

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS

GABRIEL MACHADO SANTOS

**OS ENTRAVES PARA O DESENVOLVIMENTO DO ETANOL DE SEGUNDA
GERAÇÃO NO BRASIL**

Uberlândia

2026

GABRIEL MACHADO SANTOS

**OS ENTRAVES PARA O DESENVOLVIMENTO DO ETANOL DE SEGUNDA
GERAÇÃO NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Economia e
Relações Internacionais da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel
em ciências econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Bruno
Benzaquen Perosa

Uberlândia

2026

GABRIEL MACHADO SANTOS

**OS ENTRAVES PARA O DESENVOLVIMENTO DO ETANOL DE SEGUNDA
GERAÇÃO NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Economia e
Relações Internacionais da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel
em ciências econômicas.

Uberlândia, ____ de _____ de 2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Bruno Benzaquen Perosa
Orientador – IERI-PPGE/UFU

Prof. Dr. Clésio Marcelino de Jesus
Avaliador – IERI-PPGE/UFU

Prof. Dr. Cássio Garcia Ribeiro Soares da Silva
Avaliador – IERI-PPGE/UFU

RESUMO

Este trabalho analisa por que o etanol de segunda geração (E2G) ainda não alcançou competitividade de custos no Brasil, apesar da infraestrutura, do conhecimento produtivo e do mercado construídos pelo etanol de primeira geração (E1G). A pesquisa, de natureza qualitativa, exploratória e documental, combina revisão bibliográfica sobre Nova Economia Institucional e dependência da trajetória com análise descritiva de dados secundários da ANP, EPE, Conab, BNDES, Anfavea e documentos empresariais. Os resultados mostram um efeito institucional duplo: a trajetória do E1G oferece ativos, logística, regulação e uma frota flex compatíveis com o E2G, mas também reforça a preferência por uma rota madura, de menor risco e retorno mais previsível. O principal entrave decorre da interação entre complexidade tecnológica, investimento inicial e coordenação institucional. Na referência utilizada, o investimento estimado é de R\$ 16,92 por litro anual de capacidade para o E2G, ante R\$ 3,99 para a expansão agregada do E1G. As estimativas de despesas operacionais têm escopos distintos e não autorizam comparação isolada, embora enzimas, manutenção e instabilidade operacional permaneçam críticas. Conclui-se que a difusão do E2G exige maior confiabilidade de processo, redução do investimento inicial, desenvolvimento de fornecedores nacionais, mecanismos estáveis de compartilhamento de risco e contratos de demanda. O combustível sustentável de aviação pode ampliar o valor da rota celulósica, mas constitui oportunidade potencial, não solução garantida.

Palavras-chave: etanol de segunda geração; dependência da trajetória; setor sucroenergético; transição energética; bioeconomia.

ABSTRACT

This study examines why second-generation ethanol (E2G) has not yet achieved cost competitiveness in Brazil despite the infrastructure, productive knowledge, and market created by first-generation ethanol (E1G). The qualitative, exploratory, and documentary research combines a literature review on New Institutional Economics and *path dependence* with a descriptive analysis of secondary data from ANP, EPE, Conab, BNDES, Anfavea, and corporate documents. The findings reveal a dual institutional effect: the E1G trajectory provides assets, logistics, regulation, and a flex-fuel fleet compatible with E2G, while reinforcing preference for a mature route with lower risk and more predictable returns. The main constraint results from the interaction between technological complexity, initial investment, and institutional coordination. In the reference adopted, estimated investment is R\$ 16.92 per liter of annual E2G capacity, compared with R\$ 3.99 for aggregated E1G expansion. Operating expenditure estimates have different scopes and do not support an isolated comparison, although enzymes, maintenance, and operational instability remain critical. The study concludes that E2G diffusion requires greater process reliability, lower initial investment, domestic supplier development, stable *risk-sharing* mechanisms, and demand contracts. Sustainable aviation fuel may increase the value of the cellulosic route, but it is a potential opportunity rather than a guaranteed solution. Keywords: second-generation ethanol; *path dependence*; sugarcane industry; energy transition; bioeconomy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 – Produção de etanol no Brasil por tipo	11
Gráfico 2 – Emplacamento de veículos no Brasil	12
Gráfico 3 – Área plantada de cana-de-açúcar no Brasil	14
Figura 1 – Integração das rotas de primeira e segunda geração: etanol 1,5G	17
Tabela 1 – Parâmetros de investimento e operação por rota produtiva	24
Gráfico 4 – Volume de crédito contratado pelo setor de etanol pelo BNDES	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	O SUCESSO DO ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO NO BRASIL: TRAJETÓRIA INSTITUCIONAL E PATH DEPENDENCE	8
2.1	A Economia Institucional e o Path Dependence	8
2.2	Contexto Histórico: O Programa Nacional do Alcool (1975-1990)	9
2.3	A Era Flex-Fuel e a Consolidação do Setor (2003-presente)	12
3	O POTENCIAL DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO	14
3.1	Desafios Contemporâneos e a Necessidade de Inovação	14
3.2	Vantagens Competitivas e os Limites da Primeira Geração (E1G)	15
3.3	Economias de Escopo das Usinas Integradas: O etanol 1,5G	16
4	GARGALOS TECNOLÓGICOS, INSTITUCIONAIS E ECONÔMICOS PARA O AVANÇO DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO NO BRASIL	18
4.1	O Cenário Global: Fracassos Econômicos e Lições das Plantas Pioneiras 18	
4.2	Gargalos Tecnológicos	19
4.3	Gargalos Institucionais	20
4.4	Gargalos Econômico-Financeiros	22
4.4.1	Estrutura de custos: CAPEX como principal barreira	23
4.4.2	Custos Operacionais: A questão das enzimas e outros insumos	24
4.4.3	Dependência de Financiamento Público e Insuficiência de Capital Privado ..	25
4.4.4	Escala de Produção e Barreiras à Massificação	26
4.4.5	Competição Tecnológica, Eletrificação Veicular e Janela de Oportunidade ..	27
4.4.6	A concorrência interna: Sobreoferta do Etanol de Milho e o Mix Produtivo ...	28
4.5	Síntese Integrada dos Gargalos	29
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

A transição para fontes renováveis recoloca o etanol de segunda geração (E2G) no centro do adensamento tecnológico do setor sucroenergético. Ao converter bagaço e palha, a rota pode ampliar a oferta sem expansão proporcional da área plantada. Sua relevância decorre do contraste entre a liderança brasileira em biocombustíveis e a dificuldade de estabilizar operações comerciais. A pesquisa pergunta quais gargalos tecnológicos, institucionais e econômico-financeiros limitam o E2G no país.

A pesquisa é qualitativa, exploratória e documental. Combina literatura sobre instituições e dependência da trajetória com séries da ANP, EPE, Conab, BNDES e Anfavea e documentos empresariais disponíveis até 2026. Sem acesso às planilhas internas das usinas, CAPEX e OPEX são tratados como parâmetros setoriais, não como avaliação completa de projetos.

A hipótese é que a infraestrutura herdada do E1G reduz parte dos custos de entrada do E2G, mas não neutraliza a combinação entre risco tecnológico, elevado investimento inicial e descontinuidade dos mecanismos de coordenação e compartilhamento de risco. Essa interação limita a escalabilidade, a aprendizagem e a competitividade da rota celulósica.

O objetivo geral é analisar os fatores tecnológicos, financeiros e institucionais que limitam o E2G. Especificamente, reconstrói-se a trajetória do E1G, descrevem-se a conjuntura e as economias de escopo das usinas integradas e articulam-se os gargalos que impedem escala e redução de custos.

Além desta introdução, o Capítulo 2 examina a trajetória institucional do E1G, do Proálcool à consolidação dos veículos flex-fuel. O Capítulo 3 discute a conjuntura do setor e as economias de escopo das usinas integradas. O Capítulo 4 reorganiza e integra os gargalos tecnológicos, institucionais e econômico-financeiros. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais, as condições de competitividade e as limitações da pesquisa.

2 O SUCESSO DO ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO NO BRASIL: TRAJETÓRIA INSTITUCIONAL E PATH DEPENDENCE

2.1 A Economia Institucional e o Path Dependence

A Nova Economia Institucional (NEI) oferece um referencial para analisar como regras, contratos e formas de governança condicionam o desempenho econômico. A partir de Coase (1937), Williamson (1985) e North (1990), a abordagem desloca a análise de trocas abstratas para os custos de coordenar agentes, reduzir incerteza e fazer cumprir compromissos. Para North (1990), instituições formais e informais estruturam os incentivos e delimitam as escolhas disponíveis às organizações.

O conceito de *path dependence* foi formulado para explicar trajetórias tecnológicas nas quais retornos crescentes e eventos históricos contingentes tornam determinados padrões progressivamente mais difíceis de substituir (David, 1985; Arthur, 1989). North (1990) estendeu essa interpretação às instituições, mostrando que regras, incentivos e crenças herdadas restringem as alternativas presentes sem produzir determinismo absoluto.

De acordo com Douglass North (1990), as instituições econômicas e políticas do presente não podem ser plenamente compreendidas sem o exame detalhado de sua evolução histórica. As escolhas institucionais atuais são, em grande medida, moldadas pela matriz institucional herdada do passado. North (1990) enfatiza, contudo, que *path dependence* não implica determinismo histórico absoluto; a trajetória apenas restringe e orienta o leque de opções viáveis no presente.

Arthur (1989) demonstra que decisões tomadas em conjunturas críticas podem ativar retornos crescentes e produzir *lock-in*. Externalidades de rede, aprendizagem e investimentos específicos elevam o valor do arranjo já adotado e o custo de transição para alternativas. No plano institucional, North (1990) acrescenta que organizações desenvolvem rotinas e competências adaptadas às regras vigentes, reforçando a trajetória.

No setor sucroenergético, essa perspectiva permite observar simultaneamente o ambiente institucional e as estruturas de governança que organizam o fornecimento de matéria-prima, o financiamento e a comercialização. Mudanças abruptas nas regras ou na coordenação aumentam custos de transação e exigem readaptação das

empresas, especialmente quando ativos são específicos e os ciclos de investimento são longos.

A trajetória do setor foi moldada por quase seis décadas de intervenção estatal. Criado em 1933, o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) administrava cotas, preços e mecanismos de regulação do complexo açucareiro, articulando produção e comercialização. Sua extinção, em 1990, não eliminou as capacidades acumuladas, mas transferiu ao mercado e a novos órgãos parte das funções de coordenação antes centralizadas.

No caso brasileiro, a dependência da trajetória tem efeito duplo. Os ativos industriais, a logística, o conhecimento agrônomo, os mandatos de mistura e a frota flex constituem uma herança favorável ao E2G. Ao mesmo tempo, a rentabilidade, as rotinas e os investimentos já amortizados do E1G elevam o custo de oportunidade da mudança e reforçam um *lock-in* relativo. Assim, o problema contemporâneo não é apenas falta de tecnologia: envolve custos de ajuste e falhas de coordenação entre empresas, financiadores e Estado (Perosa; Shikida, 2012).

2.2 Contexto Histórico: O Programa Nacional do Alcool (1975-1990)

A geopolítica do petróleo foi decisiva para a criação do Proálcool. O choque de 1973 elevou o custo das importações e expôs a vulnerabilidade externa brasileira, transformando a substituição da gasolina em objetivo de segurança energética e de economia de divisas. Esse impulso não derivou apenas de uma comparação estática de preços: resultou da percepção de risco associada à concentração internacional da oferta e à volatilidade das cotações (Szmrecsányi; Moreira, 1991).

Nesse contexto, o governo Geisel coordenou um arranjo que envolveu o Ministério da Indústria e Comércio, o IAA, o Conselho Nacional do Petróleo e a Petrobras. O Decreto nº 76.593, de 14 de novembro de 1975, instituiu o Programa Nacional do Alcool (Proálcool), combinando crédito, preços administrados, garantia de compra e expansão da mistura de etanol anidro à gasolina. O IAA forneceu capacidades regulatórias acumuladas no setor açucareiro, ainda que disputasse prioridades com outros órgãos da administração federal (Castro Santos, 1989).

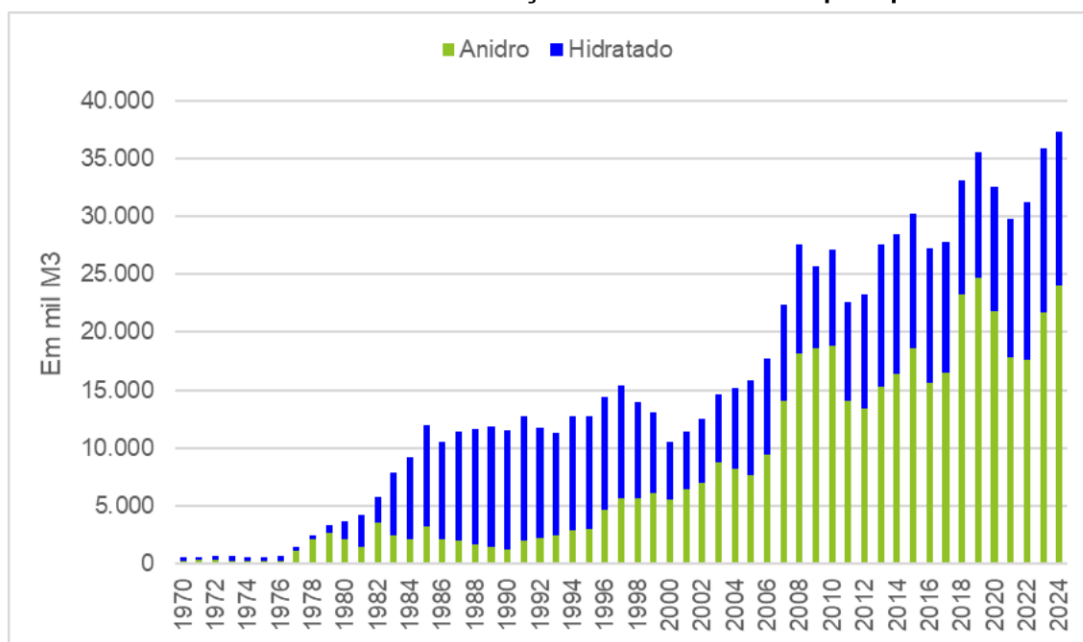
O Proálcool foi estruturado em duas fases distintas, cada uma com características e objetivos específicos. A primeira fase (1975-1979) concentrou-se na

produção de etanol anidro para mistura com gasolina, estabelecendo inicialmente uma proporção mínima de 20%. Esta estratégia visava reduzir gradualmente a dependência de combustíveis importados sem exigir modificações substanciais na frota veicular existente. Durante este período inicial, o governo brasileiro implementou um conjunto abrangente de incentivos para viabilizar a expansão da produção. A política incluía a garantia de compra da produção pelas distribuidoras, a fixação de preços remuneradores aos produtores, a oferta de crédito rural com juros subsidiados para a construção de novas destilarias e a expansão de lavouras, além de investimentos em infraestrutura e pesquisa (Szmrecsányi; Moreira, 1991).

Como resultado, a área plantada com cana expandiu de aproximadamente 1,5 milhão de hectares em 1975 para 2,4 milhões em 1979, enquanto a produção total de etanol aumentou de 555 milhões para cerca de 3,4 bilhões de litros. Em 1979, o etanol anidro alcançou aproximadamente 2,5 bilhões de litros e o hidratado, 358 milhões de litros, conforme o Gráfico 1 (Szmrecsányi; Moreira, 1991).

O segundo choque do petróleo, em 1979, reforçou a preocupação com o abastecimento e catalisou a segunda fase do Proálcool. O programa passou a apoiar veículos movidos exclusivamente a etanol hidratado e ampliou destilarias autônomas. Em 1985, automóveis a etanol representaram 95,9% das vendas nacionais de veículos leves, enquanto a produção total do combustível superou 8,5 bilhões de litros (Anfavea, 2025; Szmrecsányi; Moreira, 1991).

Gráfico 1 – Produção de etanol no Brasil por tipo

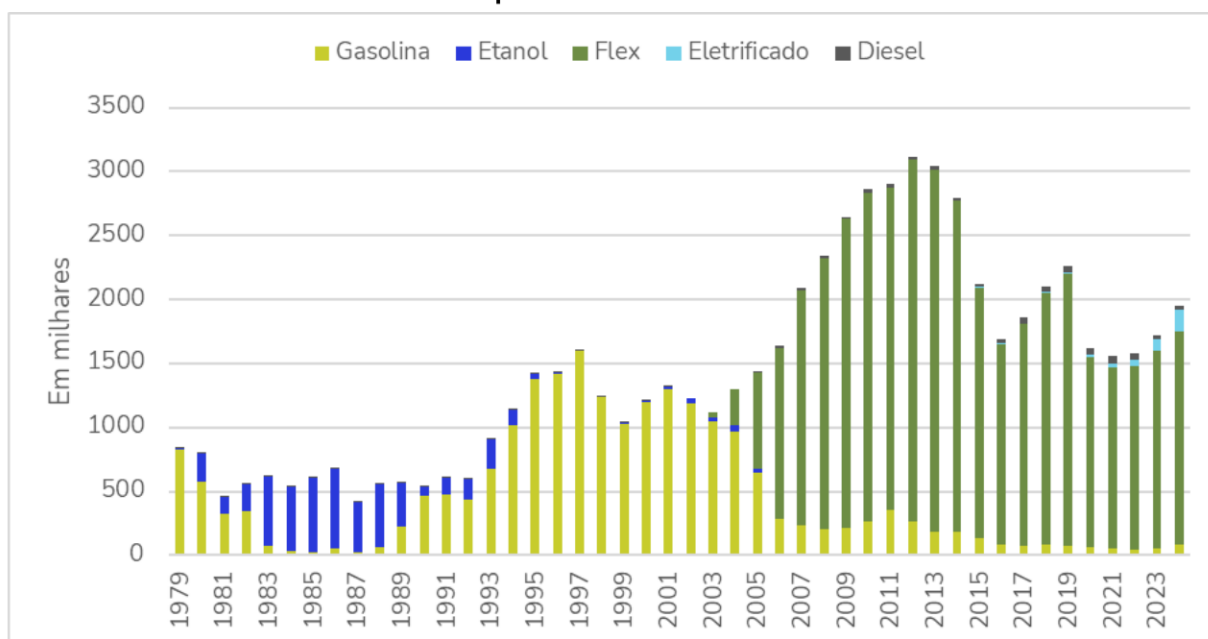


Fonte: elaboração própria com base em Conab (2026).

O pico de emplacamentos de veículos a etanol não foi um resultado espontâneo de mercado. Crédito subsidiado, garantia de compra, preços administrados, adaptação da indústria automobilística e expansão da distribuição reduziram simultaneamente o risco dos produtores e dos consumidores. O Gráfico 1 evidencia que o salto produtivo acompanhou esse arranjo institucional, e não apenas a disponibilidade física de cana.

A mesma trajetória mostra a influência persistente da geopolítica do petróleo. Preços internacionais altos valorizam a segurança energética e melhoram a competitividade relativa do etanol; períodos de petróleo barato comprimem margens e enfraquecem a disposição política para sustentar incentivos. Choques geopolíticos podem reabrir a demanda por alternativas, mas não eliminam gargalos tecnológicos ou financeiros. Na segunda metade dos anos 1980, a queda das cotações, a crise fiscal e mudanças de orientação econômica reduziram o apoio ao programa (Shikida; Perosa, 2012).

Na década de 1990, a desregulamentação promovida pelo governo Collor e a extinção do IAA alteraram profundamente a coordenação da cadeia. Somadas à memória do desabastecimento de etanol no final dos anos 1980, essas mudanças reduziram a confiança do consumidor: os emplacamentos de veículos exclusivamente a etanol caíram de forma acentuada, enquanto os modelos a gasolina retomaram a liderança.

Gráfico 2 – Emplacamento de veículos no Brasil

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

Ainda assim, competências industriais, redes de distribuição e conhecimento tecnológico foram preservados durante a crise. Essa continuidade permitiu que a introdução dos veículos flex-fuel, em 2003, reativassem a demanda e inaugurasse uma nova etapa da trajetória do etanol (Shikida; Perosa, 2012).

2.3 A Era Flex-Fuel e a Consolidação do Setor (2003-presente)

A introdução dos veículos flex-fuel em março de 2003 marca o início de uma nova era para a indústria sucroenergética brasileira, demonstrando como a inovação tecnológica associada a complexas relações institucionais pode alterar fundamentalmente a dinâmica de um setor.

A consolidação tecnológica do setor sucroenergético brasileiro resultou de uma articulação institucional excepcionalmente densa e duradoura (Shikida; Perosa, 2012). Distintos atores contribuíram, de maneira coordenada ou competitiva, para construir e reforçar essa trajetória: o Estado (por meio de financiamento, regulação e mandatos de mistura), as usinas e cooperativas (investindo em escala e eficiência), os centros de pesquisa (desenvolvendo variedades de cana e processos industriais), as montadoras (criando motores flex) e, por fim, os consumidores (que aceitaram e demandaram a tecnologia flex).

Essa rede institucional extremamente coesa e autoreforçada, que envolve produtores, fornecedores, montadoras, Estado, associações, centros de pesquisa e consumidores, é precisamente o que transforma o etanol de primeira geração no Brasil em um caso exemplar de *path dependence* bem-sucedido.

O caso brasileiro ilustra, assim, com clareza excepcional os mecanismos clássicos de *path dependence*: uma tecnologia nascida de uma vantagem comparativa estática foi sucessivamente 'trancada' por choques do petróleo, investimentos do Estado, desenvolvimento de expertise técnica, coordenação industrial, criação de infraestrutura e, finalmente, pela disseminação de uma inovação, o motor flex, que mitigou o risco do consumidor e consolidou definitivamente a trajetória, dominando o mercado de automóveis há mais de vinte anos, conforme ilustrado no gráfico 2.

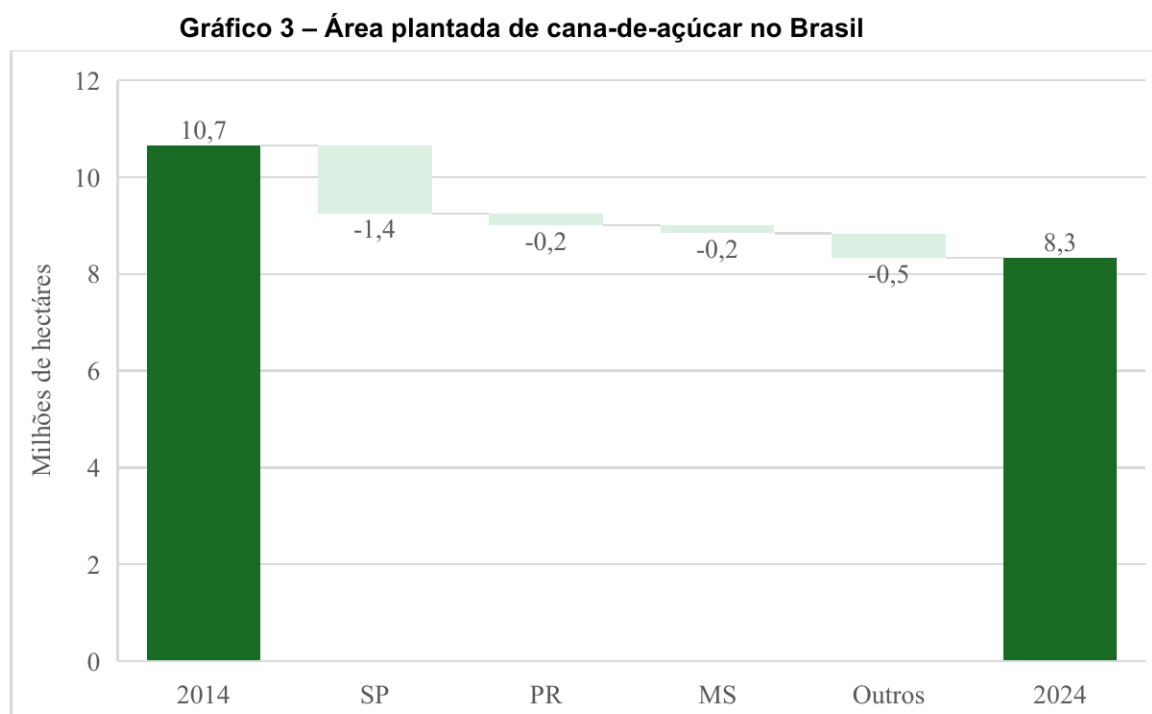
A difusão dos veículos flex-fuel acompanhou forte expansão da oferta. Em 2024, o Brasil produziu 37,0 bilhões de litros de etanol: 24,1 bilhões de hidratado e 12,8 bilhões de anidro. No mesmo ano, as vendas estimadas foram de 21,7 bilhões de litros de hidratado e 12,0 bilhões de anidro, enquanto as exportações alcançaram 1,9 bilhão de litros. Esses totais abrangem diferentes matérias-primas e, por isso, não devem ser confundidos com estimativas restritas ao E1G de cana (ANP, 2025).

3 O POTENCIAL DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

3.1 Desafios Contemporâneos e a Necessidade de Inovação

Nos últimos anos, o setor sucroenergético brasileiro vem enfrentando dificuldades tanto no âmbito institucional e econômico quanto na parte tecnológica, exigindo que o setor siga evoluindo para se manter competitivo frente às mudanças do mercado global de energia e às pressões por descarbonização.

No âmbito agrônomo, a cana-de-açúcar concorre por terra e capital com culturas anuais, especialmente em regiões de expansão de grãos. A necessidade de renovação dos canaviais, os custos da mecanização e os ciclos de vários cortes afetam a decisão dos produtores. A série apresentada no Gráfico 3 indica retração da área entre o início da década de 2010 e 2024, embora com oscilações entre safras e regiões.



Fonte: elaboração própria com base em Conab (2026).

A manutenção da oferta não decorre de um ganho linear de produtividade. Na safra 2023/24, a área colhida foi estimada em 8,33 milhões de hectares e a produtividade média em 85,58 t/ha, 16,2% acima da temporada anterior, resultado

influenciado por clima favorável e investimentos no campo. O dado mostra que ganhos agrônômicos podem compensar parte da limitação de área, mas variam com o ciclo climático e não substituem a necessidade de eficiência industrial (Conab, 2024).

A mistura obrigatória de 30% de etanol anidro na gasolina comum (E30) entrou em vigor em 1º de agosto de 2025 e permanece vigente em 2026. A medida amplia a demanda potencial e reforça a importância da regularidade do abastecimento. Ao mesmo tempo, torna mais relevante elevar a produtividade industrial e aproveitar resíduos, pois a expansão extensiva da área enfrenta limites econômicos e socioambientais (ANP, 2025b).

3.2 Vantagens Competitivas e os Limites da Primeira Geração (E1G)

Historicamente, a consolidação do E1G apoiou-se em coordenação pública e infraestrutura logística. Durante o Proálcool, a Petrobras não representava toda a rede nacional de postos, mas exerceu papel central na aquisição e na circulação do combustível. Em 1982, seus sistemas de dutos, navios-tanque e caminhões respondiam por cerca de metade do volume físico distribuído no país e por praticamente todo o fluxo em São Paulo e áreas adjacentes; a Petrobras Distribuidora também possuía a maior rede de postos de álcool. Essa atuação conectou produtores, mistura, armazenagem e distribuição, ajudando a reduzir o risco de abastecimento (Castro Santos, 1989).

A base dessa eficiência reside na simplicidade e maturidade do processo bioquímico de primeira geração, que se diferencia drasticamente das rotas tecnológicas avançadas. No modelo E1G, a produção ocorre via fermentação alcoólica direta, na qual leveduras processam os açúcares simples (sacarose) já disponíveis no caldo da cana de forma rápida e com alto rendimento industrial. Em contrapartida, as rotas de segunda geração (E2G) exigem a etapa adicional e onerosa da hidrólise, necessária para quebrar as fibras lignocelulósicas do bagaço e da palha e transformá-las em açúcares fermentáveis, um processo que demanda pré-tratamentos complexos e o uso de coquetéis enzimáticos caros e majoritariamente importados. Assim, a rota 1G permanece como a opção de menor risco e maior retorno financeiro imediato para as usinas, operando em um patamar de custo que a gasolina importada dificilmente consegue mitigar sem intervenções tributárias.

A eficiência do E1G também se apoia no aproveitamento energético do bagaço, na cogeração e em décadas de melhoria agrônômica e industrial. Essa base oferece ativos compartilháveis ao E2G, mas também torna a rota convencional um referencial de baixo risco e retorno mais previsível. A expansão celulósica precisa, portanto, competir não com uma tecnologia estática, mas com um sistema maduro que continua acumulando aperfeiçoamentos.

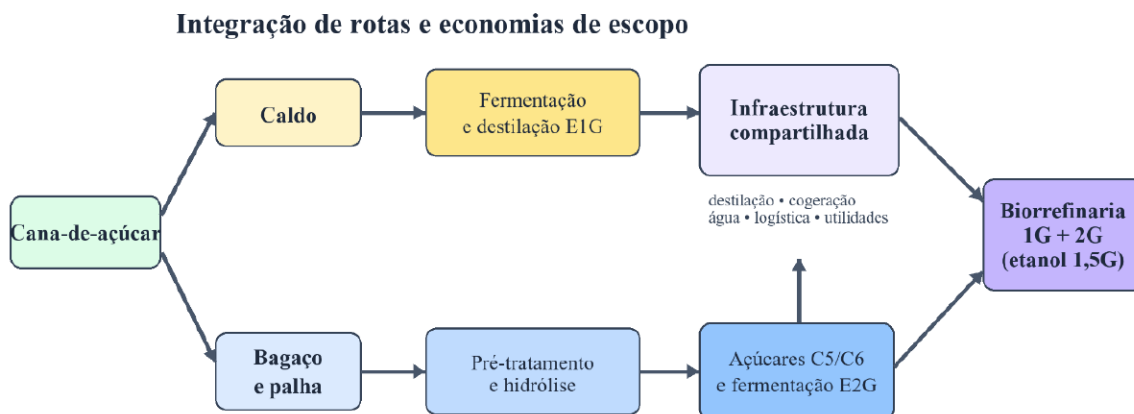
3.3 Economias de Escopo das Usinas Integradas: O etanol 1,5G

A produção de etanol de segunda geração (E2G) é frequentemente apresentada como a principal estratégia para aumentar a oferta de biocombustíveis sem expandir a área de cana-de-açúcar, por utilizar resíduos lignocelulósicos como o bagaço e a palha. O país gera um grande volume de biomassa residual por safra, abrindo a possibilidade de converter esses resíduos em etanol adicional com menor pressão sobre a mudança do uso da terra. Nesse sentido, o E2G complementa o etanol de primeira geração (E1G) e melhora o aproveitamento global da cana, alinhando o aumento de produção com metas de sustentabilidade (Zart *et al.*, 2020; Senna; Ansanelli, 2016; Giménez *et al.*, 2018).

A produção do etanol de segunda geração baseia-se no processo de extração das fibras lignocelulósicas, que necessita de um pré-tratamento químico ou físico para expor suas fibras, seguido pela hidrólise e fermentação para a geração do biocombustível. Diante da complexidade técnica e do alto custo desses processos isolados, a alternativa mais viável na literatura e na prática da indústria é a integração entre as rotas de primeira e segunda geração, frequentemente chamada de “etanol 1,5G”.

Nessa configuração, a usina de E1G continua produzindo etanol a partir do caldo, enquanto bagaço e palha abastecem um módulo anexo de E2G. A integração permite compartilhar fermentação, destilação, utilidades, logística e cogeração, produzindo economias de escopo e diluindo parte dos custos fixos (Zart *et al.*, 2020; Junqueira *et al.*, 2017; Shibukawa *et al.*, 2023).

Figura 1 – Integração das rotas de primeira e segunda geração: etanol 1,5G



Fonte: elaboração própria.

Análises tecnoeconômicas indicam que a integração E1G+E2G pode elevar substancialmente a produção por tonelada de cana ao converter frações fibrosas antes destinadas sobretudo à energia. A infraestrutura herdada reduz custos de entrada, mas não elimina as exigências de pré-tratamento, enzimas, estabilidade operacional e financiamento. Por isso, a vantagem de escopo deve ser tratada como condição facilitadora, não como prova de competitividade automática (Junqueira *et al.*, 2017; Garcez; Paiva; Reis, 2023; Giménez *et al.*, 2018).

4 GARGALOS TECNOLÓGICOS, INSTITUCIONAIS E ECONÔMICOS PARA O AVANÇO DO ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO NO BRASIL

4.1 O Cenário Global: Fracassos Econômicos e Lições das Plantas Pioneiras

A experiência internacional mostra que a passagem da escala piloto à comercial permanece o principal teste do E2G. Projetos pioneiros enfrentaram instabilidade de processo, baixa disponibilidade dos equipamentos e dificuldades financeiras. Os casos devem ser comparados com cautela, pois combinam tecnologias, matérias-primas, contratos e estruturas de capital distintas. Ainda assim, revelam um padrão: atrasos operacionais elevam o investimento efetivo, adiam receitas e ampliam a necessidade de financiamento.

A Abengoa tornou-se um caso emblemático ao entrar em crise financeira em 2015-2016 após investir em projetos de etanol celulósico que não alcançaram a rentabilidade prevista. A experiência não prova inviabilidade técnica universal, mas ilustra como endividamento elevado e desempenho industrial inferior ao projetado podem se reforçar mutuamente (Gala; Pauro, 2025).

No Brasil, a Bioflex I, da GranBio, iniciou operação comercial em 2014, com capacidade nominal de 82 milhões de litros por ano, mas passou por longas interrupções e reestruturação financeira. Documentos corporativos de 2024 indicavam investimento para retomar a comercialização de etanol na safra 2024/25, ao mesmo tempo em que o grupo desenvolvia uma biorrefinaria demonstrativa de SAF 2G. O caso evidencia incerteza operacional e diversificação estratégica (GranBio, 2024).

Nos Estados Unidos e na Europa, outras plantas pioneiras também operaram abaixo da capacidade ou foram descontinuadas. Em vez de tratar esses episódios como fracassos idênticos, a análise os utiliza como evidência de que subsídios e mandatos de demanda não substituem confiabilidade de processo, disciplina financeira e aprendizagem industrial (Gala; Pauro, 2025).

Gala e Pauro (2025) sintetizam essa dificuldade como uma distância entre a prova laboratorial e a entrega industrial. A formulação é usada aqui como comentário de conjuntura, não como evidência suficiente sobre o estado de uma empresa específica. Para os casos brasileiros, prevalecem documentos corporativos e fontes públicas de financiamento.

4.2 Gargalos Tecnológicos

O desenvolvimento tecnológico da indústria de etanol no Brasil avançou de forma significativa nas últimas décadas, sobretudo na fermentação de primeira geração, mas ainda enfrenta gargalos relevantes em diferentes etapas do processo. Um primeiro grupo de desafios diz respeito à necessidade de aperfeiçoar o controle da fermentação alcoólica, reduzindo o estresse das leveduras, aumentando a tolerância a altas concentrações de etanol e minimizando contaminações bacterianas, que comprometem rendimento e estabilidade operacional (Lopes *et al.*, 2016; Amorim *et al.*, 2011). Esses problemas exigem investimentos contínuos em melhoramento de linhagens industriais de levedura, automação de processo e monitoramento em tempo real das condições de fermentação (Lopes *et al.*, 2016).

Um segundo conjunto de gargalos relaciona-se à resistência natural (recalcitrância) da biomassa lignocelulósica. Celulose e hemicelulose são protegidas por uma matriz de lignina, o que exige pré-tratamentos físicos ou químicos antes da hidrólise. Essas etapas elevam a complexidade industrial, o consumo de energia e a intensidade de capital, além de poderem gerar compostos inibidores da fermentação (Alvira *et al.*, 2010; Hamelinck; Van Hooijdonk; Faaij, 2005).

Os custos e a eficiência dos coquetéis enzimáticos, bem como a fermentação conjunta de açúcares C6 e C5, permanecem barreiras relevantes. Enzimas precisam manter desempenho diante da variabilidade da matéria-prima, enquanto microrganismos industriais devem tolerar inibidores e altas concentrações de produto. Há avanços científicos, mas sua incorporação robusta em escala comercial continua desigual (Alvira *et al.*, 2010; Mussatto *et al.*, 2010; Medeiros *et al.*, 2023).

No Brasil, a base científica e a experiência do E1G não se converteram automaticamente em um sistema maduro de inovação para o E2G. A concentração de projetos em poucas empresas limita a diversidade de fornecedores, a circulação de conhecimento e a aprendizagem cumulativa. A transição permanece incompleta e sensível tanto ao contexto macroeconômico quanto à continuidade das políticas (Furtado; Hekkert; Negro, 2020).

Do ponto de vista sistêmico, o esforço inovativo do setor não acompanhou a escala dos desafios de mercado e engenharia. Políticas que alternam incentivos a

combustíveis fósseis e renováveis aumentam a incerteza e reduzem a disposição para projetos de maturação longa, especialmente nas rotas celulósicas (Salles-Filho *et al.*, 2017; Furtado; Hekkert; Negro, 2020).

Conclui-se que a imaturidade tecnológica não é apenas um desafio de engenharia, mas o fator primário que torna o investimento inicial proibitivo para o capital privado, conectando o gargalo técnico diretamente à inviabilidade financeira detalhada a seguir.

4.3 Gargalos Institucionais

Em 2011, BNDES e Finep lançaram o PAISS para apoiar inovação nos setores sucroenergético e sucroquímico. O programa ajudou a viabilizar as primeiras plantas brasileiras de E2G em escala demonstrativa e comercial, deslocando o aprendizado do laboratório para a indústria. A experiência criou ativos e competências, mas a quantidade reduzida de projetos limitou a escala de aprendizagem e a formação de uma cadeia ampla de fornecedores (Milanez *et al.*, 2015; Lorenzi; Andrade, 2019).

A Raízen concentra a principal expansão recente. Na safra 2025/26, a empresa informou produção de 120,2 milhões de litros de E2G, 104% acima do ciclo anterior, enquanto Vale do Rosário e Gasa permaneciam em construção e Univalem, Barra e Bonfim passavam por estabilização e maturação. O quadro é mais prudente do que a meta, anunciada em 2023, de vinte unidades até 2030: os dados atuais indicam avanço, mas também a persistência de etapas de aprendizagem operacional (Raízen, 2026).

Steinmueller (2010 apud Milanez *et al.*, 2015) apresenta diversos modelos possíveis de políticas para inovação, organizados em quatro categorias: (1) políticas voltadas à oferta de novas tecnologias; (2) políticas voltadas à demanda por novas tecnologias; (3) política para a oferta de fatores complementares; e (4) mecanismos de mudança institucional. O autor utilizou esse framework para analisar as principais políticas tecnológicas que fundamentaram a ascensão do E2G nos Estados Unidos, permitindo uma comparação sistemática entre diferentes abordagens nacionais de fomento à inovação.

Tendo em vista que o Brasil já utiliza instrumentos de demanda, como mandatos de mistura e RenovaBio, o país dispõe de uma base institucional favorável

aos biocombustíveis. A análise, contudo, revela fragilidades nas políticas de oferta tecnológica, nos fatores complementares e nos mecanismos de coordenação de longo prazo.

Apesar dos avanços iniciais do PAISS, os resultados ficaram aquém da escala esperada. Milanez *et al.* (2015) descrevem que, até o fim da década de 2000, o apoio ao E2G era difuso e pouco coordenado; Lorenzi e Andrade (2019) mostram que a política posterior ampliou redes sociotécnicas, mas não eliminou dependência de tecnologia estrangeira, baixo investimento privado e dificuldades operacionais.

As plantas pioneiras tiveram trajetórias diferentes. A Raízen manteve expansão e aprendizagem, enquanto a GranBio passou por interrupções e reestruturação. Essa heterogeneidade recomenda evitar diagnósticos binários de sucesso ou fracasso: o resultado depende da integração com ativos existentes, do acesso a capital e da capacidade de estabilizar o processo.

Além disso, o PAISS não teve continuidade após seu encerramento. Não houve um "PAISS 3" ou programa sucessor que mantivesse o impulso inicial, evidenciando uma falha clássica de política pública no Brasil: a descontinuidade de programas estratégicos devido a mudanças de governo, restrições orçamentárias ou falta de coordenação interministerial. Como observa Santos (2016), essa descontinuidade é um padrão recorrente desde a desregulamentação do setor nos anos 1990, quando o país deixou de ter uma política clara e consistente de apoio ao setor sucroenergético.

A comparação internacional sugere que previsibilidade e combinação de instrumentos importam tanto quanto o volume de recursos. Nos Estados Unidos, mandatos, créditos tributários, apoio a P&D e garantias de empréstimo foram utilizados de forma complementar, ainda que também tenham produzido resultados inferiores às metas iniciais (Milanez *et al.*, 2015).

No Brasil, ao contrário, os instrumentos foram implementados de forma fragmentada e sequencial, sem a articulação necessária entre as diferentes esferas governamentais. O Ministério de Minas e Energia (MME), o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a Agência Nacional do Petróleo (ANP), o BNDES e a FINEP atuaram frequentemente de forma descoordenada, cada um com suas próprias prioridades e cronogramas, dificultando a formação de um ambiente institucional coeso e previsível para investimentos de longo prazo.

A instabilidade regulatória constitui outro gargalo institucional relevante. Como documenta Moraes (2014), a transição da forte intervenção estatal (1930-1990) para

a desregulamentação abrupta na década de 1990 gerou um vácuo institucional que o setor levou anos para superar. Durante a década de 1980, conflitos recorrentes entre governo e setor privado sobre preços, cotas de produção e garantias de abastecimento minaram a confiança dos investidores, culminando na crise de desabastecimento de etanol em 1989-1990.

Mesmo após a estabilização proporcionada pelos veículos flex-fuel, mudanças tributárias e sinais contraditórios entre combustíveis fósseis e renováveis dificultam o planejamento de longo prazo. Para projetos de maior risco tecnológico, a previsibilidade do mandato de demanda precisa ser acompanhada por financiamento, P&D e regras estáveis de compartilhamento de risco.

Conflitos distributivos entre usinas, fornecedores, distribuidores e governo também afetam a coordenação. O problema institucional, portanto, não é ausência completa de regras, mas a dificuldade de alinhar incentivos, distribuir riscos e preservar compromissos por períodos compatíveis com a maturação tecnológica (Lorenzi; Andrade, 2019).

Os gargalos institucionais decorrem menos da ausência absoluta de políticas e mais da sua fragmentação. O Brasil construiu demanda para biocombustíveis e capacidade pública de financiamento, mas não consolidou continuidade equivalente nas políticas de oferta tecnológica, nos fornecedores especializados e na coordenação entre MME, MAPA, ANP, BNDES e Finep.

Essa configuração produz uma dependência da trajetória ambivalente: instituições herdadas reduzem custos de entrada, enquanto o baixo risco do E1G e a descontinuidade do apoio ao E2G preservam o *lock-in* relativo. A barreira institucional atual é, sobretudo, uma falha de coordenação intertemporal entre engenharia, capital e demanda.

4.4 Gargalos Econômico-Financeiros

A decisão de investir em E2G depende do retorno ajustado ao risco. Empresas com alternativas já amortizadas comparam o projeto celulósico não apenas com a gasolina, mas também com expansão do E1G, açúcar, etanol de milho, bioenergia e redução de dívida.

O endividamento setorial, as taxas de juros elevadas, a volatilidade do petróleo e os grandes investimentos necessários tornam o financiamento do E2G inviável para parcela relevante das usinas sem garantias, contratos de longo prazo ou participação pública.

Higashi *et al.* (2023) mostram que a crise de crédito de 2008, a dificuldade de renovar financiamentos e o aumento dos custos operacionais contribuíram para falências e recuperações judiciais no setor sucroenergético. Esse histórico reduz a capacidade de assumir projetos com maturação longa e risco de engenharia.

A restrição não significa que a usina 'não possua CAPEX', mas que pode não ter liquidez, capacidade de endividamento ou geração de caixa suficiente para realizar a despesa de capital. O problema combina balanço financeiro fragilizado e incerteza sobre disponibilidade da planta, rendimento e preço de venda.

4.4.1 Estrutura de custos: CAPEX como principal barreira

A despesa de capital (CAPEX) para instalar uma planta de E2G é a principal barreira econômica inicial. Pré-tratamento, hidrólise enzimática, fermentação de pentoses e integração de utilidades exigem equipamentos e engenharia adicionais em relação ao E1G, elevando o investimento e o risco de atraso (Bonomi *et al.*, 2017).

Na referência setorial adotada, a expansão agregada do E1G de cana demanda aproximadamente R\$ 3,99 por litro anual de capacidade, enquanto o parâmetro para E2G é de R\$ 16,92. O projeto de Andradina, com investimento total estimado em R\$ 1,4 bilhão e capacidade de até 82 milhões de litros por ano, é compatível com essa ordem de grandeza (EPE, 2025; BNDES, 2025).

Tabela 1 – Parâmetros de investimento e operação por rota produtiva

Nota: os indicadores possuem escopos e premissas distintos e não equivalem, isoladamente, a uma

Rota	CAPEX por litro/ano de capacidade	OPEX por litro produzido	Natureza do indicador
E1G de cana	R\$ 3,99	R\$ 2,28	Expansão agregada
E2G de cana	R\$ 16,92	R\$ 1,96	Rota E2G

comparação completa do custo nivelado.

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2025).

Como observa Antonio Bonomi, importante membro do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), em entrevista à Agência FAPESP: "Hoje é mais interessante montar uma usina de primeira geração do que de segunda geração porque o retorno do investimento é maior" (Bonomi *et al.*, 2017). Essa avaliação de um dos principais especialistas brasileiros na área sintetiza o dilema econômico fundamental: mesmo tecnicamente viável, o E2G não consegue competir economicamente com o E1G nas condições atuais de mercado.

Em suma, a integração com grandes complexos de E1G reduz parte do investimento em infraestrutura compartilhada, mas a volatilidade do petróleo, o custo do crédito e a fragilidade financeira de parte das usinas limitam a expansão. Preços altos do petróleo podem melhorar a competitividade relativa, porém não resolvem por si só a instabilidade técnica nem garantem financiamento.

4.4.2 Custos Operacionais: A questão das enzimas e outros insumos

As estimativas de OPEX da Tabela 1 não permitem afirmar, isoladamente, que o E2G seja mais caro em todas as despesas operacionais: a EPE estima R\$ 1,96 por litro para E2G e R\$ 2,28 para a expansão agregada do E1G, mas os indicadores possuem fronteiras de custo e premissas distintas. A comparação economicamente relevante precisa combinar investimento, disponibilidade da planta, rendimento, vida útil e custo financeiro (EPE, 2025).

Entre os itens específicos do E2G, destacam-se os coquetéis enzimáticos usados na hidrólise da biomassa lignocelulósica. A dependência de fornecedores externos adiciona risco tecnológico e cambial, sobretudo quando receitas e parte dos custos agrícolas são denominados em reais.

Outros fatores operacionais que pressionam os custos incluem: (1) maior consumo energético nos processos de pré-tratamento da biomassa; (2) necessidade de controle rigoroso de contaminação bacteriana, que pode comprometer a fermentação; (3) custos de manutenção mais elevados devido à complexidade dos equipamentos; e (4) necessidade de mão de obra mais qualificada para operação das plantas.

4.4.3 Dependência de Financiamento Público e Insuficiência de Capital

Privado

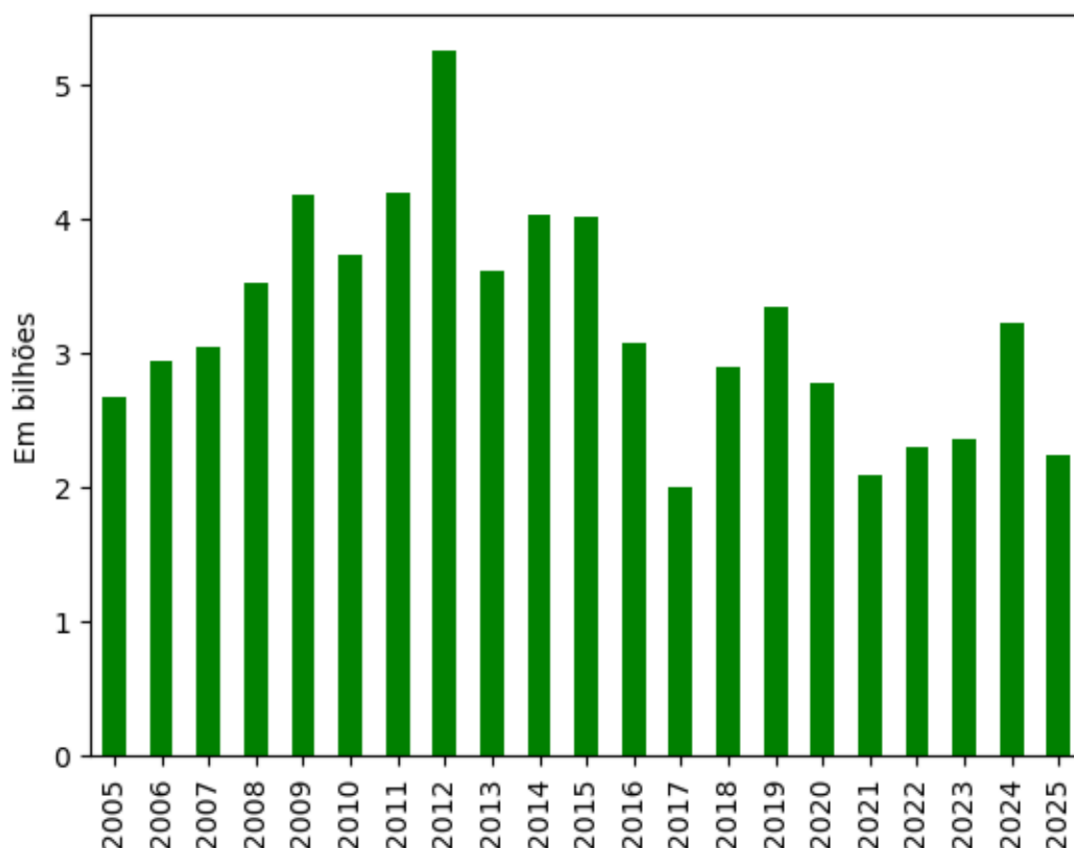
A análise dos projetos bem-sucedidos de E2G no Brasil revela um padrão preocupante: todos dependem criticamente de financiamento público em condições subsidiadas.

A título de exemplo, o BNDES aprovou em janeiro de 2025 financiamento de R\$ 1 bilhão para a unidade de Andradina: R\$ 500 milhões do BNDES Mais Inovação e R\$ 500 milhões do Fundo Clima. A planta tem capacidade prevista de até 82 milhões de litros por ano e investimento total de aproximadamente R\$ 1,4 bilhão (BNDES, 2025).

Um dos aspectos mais alarmantes identificados pela literatura é essa elevada dependência de financiamento estatal, que contrasta com o baixo investimento privado complementar. Segundo dados compilados por Lorenzi e Andrade (2019), do total de R\$ 4,7 bilhões mobilizados pelo PAISS, a maior parte veio de recursos públicos (BNDES e FINEP), enquanto o capital privado mostrou-se reticente em assumir riscos tecnológicos ainda não completamente mitigados.

A raiz dessa reticência é aprofundada por Christiano e Christiano (2025), que apontam que o alto endividamento histórico das usinas sucroenergéticas limita ainda mais sua capacidade de investimento em inovação. Usinas altamente endividadas priorizam a sobrevivência operacional e a geração de caixa no curto prazo, postergando investimentos de altíssimo risco e com retorno apenas no médio e longo prazo, como é o caso das biorrefinarias de E2G.

A dependência de recursos públicos cria duas vulnerabilidades: subordina o ritmo dos projetos aos ciclos orçamentários e indica que o retorno privado ainda não remunera plenamente os riscos percebidos. O Gráfico 4 mostra a oscilação do crédito contratado pelo setor e reforça a necessidade de instrumentos estáveis, não apenas operações pontuais.

Gráfico 4 – Volume de crédito contratado pelo setor de etanol pelo BNDES

Fonte: elaboração própria com base em BNDES (2026).

4.4.4 Escala de Produção e Barreiras à Massificação

A escala comercial permanece limitada. O BNDES estimou que seis plantas da Raízen poderiam elevar a capacidade nacional de E2G a cerca de 440 milhões de litros por ano; diante da produção brasileira total de 37 bilhões de litros em 2024, isso corresponderia a aproximadamente 1,2%. A produção efetiva de 120,2 milhões de litros informada pela Raízen em 2025/26 equivale a cerca de 0,3% daquele total, o que evidencia a distância entre plantas pioneiras e massificação (BNDES, 2025; ANP, 2025; Raízen, 2026).

Essa escala ainda modesta tem implicações econômicas importantes. Primeiro, limita os ganhos de escala tanto na produção de equipamentos quanto na compra de insumos como enzimas. Segundo, não cria massa crítica suficiente para estimular o desenvolvimento de uma cadeia de fornecedores especializada e competitiva. Terceiro, mantém o E2G como uma tecnologia de nicho, sem o poder de barganha e influência política que o E1G consolidou ao longo de décadas.

A ampliação de escala pode reduzir custos de equipamentos e insumos e acelerar a aprendizagem, mas não deve ser tratada como solução mecânica. Antes da multiplicação de plantas, é necessário elevar disponibilidade, rendimento e previsibilidade de implantação. Caso contrário, a expansão apenas reproduz custos e riscos em maior volume.

4.4.5 Competição Tecnológica, Eletrificação Veicular e Janela de Oportunidade

Um gargalo econômico adicional, e potencialmente decisivo para a cadeia do etanol, é o risco de obsolescência tecnológica impulsionado pela rápida transição energética global. O desenvolvimento acelerado dos Veículos Elétricos a Bateria (BEVs), fortemente alavancado por subsídios estatais em mercados líderes como a China e os Estados Unidos, ameaça a hegemonia dos motores a combustão interna, com diversas montadoras anunciando planos de descontinuidade dessa tecnologia nas próximas décadas. A tendência global encurta a "janela de oportunidade" do etanol, com previsões internacionais alertando que os combustíveis líquidos correm o risco de se tornarem tão obsoletos quanto os filmes fotográficos frente ao avanço da eletrificação (The Economist, 2009 *apud* Shikida; Perosa, 2012).

A eletrificação reduz a perspectiva de crescimento dos combustíveis líquidos no transporte leve, mas não elimina sua demanda no curto prazo nem em segmentos de difícil eletrificação. O SAF constitui uma oportunidade de maior valor para o etanol e outros intermediários celulósicos. O movimento da GranBio, contudo, combina esforço de retomada do etanol e desenvolvimento paralelo de SAF 2G; por isso, deve ser interpretado como diversificação sob incerteza (GranBio, 2024).

Embora a infraestrutura de recarga e as políticas industriais brasileiras difiram das observadas em mercados asiáticos e europeus, a eletrificação já modifica a composição das vendas. Entre 2015 e 2024, a participação dos veículos flex nos emplacamentos caiu de aproximadamente 92% para 85%, enquanto os eletrificados alcançaram cerca de 9% em 2024, conforme o Gráfico 2 (Anfavea, 2025; Wolffenbuttel, 2022; Brandão; Lima, 2025).

Diante desse cenário, a solução de transição mais pragmática e eficaz para a realidade brasileira reside na consolidação dos veículos híbridos flex a etanol. Além

de a substituição da gasolina pelo biocombustível reduzir consideravelmente o impacto ambiental e as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no ciclo de vida do veículo (Mera *et al.*, 2023), essa alternativa mitiga os problemas de autonomia e de infraestrutura de recarga nacional (Reis; Silva, 2017). Assim, a tecnologia híbrida apoia-se na matriz bioenergética consolidada no país, garantindo a sobrevida estratégica do setor sucroenergético no processo de descarbonização, enquanto rotas avançadas (como o E2G) buscam provar sua viabilidade frente a novos nichos como o mercado de aviação.

4.4.6 A concorrência interna: Sobreoferta do Etanol de Milho e o Mix Produtivo

A emergência e o crescimento exponencial do etanol de milho, concentrado na região Centro-Oeste, introduziram uma nova dinâmica de concorrência e um gargalo econômico indireto, mas poderoso, para o avanço do etanol de segunda geração (E2G). A injeção massiva de novos volumes do biocombustível a partir do cereal representa um risco estrutural de sobreoferta no mercado interno. Como apontam Higashi *et al.* (2023), o excesso de oferta de etanol e a consequente queda em seus preços configuram variáveis críticas que historicamente estrangulam as margens operacionais do setor, sendo identificadas como causas diretas para a desestruturação do caixa e para a entrada de usinas em processos de recuperação judicial.

Contudo, para se defender dessa pressão de sobreoferta e da queda nos prêmios do etanol, as usinas sucroenergéticas possuem uma vantagem competitiva fundamental frente às destilarias exclusivas de milho (full): a flexibilidade do mix produtivo. Conforme descrevem Shikida e Perosa (2012), os empresários do setor têm a capacidade histórica de gerenciar essa flexibilidade, direcionando sua produção entre açúcar e etanol de acordo com as oscilações de preços dessas duas commodities nos mercados interno e externo.

Como consequência, a intensificação ininterrupta da produção de etanol de milho no país tende a deprimir os preços do biocombustível no mercado doméstico. Como mecanismo de defesa econômica, essa nova configuração inclina as usinas de

cana-de-açúcar a direcionarem seu mix de produção de forma muito mais pesada para o açúcar, visando as margens e a segurança do mercado de exportação.

Ao encontrar margens mais seguras no açúcar ou no E1G, as usinas adiam investimentos de alto risco em biorrefinarias celulósicas. Assim, a concorrência do milho e a flexibilidade do mix reforçam a preferência por ativos já amortizados. Em conjunto, CAPEX elevado, risco operacional, crédito caro e escala reduzida formam a dimensão financeira do *lock-in*.

4.5 Síntese Integrada dos Gargalos

Os resultados formam uma cadeia causal: a complexidade tecnológica reduz disponibilidade e previsibilidade; o risco eleva o investimento efetivo; o capital privado exige garantias ou recua; e a descontinuidade institucional impede escala e aprendizagem para reduzir custos.

A dependência da trajetória também opera nos dois sentidos: infraestrutura, logística, mandatos e frota flex favorecem o E2G, enquanto o retorno previsível e os ativos amortizados do E1G elevam o custo de oportunidade e sustentam *lock-in* relativo.

O entrave institucional é de coordenação intertemporal. Empresas, financiadores e Estado precisam sustentar compromissos até que engenharia, fornecedores e demanda amadureçam; mandatos sem oferta estável ou crédito sem confiabilidade operacional não rompem o ciclo.

Romper o ciclo exige reduzir CAPEX e risco de processo, desenvolver fornecedores nacionais, compartilhar o risco de implantação e assegurar contratos de compra e políticas previsíveis. O SAF pode melhorar a remuneração da rota celulósica, mas não substitui a solução dos gargalos industriais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O E2G ainda não alcançou competitividade de custos no Brasil porque o risco tecnológico se converte em risco financeiro antes que a escala produza aprendizagem. A resistência natural da biomassa, o pré-tratamento, as enzimas e a estabilidade de operação elevam o investimento e atrasam receitas. Diante de um parâmetro de CAPEX de R\$ 16,92 por litro anual de capacidade, contra R\$ 3,99 na expansão agregada do E1G, o investidor tende a preferir rotas maduras e ativos já amortizados.

As instituições exercem efeito duplo. A trajetória do E1G deixou usinas, logística, regulação, conhecimento e uma frota flex que reduzem custos de entrada do E2G. Porém, a mesma trajetória reforça a preferência pelo E1G, pelo açúcar e por alternativas de retorno mais previsível. O problema institucional não é inexistência de apoio, mas descontinuidade e coordenação insuficiente entre política tecnológica, financiamento e demanda.

A competitividade requer condições simultâneas: confiabilidade industrial, menor CAPEX, desenvolvimento nacional de enzimas e equipamentos, contratos de compra de longo prazo, mecanismos de compartilhamento de risco e políticas previsíveis. Subsídios isolados ou novos mandatos de mistura não bastam se a planta não atingir disponibilidade e rendimento compatíveis com o projeto.

A eletrificação reduz parte da janela no transporte leve, enquanto o híbrido flex pode preservar demanda doméstica durante a transição. O SAF amplia o conjunto de mercados potenciais para intermediários celulósicos e pode pagar prêmio de descarbonização, mas não constitui destino garantido. Sua viabilidade dependerá de certificação, contratos, escala e competição com outras rotas de combustível sustentável de aviação.

A análise é limitada pela ausência de dados financeiros primários das usinas e pela heterogeneidade das fronteiras de custo usadas nas fontes. Pesquisas futuras devem comparar projetos com métricas homogêneas, estimar o efeito de juros, câmbio e disponibilidade sobre o custo nivelado e acompanhar a maturação das novas plantas. Estudos regionais e análises de contratos de SAF também podem testar em que condições a rota celulósica gera valor.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2025: seção 4 - biocombustíveis. Brasília, DF: ANP, 2025a. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2025/secao-4/secao-4_revsci.pdf. Acesso em: 29 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Revendedores de combustíveis: ANP divulga orientações devido à chegada do E30 e B15. Brasília, DF, 21 ago. 2025b. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/revendedores-de-combustiveis-anp-divulga-orientacoes-devido-a-chegada-do-e30-e-b15/. Acesso em: 29 jul. 2026.

ALVIRA, P.; TOMÁS-PEJÓ, E.; BALLESTEROS, M.; NEGRO, M. J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 13, p. 4851-4861, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.11.093.

AMORIM, H. V. de; LOPES, M. L.; OLIVEIRA, J. V. de C.; BUCKERIDGE, M. S.; GOLDMAN, G. H. Scientific challenges of bioethanol production in Brazil. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 91, n. 5, p. 1267-1275, 2011. DOI: 10.1007/s00253-011-3437-6.

ARTHUR, B. W. Competing technologies, increasing returns, and *lock-in* by historical events. *The Economic Journal*, v. 99, n. 394, p. 116-131, 1989.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). Anuário da indústria automobilística brasileira 2025. São Paulo: Anfavea, 2025. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2025/06/DIGITAL-ANUARIO-2025ALT.CAP_4_compressed.pdf. Acesso em: 18 maio 2026.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). BNDES aprova R\$ 1 bilhão para Raízen produzir etanol de segunda geração. Rio de Janeiro, 8 jan. 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/sudeste/BNDES-aprova-R%24-1-bilhao-para-Raizen-produzir-etanol-de-segunda-geracao/>. Acesso em: 29 jul. 2026.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Operações de financiamento. Rio de Janeiro: BNDES, 2026. Disponível em: <https://dadosabertos.bndes.gov.br/dataset/operacoes-financiamento>. Acesso em: 18 maio 2026.

BONOMI, A. *et al.* Etanol de segunda geração poderá ser economicamente viável a partir de 2025. Agência FAPESP, 2017. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/etanol-de-segunda-geracao-podera-ser-economicamente-viavel-a-partir-de-2025/26272>. Acesso em: 15 jan. 2025.

BRANDÃO, V. H.; LIMA, R. J. da C. Dinâmicas de poder na indústria automotiva: uma análise das políticas de eletrificação. *Revista PPC - Políticas Públicas e Cidades*, v. 14, p. 3-12, 2025.

CASTRO SANTOS, M. H. de. Avaliação político-institucional do Proálcool: grupos de interesse e conflito interburocrático. Planejamento e Políticas Públicas, Brasília, DF, n. 1, p. 127-150, jun. 1989.

CHRISTIANO, A. C.; CHRISTIANO, C. Endividamento e principais impactos do programa RenovaBio. JornalCana, 24 abr. 2025.

COASE, R. H. The nature of the firm. Economica, v. 4, n. 16, p. 386-405, 1937.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2023/24, quarto levantamento. Brasília, DF: Conab, abr. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Séries históricas de cana-de-açúcar: indústria. Brasília, DF: Conab, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/series-historicas/cana-de-acucar/industria>. Acesso em: 18 maio 2026.

DAVID, P. A. Clio and the economics of QWERTY. The American Economic Review, v. 75, n. 2, p. 332-337, 1985.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2025/08: investimentos e custos de operação e manutenção (O&M) para biocombustíveis 2026-2035. Brasília, DF: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-343/topico-780/NT-EPE-DPG-SDB-2025-08_Investimentos_Custos_O_e_M_Bios_2026-2035.pdf. Acesso em: 18 jun. 2026.

FURTADO, A. T.; HEKKERT, M. P.; NEGRO, S. O. Of actors, functions, and fuels: exploring a second generation ethanol transition from a technological innovation systems perspective in Brazil. Energy Research & Social Science, v. 70, 101706, 2020. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101706.

GALA, P.; PAURO, G. A difícil realidade do etanol de segunda geração: entre promessas e percalços. Blog Paulo Gala, 18 ago. 2025. Disponível em: <https://www.paulogala.com.br/a-dificil-realidade-do-etanol-de-segunda-geracao-entre-promessas-e-percalcos/>. Acesso em: 29 jul. 2026.

GARCEZ, L. C.; PAIVA, D. Z.; REIS, T. Second generation ethanol (E2G) as an alternative for producing fuel derived from sugar cane: a bibliographical review between 2011 and 2023. Journal of Engineering Research and Reports, 2023.

GIMÉNEZ, A. *et al.* O aumento da produtividade e a busca pela excelência na produção do etanol brasileiro: uma história de sucesso. Research, Society and Development, v. 7, n. 2, 2018.

GRANBIO INVESTIMENTOS S.A. Informações contábeis intermediárias individuais e consolidadas para o período findo em 30 de setembro de 2024. São Paulo: GranBio, 2024. Disponível em: https://www.granbio.com.br/documents/174/Demonstra%C3%A7%C3%A3o_Financeira_GranBio_3T2024.pdf. Acesso em: 29 jul. 2026.

HAMELINCK, C. N.; VAN HOOIJDONK, G.; FAAIJ, A. P. C. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. Biomass and Bioenergy, v. 28, n. 4, p. 384-410, 2005.

HIGASHI, S. Y.; CALEMAN, S. M. de Q.; MANNING, L.; AGUIAR, L. K. de; MONTEIRO, G. F. A. Factors influencing Brazilian sugar and ethanol refineries' failure. *RAUSP Management Journal*, v. 58, n. 1, p. 55-68, 2023.

JUNQUEIRA, T. L. *et al.* Techno-economic analysis and climate change impacts of sugarcane biorefineries considering different time horizons. *Biotechnology for Biofuels*, v. 10, 2017.

LOPES, M. L. *et al.* Ethanol production in Brazil: a bridge between science and industry. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 47, supl. 1, p. 64-76, 2016. DOI: 10.1016/j.bjm.2016.10.003.

LORENZI, B. R.; ANDRADE, T. H. N. de. O etanol de segunda geração no Brasil: políticas e redes sociotécnicas. *Revista Brasileira de Ciências Sociais*, v. 34, n. 100, 2019.

MEDEIROS, P. V. C. *et al.* Second-generation ethanol: concept, production and challenges. *Eclética Química*, v. 48, 2023.

MERA, Z. *et al.* Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2023.

MILANEZ, A. Y. *et al.* De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 41, p. 237-294, mar. 2015.

MORAES, M. A. F. de. Production of ethanol from sugarcane in Brazil: from state intervention to a free market. Cham: Springer, 2014.

MUSSATTO, S. I. *et al.* Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. *Biotechnology Advances*, v. 28, n. 6, p. 817-830, 2010. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2010.07.001.

NORTH, D. C. Institutions, institutional change and economic performance. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

PEROSA, B.; SHIKIDA, P. F. A. Álcool combustível no Brasil e *path dependence*. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, DF, v. 50, n. 2, p. 243-258, 2012.

RAÍZEN S.A. Relatório integrado 2025/26. São Paulo: Raízen, 2026. Disponível em: https://www.raizen.com.br/archives_files/archive210-raizen-ri25-26.pdf. Acesso em: 29 jul. 2026.

REIS, S. R. dos; SILVA, E. A. da. Motores elétricos flex a etanol: uma nova era no setor automotivo mundial. *Revista de Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 12, n. 12, p. 45-48, 2017.

SALLES-FILHO, S. L. M.; CASTRO, P. F. D. de; BIN, A.; EDQUIST, C.; FERRO, A. F. P.; CORDER, S. Perspectives for the Brazilian bioethanol sector: the innovation driver. *Energy Policy*, v. 108, p. 70-77, 2017. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.05.037.

SANTOS, G. R. dos (org.). Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil: desafios, crises e perspectivas. Brasília, DF: Ipea, 2016.

SENNA, P.; ANSANELLI, S. Etanol de primeira ou de segunda geração? Uma comparação entre os ciclos produtivos. *Revista Brasileira de Energia*, 2016.

SHIBUKAWA, V. P. *et al.* Impact of product diversification on the economic sustainability of second-generation ethanol biorefineries: a critical review. *Energies*, v. 16, 2023.

STEINMUELLER, W. E. Economics of technology policy. In: HALL, B. H.; ROSENBERG, N. (ed.). *Handbook of the economics of innovation*. Amsterdam: Elsevier, 2010. v. 2, p. 1181-1218.

SZMRECSÁNYI, T.; MOREIRA, E. P. O desenvolvimento da agroindústria canavieira desde a Segunda Guerra Mundial. *Estudos Avançados*, v. 5, n. 11, p. 67-79, 1991.

VIDAL, M. de F. *et al.* O Brasil como grande player no mercado mundial de etanol. *Revista de Política Agrícola*, ano 30, n. 3, p. 57-73, jul./set. 2021.

WILLIAMSON, O. E. *The economic institutions of capitalism*. New York: Free Press, 1985.

WOLFFENBUTTEL, R. F. Políticas setoriais e inovação: entraves e incentivos ao automóvel elétrico no Brasil. *Revista Brasileira de Inovação*, Campinas, v. 21, p. 3-28, 2022.

ZART, V. *et al.* Etanol 1,5G: uma discussão sobre a integração entre o etanol de primeira e segunda geração. In: *Ciência, tecnologia e inovação: do campo à mesa*. [S. l.]: Editora Científica, 2020.