consumer food demand. *Journal of Marketing Research*, v. 63, n. 3, p. 427-444, 2026. DOI: https://doi.org/10.1177/00222437251412834.

HYDROCARBON PROCESSING. Braskem and SCG Chemicals join forces for bio-based ethylene project in Thailand. 17 ago. 2023. Disponível em: https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2023/08/braskem-and-scg-chemicals-join-forces-for-bio-based-ethylene-project-in-thailand/. Acesso em: 22 out. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Projeção da população do Brasil e Unidades da Federação por sexo e idade para o período 2000-2070*: edição 2024. Rio de Janeiro, 2024. Dados acessados via DATASUS/TABNET. Disponível em: http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?ibge/cnv/projpop2024uf.def. Acesso em: 11 out. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Tabela 6784: produto interno bruto, produto interno bruto per capita, população residente e deflator. *In*: SIDRA: Sistema IBGE de Recuperação Automática. Rio de Janeiro, [2025]. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6784. Acesso em: 11 out. 2026.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2025*: trends in electric car markets. Paris: IEA, 2025. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/trends-in-electric-car-markets-2. Acesso em: 12 out. 2026.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

IEA BIOENERGY TASK 39. *Sustainable fuels for land transport*: technical conclusions from the Industry Hearing. São Paulo, set. 2026a. Versão preliminar para revisão (consolidated technical second order draft for review). Documento não publicado.

IEA BIOENERGY TASK 39. *Industry Hearing on Biofuels for Land Transport*: analytical report. [*S. l.*], 2026b. Disponível em: https://task39.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/37/2026/10/Industry_Hearing_Analytical_Report_Final_300926.pdf. Acesso em: 21 out. 2026.

IEA BIOENERGY TASK 39. *Final consolidated barriers and solutions for sustainable biofuels in land transport*. [*S. l.*], set. 2026c. Disponível em: https://task39.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/37/2026/09/Final_Consolidated_Barriers_and_Solutions_Task39-250926.pdf. Acesso em: 21 out. 2026.

IFPRI – INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE. Food export restrictions have eased as the Russia-Ukraine war continues, but concerns remain for key commodities. Washington, D.C., 2023. Disponível em: https://www.ifpri.org/blog/food-export-restrictions-have-eased-russia-ukraine-war-continues-concerns-remain-key/. Acesso em: 16 out. 2026.

IMARC GROUP. *Polyethylene (PE) price index, chart, trend & forecast*. 2025. Disponível em: https://www.imarcgroup.com/polyethylene-pricing-report. Acesso em: 22 out. 2026.

IMARC GROUP. *Citric acid prices 2026*: current trend, chart & forecast. 2026a. Disponível em: https://www.imarcgroup.com/citric-acid-pricing-report. Acesso em: 22 out. 2026.

IMARC GROUP. *Lactic acid prices 2026*: index, trends and forecast. 2026b. Disponível em: https://www.imarcgroup.com/lactic-acid-pricing-report. Acesso em: 22 out. 2026.

IMARC GROUP. *Polyhydroxyalkanoates (PHA) prices, trend, index & forecast 2026*. 2026c. Disponível em: https://www.imarcgroup.com/polyhydroxyalkanoates-pricing-report. Acesso em: 22 out. 2026.

IMARC GROUP. *Succinic acid prices, chart, trend, index and forecast*. 2026d. Disponível em: https://www.imarcgroup.com/succinic-acid-pricing-report. Acesso em: 22 out. 2026.

INFOMONEY. Agro atinge recorde de 1.990 pedidos de recuperação judicial em 2025, diz Serasa. 9 mar. 2026. Disponível em: https://www.infomoney.com.br/brasil/agro-atinge-recorde-de-1-990-pedidos-de-recuperacao-judicial-em-2025-diz-serasa/. Acesso em: 1 set. 2026.

INPASA. Inpasa anuncia nova biorrefinaria em Rondonópolis (MT) e ampliação em Nova Mutum, somando R$ 3,48 bilhões em investimentos no estado. 18 dez. 2025. Disponível em: https://www.inpasa.com.br/sala-de-imprensa/inpasa-anuncia-nova-biorrefinaria-em-rondonopolis-mt-e-ampliacao-em-nova-mutum-somando-r-3-48-bilhoes-em-investimentos-no-estado/1058016. Acesso em: 1 set. 2026.

INSIDEEVS. Average Tesla Model 3, Model Y battery capacity degradation after 200,000 miles impresses. 19 jun. 2024. Disponível em: https://insideevs.com/news/723734/tesla-model-3y-battery-capacity-degradation-200000miles/. Acesso em: 21 out. 2026.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY; METHANOL INSTITUTE. *Innovation outlook*: renewable methanol. Abu Dhabi: IRENA, 2021.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY; AEA – AMMONIA ENERGY ASSOCIATION. *Innovation outlook*: renewable ammonia. Abu Dhabi: IRENA; Brooklyn: AEA, 2022.

KIM, Beom Soo *et al.* Production of poly(3-hydroxybutyric acid) by fed-batch culture of *Alcaligenes eutrophus* with glucose concentration control. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 43, n. 9, p. 892-898, 1994. DOI: https://doi.org/10.1002/bit.260430908.

LEE, Jeong Wook *et al.* Homo-succinic acid production by metabolically engineered *Mannheimia succiniciproducens*. *Metabolic Engineering*, v. 38, p. 409-417, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymben.2016.10.004.

LEGISWEB. Retomada de tributação para veículos eletrificados é oficializada pelo DOU. 28 nov. 2023. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/noticia/?id=28038. Acesso em: 15 out. 2026.

MACHADO, Nayara. Petrobras certifica refinaria no Corsia para produção de SAF coprocessado. *eixos*, 15 out. 2025. Disponível em: https://eixos.com.br/combustiveis-e-bioenergia/petrobras-certifica-refinaria-no-corsia-para-producao-de-saf-coprocessado/. Acesso em: 12 out. 2026.

MANANDHAR, Ashish; SHAH, Ajay. Techno-economic analysis of bio-based lactic acid production utilizing corn grain as feedstock. *Processes*, v. 8, n. 2, 199, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/pr8020199.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Secretaria de Política Agrícola. Departamento da Cana-de-Açúcar e Agroenergia. *Mistura carburante (etanol anidro–gasolina)*: cronologia. Brasília, 8 fev. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos/cronologia-da-mistura-carburante-etanol-anidro-gasolina-no-brasil.pdf/@@download/file. Acesso em: 16 out. 2026.

MAX, Belén *et al.* Biotechnological production of citric acid. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 41, n. 4, p. 862-875, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000400005.

MERA, Zamir; BIEKER, Georg; REBOUÇAS, Ana Beatriz; CIEPLINSKI, André. *Comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars in Brazil*. Washington, D.C.: International Council on Clean Transportation, out. 2023. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Brazil-LDV-LCA-report-A4-v7.pdf. Acesso em: 22 out. 2026.

METRÓPOLES. Pedidos de recuperação judicial no agro sobem 21,9% no 1º trimestre. 12 ago. 2026. Disponível em: https://www.metropoles.com/brasil/pedidos-de-recuperacao-judicial-no-agro-sobem-219-no-1o-trimestre. Acesso em: 1 set. 2026.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013*: ano-base 2012. Brasília: MMA, 2014.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA; MT – MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. *Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2025*: ano-base 2024. Brasília: MMA; MT, dez. 2025.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Portaria Normativa MME nº 136, de 1º de junho de 2026. Estabelece as Diretrizes e a Sistemática para a realização dos Leilões para Contratação de Potência Elétrica, a partir de novos sistemas de armazenamento de energia em baterias, denominados “Leilão de Reserva de Capacidade na forma de Potência, por meio de novos sistemas de armazenamento de energia em baterias com conteúdo nacional, de 2026 – LRCAP de 2026 – Armazenamento Nacional” e “Leilão de Reserva de Capacidade na forma de Potência, por meio de novos sistemas de armazenamento de energia em baterias, de 2026 – LRCAP de 2026 – Armazenamento”. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, ed. 103, p. 98, 3 jun. 2026. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-normativa-mme-n-136-de-1-de-junho-de-2026-710152085. Acesso em: 22 out. 2026.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2035*: caderno de oferta de biocombustíveis. Brasília; Rio de Janeiro, set. 2025a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-894/CA-EPE-DPG-SDB-2025-08_Caderno%20de%20Oferta%20de%20Biocombust%C3%ADveis_PDE2035_Final%20(20102025).pdf. Acesso em: 22 out. 2026.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2035*: caderno de eletromobilidade – transporte rodoviário. Brasília; Rio de Janeiro, nov. 2025b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-894/PDE%202035_Caderno%20de%20Eletromobilidade.pdf. Acesso em: 22 out. 2026.

MMMC – MÆRSK MC-KINNEY MØLLER CENTER FOR ZERO CARBON SHIPPING. Countdown: questions facing the IMO before MEPC 85. Copenhague, 23 set. 2026a. Disponível em: https://www.zerocarbonshipping.com/news/countdown-questions-facing-the-imo-before-mepc-85. Acesso em: 22 out. 2026.

MMMC – MÆRSK MC-KINNEY MØLLER CENTER FOR ZERO CARBON SHIPPING. *Ethanol as a marine fuel*: exploring its usability. Copenhague, out. 2026b. Síntese disponível em: https://www.agri-pulse.com/articles/25356-ethanol-a-promising-for-methanol-powered-vessels-study-says. Acesso em: 21 out. 2026.

MOVIMENTO ECONÔMICO. Anfavea projeta vendas de 3 milhões de veículos, mas já vê chineses no retrovisor. 7 jul. 2026. Disponível em: https://movimentoeconomico.com.br/montadoras/2026/07/07/anfavea-projeta-vendas-de-3-milhoes-de-veiculos-mas-ja-ve-chineses-no-retrovisor/. Acesso em: 12 out. 2026.

MYLLYVIRTA, Lauri. Analysis: China's CO2 emissions fall in Q2 2026 due to plummeting oil use. *Carbon Brief*, 3 set. 2026. Disponível em: https://www.carbonbrief.org/analysis-chinas-co2-emissions-fall-in-q2-2026-due-to-plummeting-oil-use. Acesso em: 3 set. 2026.

NEOFEED. Da safrinha ao bilhão: como o milho virou combustível de um meganegócio. 21 nov. 2025. Disponível em: https://neofeed.com.br/negocios/da-safrinha-ao-bilhao-como-o-milho-virou-combustivel-de-um-meganegocio/. Acesso em: 1 set. 2026.

NGUYEN-TIEN, Viet *et al*. The closing longevity gap between battery electric vehicles and internal combustion vehicles in Great Britain. *Nature Energy*, v. 10, n. 3, p. 354-364, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41560-024-01698-1.

NOVA-INSTITUTE. *Bio-based building blocks and polymers*: global capacities, production and trends 2024–2029. Hürth: nova-Institute, 2025.

NOVACANA. Unem prevê exportação de 1,5 milhão de toneladas de DDG/DDGS em 2025. 1 out. 2025a. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/unem-preve-exportacao-1-5-milhao-toneladas-ddg-ddgs-2025-011025. Acesso em: 16 out. 2026.

NOVACANA. FS anuncia primeiras transações de créditos de carbono com BECCS no Brasil. 1 set. 2025b. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/fs-anuncia-primeiras-transacoes-creditos-carbono-beccs-brasil-010925. Acesso em: 16 out. 2026.

NOVACANA. JetBio garante área em Paulínia (SP) para construir planta de SAF a partir de etanol. 8 jun. 2026a. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/jetbio-garante-area-paulinia-construir-planta-saf-etanol-080626. Acesso em: 21 out. 2026.

NOVACANA. Etanol na navegação pode abrir mercado de até 30 bilhões de litros, avalia SCA Brasil. Com informações do Portal do Agronegócio. 16 out. 2026b. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/etanol-na-navegacao-pode-abrir-mercado-de-ate-30-bilhoes-de-litros-avalia-sca-brasil. Acesso em: 21 out. 2026.

O TEMPO. Hyundai HB20 vai sair de linha no Brasil? Entenda os detalhes. Belo Horizonte, 7 set. 2026. Disponível em: https://www.otempo.com.br/autotempo/2026/9/7/hyundai-hb20-vai-sair-de-linha-no-brasil. Acesso em: 16 out. 2026.

ONDEI, Vera. Agrishow 2026: do trator à colhedora, o etanol avança como alternativa ao diesel no campo. *Forbes Agro*, 1 maio 2026. Disponível em: https://forbes.com.br/forbes-agro/2026/05/agrishow-2026-do-trator-a-colhedora-o-etanol-avanca-como-alternativa-ao-diesel-no-campo/. Acesso em: 21 out. 2026.

PEREIRA, Daiane Barão *et al*. Precision fermentation as a frontier in biofuel production: advances, challenges, and integration into biorefineries. *Fermentation*, v. 12, n. 1, 35, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/fermentation12010035.

RAMOS, Camila Souza. Maersk realiza seu primeiro abastecimento comercial de navio com etanol. *Globo Rural*, reproduzido por *NovaCana*, 21 out. 2026. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/maersk-realiza-seu-primeiro-abastecimento-comercial-de-navio-com-etanol. Acesso em: 21 out. 2026.

RCGI – CENTRO DE PESQUISA PARA INOVAÇÃO EM GASES DE EFEITO ESTUFA. USP realiza testes da primeira planta de hidrogênio renovável a partir do etanol. São Paulo, 2025. Disponível em: https://sites.usp.br/rcgi/?p=50956. Acesso em: 16 out. 2026.

RECURRENT. Used Nissan Leaf range & battery health (real-world data). [*S. l.*], 2026. Disponível em: https://www.recurrentauto.com/guides/nissan-leaf. Acesso em: 21 out. 2026.

REUTERS. Biotech firm Amyris files for bankruptcy in US. *Investing.com*, 10 ago. 2023. Disponível em: https://www.investing.com/news/stock-market-news/biotech-firm-amyris-files-for-bankruptcy-in-us-3150585. Acesso em: 12 out. 2026.

RINALDI, Renold. Government targets full domestic supply for E10 biofuel by 2027, partners with Brazil. *Indonesia Business Post*, Jacarta, 24 out. 2025. Disponível em: https://indonesiabusinesspost.com/5521/policy/government-targets-full-domestic-supply-for-e10-biofuel-by-2027-partners-with-brazil. Acesso em: 15 out. 2026.

RODRIGUES, Eduardo. Motor diesel flex, que também aceita etanol e tem mais de 2.800 cv, já está em testes. *AutoPapo*, 26 jun. 2025. Disponível em: https://autopapo.com.br/noticia/motor-cummins-diesel-flex/. Acesso em: 21 out. 2026.

ROSSELL, Carlos Eduardo Vaz *et al*. Production of biodegradable plastic (PHB), sugar and ethanol in a sugar mill. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, v. 24, p. 306-309, 2001. Disponível em: https://dochub.sasri.org.za/items/0d2b68e2-5d5f-4738-a765-8df3b4187b06/full. Acesso em: 22 out. 2026.

RPANEWS. CBIOs atingem nova mínima histórica e mercado passa a ser guiado por fundamentos, aponta análise. 19 maio 2026. Disponível em: https://revistarpanews.com.br/cbios-atingem-nova-minima-historica-e-mercado-passa-a-ser-guiado-por-fundamentos-aponta-analise/. Acesso em: 1 set. 2026.

S&P GLOBAL. Petrobras selects Honeywell ethanol-to-jet technology for SAF project at REPLAN refinery. 16 abr. 2026. Disponível em: https://www.spglobal.com/energy/en/news-research/latest-news/agriculture/041526-petrobras-selects-honeywell-ethanol-to-jet-technology-for-saf-project-at-replan-refinery. Acesso em: 1 set. 2026.

SAAVEDRA DEL OSO, M.; MAURICIO-IGLESIAS, M.; HOSPIDO, A. Evaluation and optimization of the environmental performance of PHA downstream processing. *Chemical Engineering Journal*, v. 412, 127687, maio 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127687.

SAMORA, Roberto. Vendas de diesel e gasolina atingiram recordes no Brasil em 2025, aponta ANP. *NovaCana*, 30 jan. 2026. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/vendas-diesel-gasolina-atingiram-recordes-brasil-2025-anp-300126. Acesso em: 11 out. 2026.

SANCHEZ, Daniel L.; JOHNSON, Nils; MCCOY, Sean T.; TURNER, Peter A.; MACH, Katharine J. Near-term deployment of carbon capture and sequestration from biorefineries in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 115, n. 19, p. 4875-4880, 2018. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1719695115.

SCG CHEMICALS. Braskem Siam, SCGC–Braskem joint venture, selected by BOI for Thailand FastPass. 19 dez. 2025. Disponível em: https://www.scgchemicals.com/en/articles/news/1766135665. Acesso em: 22 out. 2026.

SciELO Preprints - Este documento é um preprint e sua situação atual está disponível em: https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.18716

SIRACUSA, Valentina; BLANCO, Ignazio. Bio-polyethylene (Bio-PE), bio-polypropylene (Bio-PP) and bio-poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. *Polymers*, v. 12, n. 8, 1641, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/polym12081641.

SOUZA, Glaucia Mendes; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; ROSSETTO, Raffaella. *The role of bioethanol in sustainable mobility, social and economic development*. [*S. l.*]: Fundação Toyota, nov. 2025. Factsheet.

TAI, Mitchell; STEPHANOPOULOS, Gregory. Engineering the push and pull of lipid biosynthesis in oleaginous yeast *Yarrowia lipolytica* for biofuel production. *Metabolic Engineering*, v. 15, p. 1-9, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymben.2012.08.007.

TEIXEIRA, Marcelo. Déficit no mercado global de açúcar deve crescer acentuadamente, diz Green Pool. *Reuters*, reproduzido por *NovaCana*, 20 out. 2026. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/deficit-no-mercado-global-de-acucar-deve-crescer-acentuadamente-diz-green-pool. Acesso em: 21 out. 2026.

THE AGRIBIZ. China's food self-sufficiency push threatens demand for Brazil's exports. 10 jun. 2026. Disponível em: https://www.theagribiz.com/international/chinas-food-self-sufficiency-push-threatens-demand-for-brazils-exports/. Acesso em: 1 set. 2026.

TIAN, Xiwei *et al.* Metabolic engineering coupled with adaptive evolution strategies for the efficient production of high-quality L-lactic acid by *Lactobacillus paracasei*. *Bioresource Technology*, v. 323, 124549, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124549.

UDOP – UNIÃO NACIONAL DA BIOENERGIA. Biocombustível: BNDES aprova R$ 384,3 mi para projeto inovador de estocagem de CO2 da FS. 10 dez. 2025. Disponível em: https://www.udop.com.br/noticia/2025/12/10/biocombustivel-bndes-aprova-r-384-3-mi-para-projeto-inovador-de-estocagem-de-co2-da-fs. Acesso em: 16 out. 2026.

UNEM – UNIÃO NACIONAL DO ETANOL DE MILHO. Produção de etanol de milho dispara e deve superar 25% do total em 2025. *NovaCana*, 23 jun. 2025. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/producao-etanol-milho-dispara-superar-25-total-2025-unem-230625. Acesso em: 1 set. 2026.

UNEM – UNIÃO NACIONAL DO ETANOL DE MILHO. Etanol de milho brasileiro deve atingir 10 bilhões de litros em 2025/26, diz Unem. *NovaCana*, 10 fev. 2026. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/etanol-milho-brasileiro-atingir-10-bilhoes-litros-2025-26-unem-100226. Acesso em: 1 set. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2023/1115 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 31 de maio de 2023, relativo à disponibilização no mercado da União e à exportação para fora da União de determinados produtos de base e produtos associados à desflorestação e à degradação florestal. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 150, p. 206-247, 9 jun. 2023a.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2023/1805 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de setembro de 2023, relativo à utilização de combustíveis renováveis e hipocarbónicos nos transportes marítimos (FuelEU Maritime). *Jornal Oficial da União Europeia*, L 234, 22 set. 2023b.

UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA. Esclarecimentos sobre notificação enviada ao CONSECANA-SP. São Paulo, 30 maio 2025. Disponível em: https://www.novacana.com/pdf/02062025090626_Unica_-*Comunicado*-_Consecana_NC.pdf. Acesso em: 22 out. 2026.

UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA. Centro-Sul fecha safra com 611 mi t de cana e foco no etanol. São Paulo, 30 abr. 2026. Disponível em: https://unica.com.br/noticias/centro-sul-fecha-safra-com-611-mi-t-de-cana-e-foco-no-etanol/. Acesso em: 1 set. 2026.

VALIM, Carlos Eduardo. JetBio vai produzir diesel de etanol em biorrefinaria de US$ 2 bi em SP. *O Estado de S. Paulo*, São Paulo, 10 out. 2026. Negócios, p. B4.

VISÃO AGRO. Custo para produção de etanol sobe para a cana e cai para o milho, aponta BTG Pactual. 7 abr. 2025. Disponível em: https://visaoagro.com.br/custo-para-producao-de-etanol-sobe-para-a-cana-e-cai-para-o-milho-aponta-btg-pactual/. Acesso em: 21 out. 2026.

WORLD BANK. *Commodity price data (The Pink Sheet)*: monthly prices. Washington, DC, 2 out. 2026. Disponível em: https://thedocs.worldbank.org/en/doc/74e8be41ceb20fa0da750cda2f6b9e4e-0050012026/related/CMO-Historical-Data-Monthly.xlsx. Acesso em: 22 out. 2026.

WORLD GRAIN. Corbion acquires Bunge's stake in joint venture. 5 jun. 2018. Disponível em: https://www.world-grain.com/articles/10467-corbion-acquires-bunge-s-stake-in-joint-venture. Acesso em: 22 out. 2026.

XP INVESTIMENTOS. Raízen e a recuperação extrajudicial: o que está em jogo para credores e acionistas. 3 jun. 2026. Disponível em: https://conteudos.xpi.com.br/renda-fixa/relatorios/raizen-e-a-recuperacao-extrajudicial-o-que-esta-em-jogo-para-credores-e-acionistas/. Acesso em: 1 set. 2026.

XU, Ke; XU, Ping. Efficient production of L-lactic acid using co-feeding strategy based on cane molasses/glucose carbon sources. *Bioresource Technology*, v. 153, p. 23-29, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.057.

YU, Rujie *et al.* Life cycle CO_2 emissions for the new energy vehicles in China drawing on the reshaped survival pattern. *Science of the Total Environment*, v. 826, 154102, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154102.

ZERBINATO, Alexandre. Elétricos com mais de 3 anos de idade desvalorizam mais de 46%, diz estudo. *CNN Brasil*, 6 jul. 2026. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/auto/eletricos-com-mais-de-3-anos-de-idade-desvalorizam-mais-de-46-diz-estudo/. Acesso em: 21 out. 2026.

ZHANG, Daphne; JACKSON, Lewis. Chinese pigs fed new menu as Beijing weans farmers off US soy. *Reuters*, reproduzido por *Global Banking & Finance Review*, 7 abr. 2026. Disponível em: https://www.globalbankingandfinance.com/chinese-pigs-fed-new-menu-beijing-weans-farmers-off-us-soy/. Acesso em: 22 out. 2026.

Este preprint foi submetido sob as seguintes condições:

- Os autores declaram que os necessários Termos de Consentimento Livre e Esclarecido de participantes ou pacientes na pesquisa foram obtidos e estão descritos no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que a elaboração do manuscrito seguiu as normas éticas de comunicação científica.
- Os autores declaram que estão cientes que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do preprint e que o depósito no SciELO Preprints não significa nenhum compromisso de parte do SciELO, exceto sua preservação e disseminação.
- Os autores declaram que os dados, aplicativos e outros conteúdos subjacentes ao manuscrito estão referenciados.
- O manuscrito depositado está no formato PDF.
- Os autores declaram que a pesquisa que deu origem ao manuscrito seguiu as boas práticas éticas e que as necessárias aprovações de comitês de ética de pesquisa, quando aplicável, estão descritas no manuscrito.
- Os autores declaram que uma vez que um manuscrito é postado no servidor SciELO Preprints, o mesmo só poderá ser retirado mediante pedido à Secretaria Editorial do SciELO Preprints, que afixará um aviso de retratação no seu lugar.
- Os autores concordam que o manuscrito aprovado será disponibilizado sob licença Creative Commons CC-BY.
- O autor submissor declara que as contribuições de todos os autores e declaração de conflito de interesses estão incluídas de maneira explícita e em seções específicas do manuscrito.
- Os autores declaram que o manuscrito não foi depositado e/ou disponibilizado previamente em outro servidor de preprints ou publicado em um periódico.
- Caso o manuscrito esteja em processo de avaliação ou sendo preparado para publicação mas ainda não publicado por um periódico, os autores declaram que receberam autorização do periódico para realizar este depósito.
- O autor submissor declara que todos os autores do manuscrito concordam com a submissão ao SciELO Preprints.