

RELATÓRIO CICLO-OTTO

GT-E2G

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES TÉCNICAS E
ECONÔMICAS PARA PRODUÇÃO EM LARGA
ESCALA DO ETANOL DE 2ª GERAÇÃO

21 DE JUNHO DE 2022

GT – E2G

COORDENAÇÃO: BNDES



Relatório do GT-E2G

Avaliação das Condições Técnicas e Econômicas para Produção em Larga Escala do Etanol de 2ª Geração

COMPONENTES DO GT-E2G

O GT – E2G CONTOU COM A PARTICIPAÇÃO DE REPRESENTANTES DE GOVERNO, INICIATIVA PRIVADA, ACADEMIA E EXPERTS DA ENGENHARIA NACIONAL.

ABBI
BNDES
EPE
FINEP
LNBR/CNPEM
MAPA
ME
MME
UNICAMP

Estrutura do Documento

1. Introdução
2. Importância do E2G para o Brasil
 - i. Aumento da produtividade do etanol e abastecimento energético
 - ii. Descarbonização e auxílio no cumprimento da NDC
 - iii. Superação do debate internacional “food vs fuel” e potencial de exportações
 - iv. Biorrefinarias e agregação de valor
3. Situação atual dos principais projetos de E2G em curso no Brasil e no Mundo
4. Principais desafios e oportunidades identificadas
 - i. Assimetria de informação sobre o desempenho tecnológico
 - ii. Uso alternativo do bagaço e outras biomassas
 - iii. Cenário atual de custos e principais pontos de melhoria
 - iv. Potencial de produção e de investimentos em E2G
5. Avaliação de alternativas de políticas públicas
 - i. Mandato de mistura obrigatória
 - ii. Leilões
 - iii. Isenções
 - iv. Subvenção
 - v. Desoneração dos investimentos
 - vi. Incentivos no âmbito do RenovaBio
 - vii. Financiamento
 - viii. Fomento à inovação tecnológica
6. Referências



CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

A Presidência da República, através da Resolução 07, de 20 de abril de 2021, instituiu o Programa Combustível do Futuro (PCF), com o objetivo de propor medidas para incrementar a utilização de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono, bem como da tecnologia veicular nacional com vistas à descarbonização da matriz energética de transporte nacional.

O Etanol celulósico, ou etanol de segunda geração (E2G) é um combustível líquido com baixa intensidade de emissões de carbono (aproximadamente 90% menores do que as emissões da gasolina), idêntico ao etanol tradicional do ponto de vista físico-químico, podendo ser usado diretamente para consumo veicular, assim como para mistura na gasolina. Já existem no Brasil duas plantas em operação produzindo e comercializando este combustível, tendo com destino prioritário para o mercado internacional, além de mais uma em construção e outra anunciada oficialmente para 2023, o que demonstra que os principais desafios tecnológicos para sua produção industrial já foram superados.

O E2G, entretanto, ainda possui desafios para reduzir os seus custos de produção, que podem ser superados à medida que a sua produção seja escalada. Nesta fase, são necessários estímulos econômicos para incentivar os investimentos e proporcionar os ganhos de escala que irão tornar competitivo este combustível.

Por este motivo, foi criado um grupo de trabalho específico para o E2G (GT E2G) dentro do Subcomitê “Ciclo Otto”, no âmbito do Programa Combustível do Futuro, sob a coordenação do BNDES e com participação de diversos ministérios, instituições públicas e pelo setor privado, representado pela Associação Brasileira de Bioinovação (ABBI).

O GT E2G tem como objetivo levantar dados e informações que ajudem a mapear o estado da arte da tecnologia e dos investimentos na produção de etanol 2G, além de propor políticas públicas para este desenvolvimento. Para tanto, foram realizados workshops com empresas e instituições de pesquisa ligadas ao E2G ao longo de 2021, onde foram discutidas a situação atual da produção de E2G e suas perspectivas futuras.

Com base nessas discussões, foi alinhado com participantes do GT E2G a elaboração de contribuições específicas para esta Nota Técnica, cada um abordando aspectos distintos de sua estrutura, as quais foram adaptadas e unificadas para produzir este documento técnico. Além desta introdução, há uma seção sobre a importância do E2G para o Brasil, que discute os ganhos potenciais de uma maior inserção na matriz de combustíveis. Em

seguida, são apresentados o estágio atual das diversas iniciativas de E2G pelo Mundo, assim como os principais desafios que ainda dificultam uma expansão mais rápida de investimentos. Finalmente, a última seção traz uma série de alternativas de políticas públicas que poderiam contribuir para o desenvolvimento do E2G no Brasil.

CAPÍTULO II - IMPORTÂNCIA DO E2G PARA O BRASIL

2.1 Aumento da produtividade do etanol e abastecimento energético

A tecnologia do E2G permite aproveitar a biomassa vegetal para produzir etanol em qualquer região do planeta, a partir de qualquer atividade agroflorestal e resíduos celulósicos na construção, urbanos, mobiliário e outros, podendo, em determinados casos, ter uma emissão de carbono negativa no balanço final.

No caso da cana-de-açúcar, o rendimento da produção de etanol por área plantada pode dobrar e, como o uso de biomassa reduz a necessidade de cultivo de variedades exclusivas para a produção de etanol, há o benefício adicional de garantir a segurança energética e alimentar, afastando o debate “food vs. fuel”, que, embora não se aplique ao Brasil, às vezes é colocado de forma genérica para todos os biocombustíveis.

Conforme estimativa detalhada na seção 4.4, a indústria E2G brasileira tem potencial para adicionar anualmente quase 6 bilhões de litros de etanol, mesmo sem considerar o potencial de crescimento futuro do E2G com a introdução de novas matérias-primas como é a cana-energia (ver seção 4.2).

Para que as metas de descarbonização definidas pelo RenovaBio sejam alcançadas, estima-se que seria necessário que a produção de etanol do Brasil alcance cerca de 50 bilhões de litros/ano até 2030, o que exigirá a adição de quase 20 bilhões de litros de capacidade instalada. Considerando o prazo relativamente curto para a construção de novas unidades (greenfield), o E2G pode dar uma contribuição relevante pois não depende de ampliação de áreas e plantio para a formação de canaviais, que podem levar até 5/6 anos para atingirem capacidade máxima de produção.

2.2 Descarbonização e auxílio no cumprimento da NDC

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC vem alertando sobre a necessidade de significativas reduções das emissões de gases de efeito estufa (GEE) para limitar o aquecimento global e suas consequências, como o aumento na frequência e intensidade de extremos climáticos, incluindo ondas de calor, precipitação pesada, secas agrícolas, entre outros. Neste sentido, o aumento da produção e uso de biocombustíveis, com ênfase na participação de biocombustíveis avançados (como o E2G) é um dos

comprometimentos centrais do Brasil junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), apresentado em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) no âmbito do Acordo de Paris – o principal compromisso internacional do Brasil na área de mudança do clima. Tendo como base o ano de 2005, o Brasil comprometeu-se a reduzir em 43% as emissões até 2030, confirmando a meta estabelecida em 2015, e indicou o objetivo de atingir neutralidade climática (carbono zero) em 2050 (NDC Registry, 2021). Fruto desse compromisso brasileiro, e com objetivo de promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, foi instituída pela Lei nº 13.576/2017 a nova Política Nacional de Biocombustíveis, o RenovaBio.

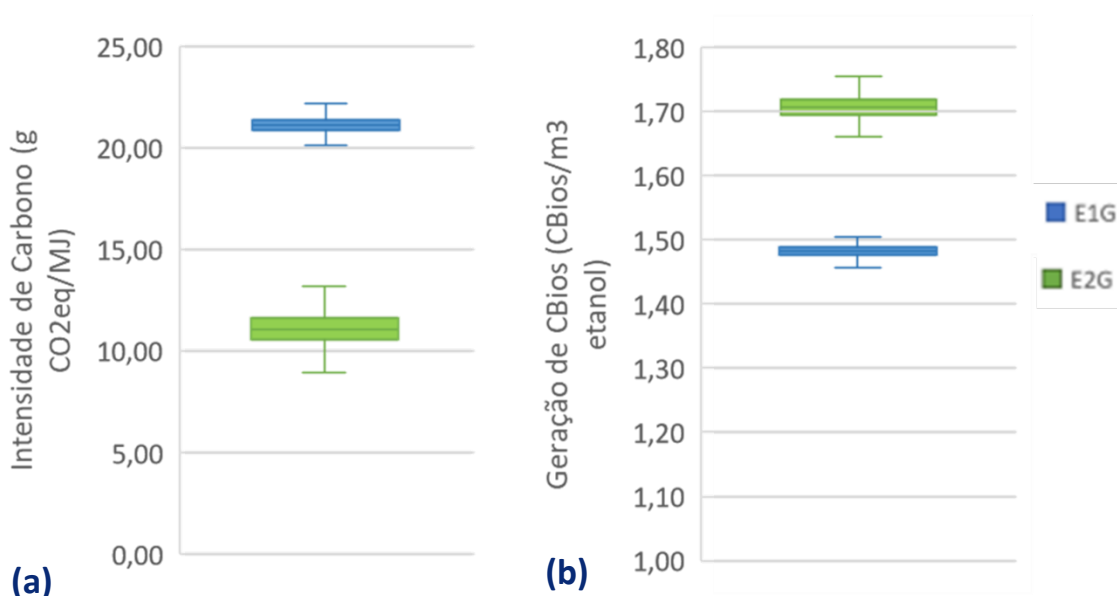
O principal instrumento do RenovaBio é o estabelecimento de metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de combustíveis de transportes, de forma a incentivar o aumento da produção e da participação de biocombustíveis na matriz energética do país. A política valoriza os biocombustíveis em função de sua capacidade de mitigação de GEE em relação ao seu substituto fóssil. Dessa forma, quanto menores forem as emissões de GEE no ciclo de vida dos biocombustíveis e maiores forem os volumes produzidos, maior será a geração de créditos de descarbonização (CBIO) pelas unidades produtoras – um CBIO corresponde à emissão evitada de uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq).

Nesse sentido, o mecanismo do RenovaBio incentiva duplamente a produção de E2G: ao aumentar a quantidade de biocombustíveis gerada a partir da mesma quantidade de matéria-prima processada, e ao produzir um biocombustível com menor Intensidade de Carbono, mais CBIOs podem ser gerados pelas unidades produtoras.

Contudo, quando comparado a mecanismos internacionais que estabelecem metas específicas para biocombustíveis avançados, como o Renewable Fuel Standard (RFS) dos Estados Unidos, ou a Renewable Energy Directive (RED II) da União Europeia, os incentivos do RenovaBio para o E2G ainda podem ser considerados tímidos, uma vez que não há nenhuma diferenciação em relação a biocombustíveis tradicionais como o etanol de primeira geração (E1G) ou o biodiesel de soja. Existe potencial para utilização de mecanismos previstos na Lei 13.576/2017 (Lei do RenovaBio) que ainda não foram regulamentados, tais como os incentivos a estabelecimento de contratos de longo prazo e incentivos à captura de carbono com emissão líquida negativa no processo produtivo. A aplicação de tais instrumentos será abordada adiante neste documento.

Diversos trabalhos na literatura (IEA Bioenergy, 2019; OECD/IEA, 2017; Wang et al, 2012) mostram que os impactos ambientais, principalmente em termos de diminuição da emissão de GEE e do menor uso de recursos energéticos fósseis, estão entre os principais benefícios associados à produção de E2G. Esse melhor desempenho ambiental do E2G também tem se observado nas plantas brasileiras. Com base em dados próprios do LNBR/CNPEM e também obtidos junto às empresas produtoras de E2G no Brasil, calculou-se que o nível de emissões do E2G é cerca da metade do E1G, ao que corresponde um acréscimo na geração de CBIOs em torno de 15%, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1. (a) Intensidade de carbono; (b) Geração de CBios. Cenários E1G e E2G descritos na seção 4.3 deste documento.



Fonte: elaboração própria

Por ser produzido a partir da fração lignocelulósica da biomassa, o E2G apresenta uma grande vantagem competitiva, podendo valer-se de resíduos agroindustriais – como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar – como principal matéria-prima para sua produção. A produção baseada em resíduos lignocelulósicos ajuda ainda a dirimir os debates internacionais acerca da competição entre a produção de biocombustíveis e de alimentos, e em relação às emissões indiretas ocasionadas pelas mudanças do uso da terra.

Apesar dessas discussões serem menos relevantes no contexto brasileiro, visto que o país apresenta larga experiência na produção de E1G integrado à produção de açúcar, além

de contar com vastas extensões de áreas para expansão da agricultura sem a necessidade de ocupação de áreas de vegetação nativa (Hernandes et al., 2021), a produção de E2G pode ajudar o Brasil a ter um produto ainda mais competitivo para exportação, levando-se em conta o interesse manifesto e já praticado das diretrizes internacionais de utilização de biocombustíveis avançados.

Desta forma, os potenciais benefícios ambientais da produção de E2G precisam ser quantificados através de uma avaliação abrangente da sustentabilidade. Essa avaliação deve acompanhar a implementação em larga escala da produção, uma vez que ela ainda se encontra em estágio inicial, logo, com grande potencial para evolução. Deve acompanhar também os possíveis avanços tecnológicos – como, por exemplo, o contínuo aprimoramento da tecnologia para enzimas e micro-organismos geneticamente modificados, como incentivos ao fortalecimento das pesquisas nacionais e a diversificação de produtos num contexto de biorrefinaria alicerçada na fragmentação e valoração das diferentes frações da biomassa – garantindo que as mudanças caminhem no sentido de aumentar a sustentabilidade do produto.

2.3. Superação do debate internacional “food vs fuel” e potencial de exportações

A produção do E1G faz-se a partir do cultivo direto de espécies vegetais específicas de alta produtividade e com fácil extração dos açúcares. Embora no Brasil a área agrícola utilizada pela cana-de-açúcar para a produção de E1G seja relativamente pequena, em outros países que não dispõem dessa alternativa e que utilizam majoritariamente grãos para produção de etanol, ainda persiste a preocupação sobre a competição pelo uso do solo para a produção de alimentos ou combustíveis.

Contudo, o cultivo vegetal em geral produz também uma relação muito grande de biomassa residual, ainda não totalmente aproveitada se for considerado o alto potencial energético e químico existente.

Em vista disto, foi desenvolvida a tecnologia do “Etanol de 2ª Geração” (E2G), que consiste em produzir etanol a partir dos carboidratos que não estão naturalmente acessíveis à ação das leveduras, mas que estão na forma de fibras poliméricas que constituem as estruturas de sustentação das plantas, como colmos, pontas, folhas, cascas, outros resíduos agrícolas. Esse material é chamado de biomassa lignocelulósica, e constitui a maior parte dos resíduos agrícolas e florestais no mundo.

O domínio recente de toda a tecnologia E2G permitiu aproveitar ainda mais o poder energético e químico dos cultivos agrícolas, incluindo seus resíduos, além de tornar possível a produção de etanol em qualquer região do planeta, usando a biomassa local de qualquer atividade agroflorestal, desde as taigas da Sibéria até as savanas africanas.

Desse modo, o E2G, independente de sua origem, não compete com a produção de alimentos, por ser produzido a partir de resíduos (bagaço, palha e outros coprodutos remanescentes do processamento de biomassa). Pelo contrário, na medida em que ele usa como matéria-prima resíduos produzidos pela indústria de alimentos, ele possui o potencial de aumentar a geração de valor e os investimentos nestas indústrias.

2.4. Biorrefinarias e agregação de valor

A necessidade de substituir o atual modelo de produção industrial, fortemente baseado no uso de recursos fósseis, por um baseado em recursos renováveis é amplamente conhecida e surge por diferentes razões, tais como a necessidade em atender a uma agenda para a emergência climática, por exemplo, com metas de zerar emissões de CO₂ até 2050 (IEA, 2021), e a possibilidade de instabilidades na disponibilidade e no preço do petróleo por questões geopolíticas.

É nesse sentido, que o desenvolvimento e a implantação de biorrefinarias surge como uma alternativa bastante atraente, agregando valor às cadeias do agronegócio e contribuindo diretamente com os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), tal qual proposto pelas Nações Unidas em sua Agenda 2030.

De forma bastante genérica, uma biorrefinaria representa uma instalação industrial onde diversos produtos derivados de biomassa, como biocombustíveis, bioenergia e biomoléculas de elevado valor agregado, tais como biopolímeros, biosurfactantes, biopigmentos e proteínas para nutrição humana e animal, podem ser coproduzidos a partir de uma mesma fonte renovável, como biomassa vegetal e/ou resíduos agroindustriais. O objetivo, portanto, de uma biorrefinaria é transformar os diferentes constituintes biológicos da biomassa (açúcares, amidos, lipídios, celulose, hemicelulose e lignina) em produtos desejados através de uma série de combinações tecnológicas, envolvendo etapas de conversão, separação e purificação.

Dessa forma, a diversificação do portfólio de produtos permite aproveitar as sinergias entre os processos industriais, seja através do aproveitamento de energia, materiais ou instalações, reduzindo os custos de produção e impactos ambientais associados, além de diminuir a suscetibilidade às oscilações de preços no mercado. No Brasil, um exemplo bem-sucedido e consolidado são as biorrefinarias de cana-de-açúcar, que produzem etanol, açúcar, eletricidade e outros coprodutos tais como proteína para ração animal, biogás/biometano e biofertilizantes.

Por sua vez, a produção de E2G, além das vantagens intrínsecas às biorrefinarias, é um exemplo de aplicação do conceito da economia circular por ser baseada na utilização de resíduos agroindustriais como matéria-prima. Para sua produção, novas tecnologias são incorporadas ao processamento industrial para possibilitar o fracionamento dos materiais lignocelulósicos em açúcares avançados e lignina. Os açúcares podem ser, majoritariamente, utilizados na produção de E2G e, em uma escala menor, em biomoléculas de maior valor agregado. Ainda, a lignina, obtida como coproduto do processo, tem uso imediato como combustível na geração de energia; no entanto, sua valorização pode trazer benefícios adicionais à biorrefinaria, seja como macromolécula ou para obtenção de seus derivados. A combinação de produtos associados à produção de E2G será definida caso a caso, uma vez que depende da demanda de mercado – a produção de bioquímicos está mais atrelada a nichos específicos –, do processo de conversão envolvido, maturidade das tecnologias e preços de comercialização.

Dada a escala de produção dos biocombustíveis, diferentes conformações tecnológicas poderão compor o parque industrial das biorrefinarias. Nesse sentido, o E2G poderá vir a ser a tecnologia facilitadora para o fortalecimento e a diversificação da bioeconomia no Brasil.

A oferta de biomassa em custos competitivos permitirá a transição de outros segmentos que atualmente se baseiam em insumos fósseis, como a petroquímica, o que representa uma grande oportunidade para a produção, em uma mesma planta, de químicos verdes e E2G. O conjunto de produtos químicos, sobretudo aqueles com diversas aplicações – mais conhecidos como building blocks –, compreende uma grande diversidade de opções, como o ácido succínico, butadieno, farneseno, óleos especiais, entre outros (BAIN & COMPANY; GAS ENERGY, 2014).

Esse conjunto de atividades econômicas baseadas na utilização de modernas tecnologias de conversão de biomassa, que tem sido comumente denominado de biotecnologia industrial, tem potencial de gerar investimentos de mais de US\$ 130 bilhões nos próximos 20 anos, segundo estimativas da Associação Brasileira de Bioinovação (ABBI).










CAPÍTULO III – SITUAÇÃO ATUAL DOS PRINCIPAIS PROJETOS DE E2G EM CURSO NO BRASIL E NO MUNDO

Até o final de outubro de 2021, além de plantas combinadas (ao E1G ou corn kernel fibers) nove plantas comerciais específicas para etanol celulósico haviam sido construídas no mundo¹, conforme indicado na tabela abaixo. Das nove plantas construídas, duas foram descomissionadas, vendidas e convertidas para outra finalidade: A planta da Abengoa, que foi vendida para a Synata é atualmente usada para produção de químicos e combustíveis líquidos a partir de gás natural. A outra, pertencente à Dupont, foi vendida para a Verbio, e convertida para a produção de Gás Natural Renovável.

As 7 plantas que se encontram em prontidão operacional produzem quantidades inferiores à sua capacidade nominal, em virtude do custo mais elevado do que o etanol tradicional (1ª geração), além de nem sempre ser possível a comercialização de toda a produção com preços-prêmio².

Tabela 1 – Plantas Comerciais de E2G no Mundo

Plantas Comerciais de Etanol Celulósico Construídas no Mundo
Status de Produção
Outubro de 2021

País	Produtor	Localização	Capacidade (MM litros)	Status
	Clariant	Podari, Romênia	60,52	Em Construção
	Enerkem	Edmonton, Canadá	37,85	Prontidão Operacional
	Granbio	São Miguel dos Campos, AL	50,00	Prontidão Operacional
	Poet- DSM	Emmetsbug, Iowa	75,70	Hibernada
	Quad County	Galva, Iowa	15,14	Prontidão Operacional
	Raizen	Piracicaba, São Paulo	40,00	Prontidão Operacional
	Versalis	Crescentino, Itália	56,78	Prontidão Operacional
	Dupont	Nevada, Iowa	113,55	Descomissionada
	Abengoa	Hugoton, Kansas	94,50	Descomissionada

Fonte: Mastersenso

¹ Consideradas plantas comerciais aquelas com capacidade nominal de produção superior a 1 milhão de litros por mês.

² Neste caso, o preço-prêmio é a diferença positiva entre os preços do etanol de segunda e primeira geração.

CAPÍTULO IV - PRINCIPAIS DESAFIOS E OPORTUNIDADES IDENTIFICADAS

Ao longo das discussões com empresas do setor de etanol e fornecedores de tecnologia para E2G, foram citados diversos fatores que têm impedido maior expansão do E2G, assim como oportunidades para superação desses desafios.

4.1 Assimetria de informação sobre o desempenho tecnológico

Como ocorre na maioria dos ciclos de difusão de inovação tecnológica, o etanol 2G também tem enfrentado obstáculos derivados da assimetria de informação, entre os potenciais usuários e as empresas inovadoras detentoras das tecnologias e know-how, sobre o desempenho tecnológico e econômico do E2G.

Por terem menor conhecimento sobre o desempenho do E2G em escala comercial, os potenciais usuários dessa inovação não dispõem de informação suficiente para avaliar com segurança a viabilidade técnico-econômica desse investimento. Ao longo de conversas com empresas que ainda não demonstraram interesse em investir no E2G, foram levantadas dúvidas sobre a existência de desafios tecnológicos não superados, bem como a respeito do custo de produção ainda ser relativamente alto, o que exige busca por prêmios no exterior, gerando risco econômico.

Por outro lado, as empresas pioneiras no desenvolvimento de tecnologias para o E2G, embora admitam que o custo de produção ainda seja superior ao etanol 1G (ver seção 4.3), têm relatado avanços significativos no desempenho das tecnologias. Para elas, os obstáculos tecnológicos que atrasaram a evolução do E2G, sobretudo aqueles relacionados às etapas de movimentação e pré-tratamento da biomassa, foram totalmente superados ao longo dos últimos anos.

Ocorre que a superação desses desafios tecnológicos exigiu diversas soluções inovadoras, que naturalmente estão protegidas por mecanismos de segredo industrial e acordos de confidencialidade, o que dificultam o compartilhamento desse conhecimento com potenciais usuários, razão pela qual se estabelece a já mencionada assimetria de informação.

Contudo, há que se ressaltar que, à medida que novas plantas de E2G estão sendo construídas tanto no Brasil quanto no resto do Mundo, o conhecimento sobre o desempenho do E2G se difunde gradativamente, elevando a capacidade de avaliação de potenciais usuários.

Finalmente, cabe destacar que as empresas fornecedoras de tecnologias para E2G estão desenvolvendo modelos de licenciamento que oferecem segurança e redução de risco tecnológico para quem deseja investir neste biocombustível, o que, em conjunto com o efeito demonstração das novas plantas, devem contribuir para superar os obstáculos derivados da assimetria de informação.

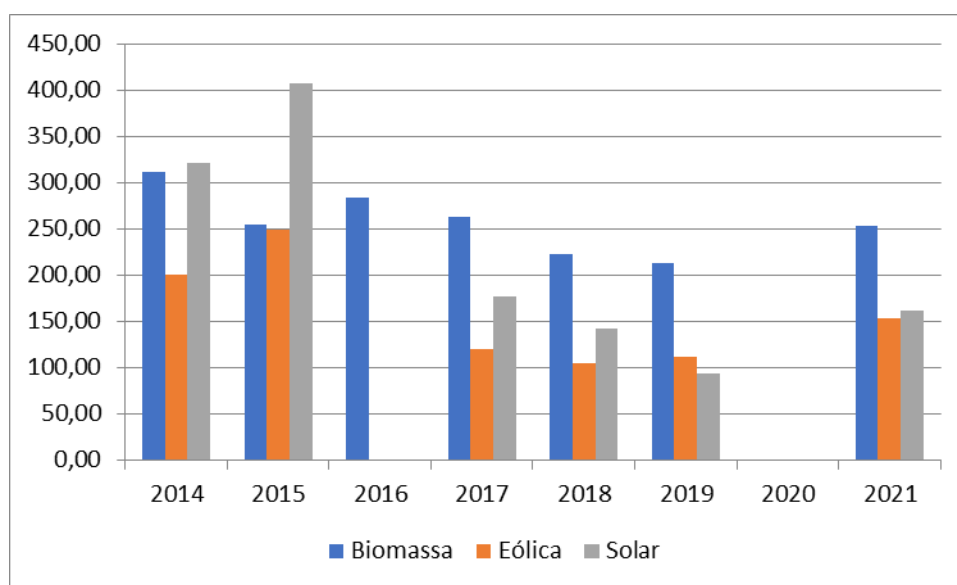
4.2 Uso alternativo do bagaço e outras biomassas

As empresas que teriam condições econômico-financeiras de investir no E2G precisam considerar as formas de uso atual para a biomassa, entre as quais se destaca a cogeração, cujo desempenho da tecnologia já é amplamente conhecido, principalmente pelo setor sucroenergético.

Por essa razão, muitas vezes a opção pelo investimento na implantação/ampliação da cogeração tem sido indicada como preferencial em detrimento à produção do E2G, tendo em vista o menor risco tecnológico e a demanda crescente por eletricidade renovável no Brasil.

Contudo, embora não se possa negar o potencial da cogeração de biomassa, há que se ressaltar que outras fontes de geração elétrica renovável, como eólica e solar, têm se mostrado mais competitivas ao longo dos últimos, conforme ilustra a tabela a seguir.

Gráfico 1 - Preço médio dos últimos leilões para contratação de geração elétrica – R\$/MWh



Fonte: CCEE

Como resultado, o crescimento da capacidade geração de energia eólica e solar tem sido bem mais significativo. Conforme mostra a tabela a seguir, desde 2014 essas fontes cresceram, respectivamente, 5,7 e 32 vezes mais rapidamente do que a biomassa, embora a fonte solar tenha partido de uma base muito pequena.

Tabela 2 - Capacidade Instalada de Geração Elétrica por Fonte – Em MW

Fonte	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Var. anual (%)
Biomassa	12.341	13.257	14.147	14.505	14.790	14.978	15.306	3%
Eólica	4.888	7.633	10.124	12.283	14.390	15.378	17.131	17%
Solar	15	21	24	935	1.798	2.473	3.287	96%

Fonte: EPE

Com isso, além do potencial de crescimento da cogeração da biomassa, é necessário criar alternativas para a utilização da biomassa residual de cana, papel que pode ser desempenhado pelo E2G. Nesse sentido, o E2G pode servir como opção de valorização da biomassa em anos em que o preço da eletricidade no mercado estiver menos remunerador, sobretudo se considerarmos que a maior parte dos contratos de venda de eletricidade obtidos pelo setor sucroenergético com precificação pré-definida nos leilões de energia devem se encerrar até o final desta década.

Ademais, também é importante ressaltar que, mesmo considerando um cenário em que tanto eletricidade quanto o E2G tenham preços remuneradores, não há necessariamente um “dilema” entre ambos. Isso ocorre por que, na presença de estímulos econômicos suficientes, é perfeitamente possível aumentar a disponibilidade de biomassa nas usinas, conforme ilustra o quadro a seguir.

Quadro 1 – Alternativas para aumento da disponibilidade de biomassa

Eficiência energética	Investimentos em processos industriais com menor consumo de energia e em sistemas de cogeração mais eficientes utilizam menos matéria-prima e as colocam em disponibilidade para outros fins
Palha	Embora tenha que ser parcialmente deixada no campo, por questões agronômicas, ainda há significativo espaço para maior recolhimento de palha, sobretudo considerando o cenário de maior restrição de peso no transporte da cana, o que deve incentivar o recolhimento conjunto da palha (Projeto SUCRE 2020).. Ademais, já existem máquinas colhedoras e implementos agrícolas desenhados especificamente para o enfardamento e recolhimento separado da palha.

Vinhaça	Nos últimos anos tem se observado crescimento importante dos investimentos em escala industrial para a biodigestão de resíduos da produção sucroenergética, como por exemplo vinhaça e torta de filtro, cujo resultado é a produção do biogás que pode ser utilizado para aumentar a capacidade de cogeração das usinas.
Cana energia (CE)	Historicamente o melhoramento genético da cana foi orientado apenas para o acúmulo de açúcar. Contudo, com a tendência de maior valorização da fibra, tem crescido o interesse por variedades de cana com maior conteúdo de fibra, como é caso da cana energia, que se divide em dois tipos: - CE Tipo 1: é uma variedade de cana-de-açúcar mais rústica, com maior conteúdo de fibra, mas ainda com grande quantidade de açúcar. Produtividade agrícola e ciclo produtivo são os mesmos da cana-de-açúcar. - CE Tipo 2: seria a CE propriamente dita, com baixo conteúdo de açúcar e muita fibra. Apresenta elevada produtividade agrícola, podendo chegar a mais de 200 t por hectare, e ciclo produtivo de mais de 10 anos.

Fonte: elaboração própria com base nas discussões técnicas com as empresas.

4.3 Cenário atual de custos e principais pontos de melhoria

Visão das empresas produtoras e fornecedores de tecnologias

A partir de entrevistas com produtores e com empresas fornecedoras de tecnologias e insumos para E2G, foram identificados os principais itens de custos, assim como os espaços para aumento de eficiência, que serão relatados a seguir.

A matriz de custos de qualquer processo industrial corresponde a quatro partes principais: matéria-prima, CAPEX (despesas de capital), OPEX (despesas operacionais) e energia, utilidades & efluentes. Como ocorre com frequência no período introdutório de novas tecnologias, o E2G, apesar das vantagens no primeiro e no último item dessa lista, ainda enfrenta desafios importantes nos dois fatores de custos intermediários (CAPEX e OPEX). Espera-se que haja uma redução significativa do custo inicial de implantação com o desenvolvimento do setor e o avanço em sua “curva de aprendizado”, sobretudo pelo aumento no número de instalações e de escala de produção, com conseqüente aumento da oferta e redução do preço dos principais insumos, como no caso das enzimas celulósicas.

A redução de custo também se dará por uma maior padronização³ das soluções de engenharia com a fabricação mais econômica dos principais itens de processo em maior escala, bem como devido à concorrência entre os fornecedores habilitados que possuirão conhecimento para otimizar os processos produtivos.

Desse modo, a evolução do E2G terá que passar por todas as etapas de evolução de um novo paradigma tecnológico, assim como ocorreu com o E1G, desde o advento do Proálcool, que utilizou várias políticas públicas no seu início. Este obteve grande sucesso no estabelecimento da sua Curva de Aprendizado, levando à redução de custo de cerca de três vezes em 30 anos, viabilizando o maior programa de substituição de fósseis na mobilidade no mundo e colocando o Brasil como líder nesta área, até hoje.

Os desafios principais no CAPEX, ou seja, a necessidade de se encontrar soluções de engenharia robustas e baratas no projeto e operação dos equipamentos e outros equipamentos de processo, como bombas, válvulas, sensores, sistemas de controle etc. são:

Alto custo do sistema logístico de coleta de biomassa (palha) espalhado em grandes áreas, em contato com o solo e de baixa densidade. Embora se colete biomassa em qualquer empreendimento agrícola no mundo, a biomassa residual lignocelulósica tem de ter baixo custo e a menor quantidade possível de impurezas, pois terão de ser separadas e descartadas;

Desafio da calibragem da quantidade de biomassa (palha) a ser coletada em relação ao volume ideal que deve ser deixado no campo, com vistas ao melhor desenvolvimento da planta para os próximos cortes e o volume ideal no processo produtivo do E2G na indústria;

Alto custo de sistemas de condicionamento da biomassa. Como se trata de resíduos de baixa densidade, a sua redução de tamanho (granulometria), separação ou limpeza é um grande desafio, tendo em vista o grande tamanho dos equipamentos envolvidos

³ Tal padronização tem se mostrado desafiadora pelo fato de as soluções de engenharia serem quase inéditas, uma vez que não há outra indústria relevante de processamento de fibras oriundas de biomassa de onde se poderia adaptar estes itens de processo. A indústria florestal (polpa e papel) de fato também usa biomassa, porém muito mais padronizada e de propriedades de fluxo mais comuns com as outras indústrias de processo (como petróleo, tratamento de água, cimento, metalurgia, naval, automotiva, etc).

(necessidade de processar altos volumes de material, correspondendo a baixos pesos). Devido à heterogeneidade característica destes resíduos, a sua separação de outros materiais é também um grande desafio, sendo típicos períodos de baixa eficiência de separação, devido às variações de qualidade e de condições ambientais

Alto custo dos sistemas de pré-tratamento⁴, tendo em vista a necessidade de operar com elevados teores de sólidos heterogêneos e abrasivos em suspensão (atípico para soluções de engenharia de processos), em pressões e temperaturas relevantes e, frequentemente, em regimes muito turbulentos. Estas condições levam à erosão e, eventualmente, corrosão significativas de equipamentos caros, tornando frequente a necessidade de usar materiais mais resistentes que aqueles utilizados na produção de commodities.

O processo do E2G é intensivo em soluções de separação de sólidos, com biomassas de características pouco ainda pouco conhecidas, tanto para permitir a separação dos diferentes açúcares celulósicos como separar e concentrar a lignina⁵.

Como os açúcares celulósicos, que serão convertidos em etanol pela fermentação, estão protegidos numa estrutura tridimensional complexa e mecanicamente resistente⁶, a sua separação desta matriz exige tempo considerável e condições intensas de agitação e mistura na hidrólise em condições próximas da assepsia, o que não é comum em outras indústrias, mesmo semelhantes, como a do etanol de milho.

Em termos do OPEX, o principal desafio é a necessidade do uso de coquetéis enzimáticos para uma hidrólise muito mais desafiadora que a hidrólise do amido de grãos, utilizados largamente para a fabricação de etanol, mesmo porque o amido está nas sementes exatamente para ser hidrolisado e consumido pelo germe da semente da planta, na sua germinação e crescimento. Mesmo assim, no período de 1980 a 2005 o custo dessas enzimas, que já era menor do que os coquetéis enzimáticos lignocelulósicos, caiu 70% (Hettinga et al 2009).

⁴ O pré-tratamento da biomassa visa simplificar a estrutura tridimensional dos resíduos, permitindo seu fluxo por reatores e reações superficiais de hidrólise.

⁵ A lignina, que é utilizada como o combustível principal do processo de produção do E2G, fica permanentemente insolúvel e não reagente em todas as fases do processo, ocupando espaço e tornando mais difícil a homogeneização das suspensões.

⁶ A planta precisa de porte ereto, expor as folhas à radiação solar, resistir às condições ambientais variáveis de chuva e vento e posicionamento em relação ao solo, de ataque de insetos e outros herbívoros.

Estas enzimas celulósicas apresentam maior complexidade e custo do que as enzimas para amido, além de atenderem a um mercado relativamente menor do que as dedicadas a amido. A indústria de processamento de amido já atingiu níveis de maturidade e escala onde as enzimas não representam mais um desafio relevante, desenvolvimento que foi acelerado pelo interesse comum de outras indústrias, como alimentos e bebidas à base de amido.

Estimativa de custos e perspectivas de evolução

Os custos envolvidos na produção de E2G dependem de diversos fatores, com destaque para a região em que a unidade industrial está instalada, que influencia fortemente questões de logística e oportunidades relacionadas às áreas agrícolas, matérias-primas, insumos e produtos. Por exemplo, a comparação dos custos de produção de E2G em diferentes instalações industriais no mundo mostrou o potencial competitivo do Brasil em função da disponibilidade de biomassa com menor custo, uma vez que os demais custos tendem a ser similares (IEA Bioenergy, 2020).

Outros fatores que influenciam os custos incluem a capacidade de processamento, configuração tecnológica e se há integração com instalações pré-existentes. A integração com outros processos, como a produção de E1G, permite o compartilhamento de infraestrutura, equipamentos e mão-de-obra.

Para avaliar a competitividade do E2G no contexto brasileiro, a comparação com o etanol convencional (E1G) pode servir como balizador. Considerando duas novas instalações (greenfield) com a mesma capacidade anual de produção de etanol de cerca de 80 milhões de litros, os custos de produção foram estimados, considerando-se 2 cenários:

- E1G – produção de E1G em destilaria autônoma, processando cerca de 1 milhão de toneladas de colmos de cana-de açúcar, em base úmida, durante a safra (200 dias efetivos de operação) e cogeração de vapor e eletricidade a partir de bagaço de cana-de-açúcar.
- E2G – produção de E2G em unidade industrial independente (*standalone*), processando cerca de 300 mil toneladas, em base seca, de bagaço de cana-de açúcar (considerando 300 dias efetivos de operação, com estoque de biomassa para entressafra), com cogeração de vapor e eletricidade a partir de resíduos de hidrólise enzimática.

Também foi realizada uma análise de sensibilidade considerando que uma planta E2G poderia se beneficiar da integração com uma unidade de produção 1G (integração E1G+E2G), aproveitando sinergias entre ambos os processos e compartilhamento de infraestrutura e equipamentos, reduzindo o CAPEX em até 25% (IEA Bioenergy, 2020).

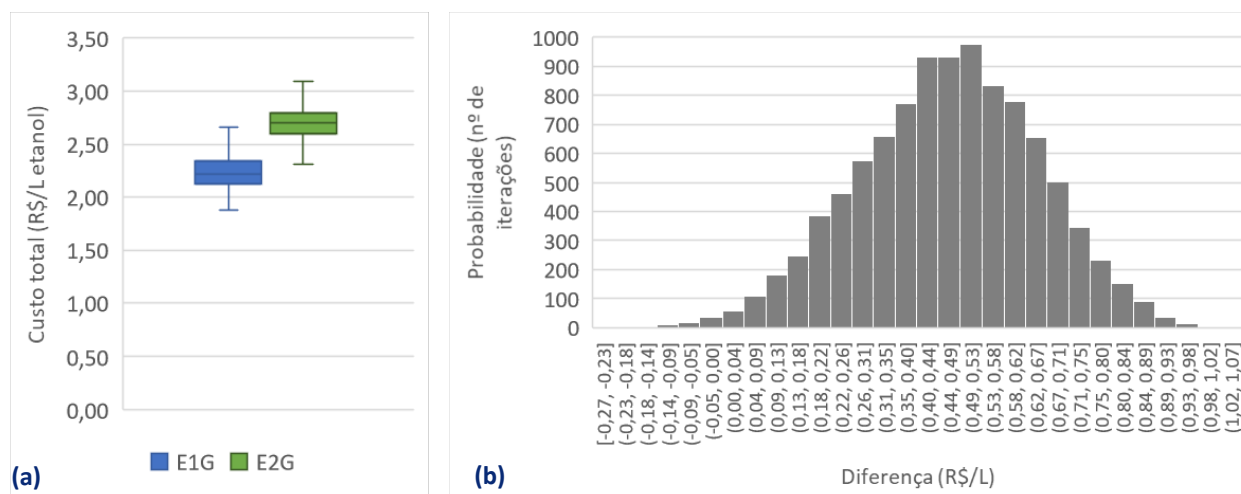
Para a produção de E1G e E2G,, considerando o estágio atual das tecnologias, foram definidas faixas de valores para rendimento de processo, consumo e preço de matérias-primas e insumos e custo de capital com base em informações públicas e experiência da equipe envolvida na estimativa, assumindo o ano de 2020 como referência⁷.

As faixas de valores, considerando distribuição triangular para cada variável, foram consideradas para a análise de incertezas utilizando o Método de Monte Carlo (10.000 simulações), acoplada à análise de fluxo de caixa e avaliação de ciclo de vida para cálculo dos impactos econômicos e ambientais. Dessa forma, foram obtidas distribuições de probabilidade para cada resultado, tais como custos de produção de etanol e intensidade de carbono.

Os custos totais de produção de etanol nos cenários E1G e E2G, bem como a diferença entre ambos, são apresentadas na Figura 2. Observa-se que o custo de E2G ($2,72 \pm 0,16$ R\$/L) supera o de E1G ($2,24 \pm 0,15$ R\$/L), sendo que a média da diferença de custo entre E2G e E1G é de R\$ 0,46/L de etanol. O desvio padrão obtido foi de cerca de R\$ 0,19/L e baixa probabilidade de valores negativos (ou seja, o custo do E2G ser menor que o do E1G). Considerando uma integração E1G+E2G, o custo do E2G poderia ser reduzido a 2,44 R\$/L, diminuindo a diferença em relação ao E1G para menos da metade.

⁷ Foi escolhido o ano de 2020 em função da excessiva oscilação, em 2021, dos valores das principais variáveis envolvidas na análise de custos e viabilidade econômica do E2G.

Figura 2. (a) Box plot do custo total de produção do etanol nos cenários E1G e E2G; (b) Distribuição da probabilidade da diferença do custo total (E2G-E1G).



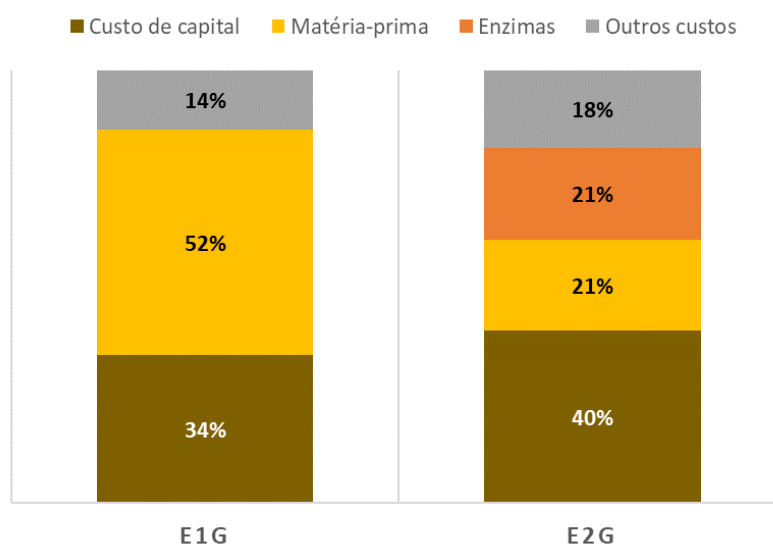
Fonte: elaboração própria

Vale ressaltar que o E1G já avançou na sua curva de aprendizado nas últimas décadas, atingindo significativas reduções de custos (cerca de 50%), principalmente nos primeiros 10 - 15 anos do início do Proálcool (Programa Nacional do Álcool, criado em 1975), em que houve um acentuado aumento nos volumes produzidos (Walter et al., 2014). Por outro lado, o E2G encontra-se em estágio inicial, com apenas duas plantas em operação no país, tendo, portanto, grande potencial para futuras reduções de custos.

Outra análise relevante é a competitividade do E2G com a gasolina. A partir do custo médio estimado do E2G e sua equivalência energética com a gasolina, estima-se um preço equivalente de gasolina de R\$3,88 por litro. Assumindo a relação entre a média de preços praticados em 2020, sem impostos, da gasolina A (ANP, 2022) e do petróleo Brent (EIA, 2022), estima-se que o E2G seria competitivo com preços de petróleo acima de US\$ 65 por barril. Cabe salientar que essas estimativas de preços têm grande variabilidade ao longo do tempo, assim como os custos do E2G têm apresentado evolução. Desse modo, recomenda-se que essas premissas sejam sempre atualizadas quando da sua eventual utilização para subsidiar o desenho de políticas públicas.

O custo total de produção de etanol é composto pelos custos de capital (relacionado aos equipamentos e instalações industriais) e operacionais (matéria-prima, insumos, mão-de-obra, manutenção, entre outros). A Figura 3 mostra os principais componentes de custo nos cenários E1G e E2G, considerando valores médios da distribuição de probabilidade.

Figura 3. Composição dos custos totais de produção de E1G e E2G.



Fonte: elaboração própria

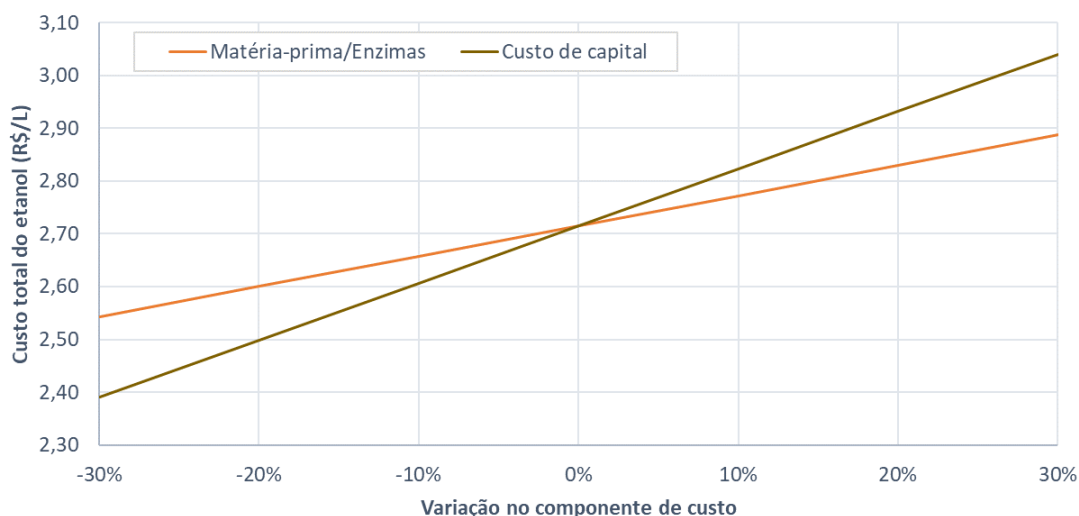
Observa-se que para o E1G, a matéria-prima é o componente majoritário do custo, sendo responsável por mais de 50%, enquanto para o E2G equivale apenas a 21% do custo, visto que seus insumos são os resíduos agroindustriais. Esta análise considerou o bagaço de cana-de-açúcar, mas dadas as variações consideradas para rendimentos e preços, seus resultados também podem ser aplicados para palha.

O E2G possui um componente de custo adicional referente às enzimas, que corresponde a 21% do custo total. A contribuição do custo de capital também é mais elevada, devido à maior complexidade do processo, que requer etapas adicionais para a disponibilização dos açúcares fermentáveis, aumentando o investimento em mais de 40% para uma mesma capacidade de produção de etanol (80 milhões de litros por ano).

Vale ressaltar que para o E1G já existem plantas com capacidades mais elevadas, beneficiando-se da economia de escala, o que pode acentuar esta diferença no CAPEX. No entanto, tais benefícios vão depender, por sua vez, da disponibilidade de biomassa e das distâncias de transporte que variam regionalmente.

A seguir são discutidas as oportunidades de redução de custo para o E2G, considerando seus componentes de custo. A Figura 4 mostra a sensibilidade do custo de produção do etanol às variações nos custos de capital, com biomassa e enzimas. Considerando um mesmo nível de redução de custos de capital e de biomassa/enzimas, os primeiros geram um impacto maior na redução dos custos totais do E2G.

Figura 4. Análise de sensibilidade do custo total de produção de E2G com a variação no custo de matéria-prima, enzimas e de capital.



Fonte: elaboração própria

Custo de capital

- O E2G pode se beneficiar da economia de escala, assim como o E1G, com potencial de redução do CAPEX do E2G de 20 a 30% (IEA Bioenergy, 2020).
- A integração do E2G com E1G pode reduzir o CAPEX entre 10 e 25% (IEA Bioenergy, 2020).
- O aumento do período de operação, com redução de paradas e do tempo para manutenção, pode reduzir o CAPEX em cerca de 10% (300 para 330 dias de operação).
- A nacionalização de fornecedores de equipamentos reduz custos com importação (taxas e transporte). Por exemplo, uma redução de 20% no custo do reator de pré-tratamento pode reduzir o CAPEX total em torno de 5%.
- A instalação de novas unidades E2G beneficiam-se de redução de custos relacionados ao projeto dos equipamentos ao incorporar aprendizados com as primeiras unidades.
- A diminuição da desconfiança tecnológica, associada ao risco, pode gerar maior atratividade a financiamentos para o E2G.

Matéria-prima

- O aumento do rendimento do processo – e.g., ganhos incrementais na etapa de hidrólise enzimática e fermentação – leva à redução da contribuição da biomassa no custo.
- A melhoria na logística e definição estratégica do local de instalação da unidade E2G tem impacto direto. Por exemplo, a integração ou proximidade à unidade E1G pode reduzir os custos com transporte, que são relevantes dada a baixa densidade do bagaço.
- Como alternativa ao bagaço, a palha pode se tornar cada vez mais competitiva através de avanços nas etapas de recolhimento e condicionamento.
- A melhoria na qualidade da matéria-prima – menor presença de impurezas minerais e maior homogeneidade – permite maior estabilidade de processo e rendimento.
- Diminuição da competição com a eletricidade por meio do aumento da eficiência de cogeração e/ou aproveitamento do biogás para a geração elétrica, com o objetivo de disponibilizar a biomassa para a produção do E2G, entre outras alternativas (ver Quadro 1). Destaca-se que a eletricidade, coproduto da unidade E2G, pode ainda complementar a energia hidrelétrica no período de secas.

Enzimas

- A customização para matérias-primas nacionais deve melhorar a eficiência dos coquetéis enzimáticos
- A nacionalização da produção, quando de um volume significativo de enzimas, contará com a redução de custos de transporte e de formulações menos complexas por necessitarem de menor tempo de prateleira, além dos ganhos em economia de escala e sinergismos locais. e
- A produção in-house – ou seja, na mesma instalação em que é utilizada – pode ser uma alternativa que permite aproveitar a sinergia entre os processos (e.g., utilidades e insumos).
- O aumento de fornecedores deve gerar uma competição saudável, além do ganho coletivo no desenvolvimento da tecnologia no país o que pode acarretar também em redução de custos.

Outros custos operacionais

- A diminuição na participação dos insumos nos custos pode ser alcançada com a redução no consumo, uso de alternativas mais baratas ou produção local, quando possível.

-
- A redução nos custos com manutenção, que pode estar associada à melhoria da qualidade da matéria-prima, por exemplo.
 - Os custos com mão-de-obra podem ser reduzidos com a melhoria na automação da unidade industrial bem como com a capacitação de profissionais.

Outra oportunidade para redução de custos é a obtenção de receitas adicionais, seja através da produção de coprodutos ou de créditos/prêmios. Por exemplo, a comercialização dos excedentes de eletricidade das biorrefinarias pode diminuir os custos totais se descontadas as receitas associadas. Valores médios de abatimento de R\$ 0,18/L foram observados para os dois cenários, dadas as faixas de excedentes de eletricidade e de preços consideradas.

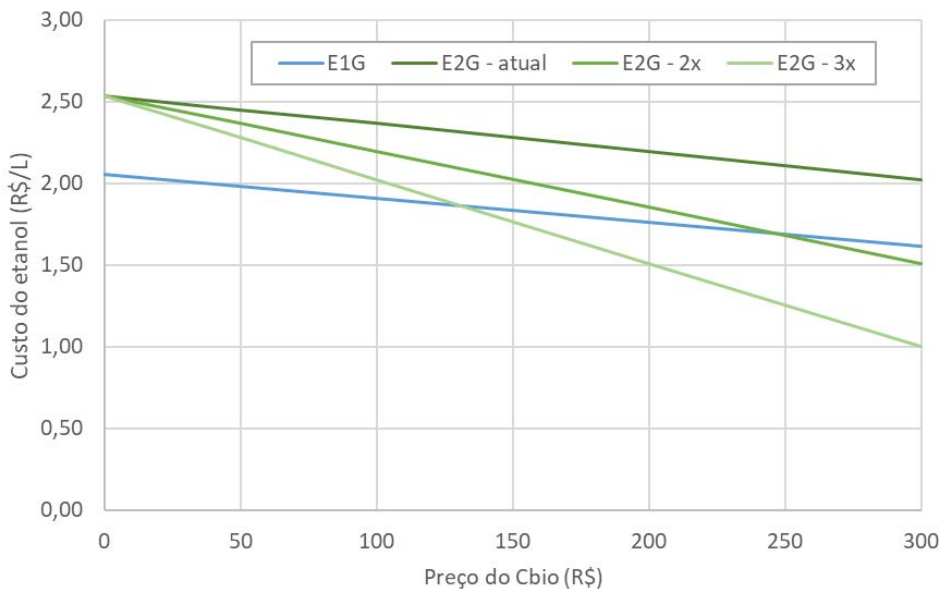
Vale ressaltar que tais valores dependem da eficiência dos sistemas de cogeração empregados e dos consumos de vapor de processo, bem como da oportunidade para comercialização, dependente de infraestrutura de transmissão e distribuição local. A integração de produtos com maior valor agregado ao processo de E2G pode ser um diferencial competitivo, como, por exemplo, com a obtenção de produtos derivados da lignina residual da hidrólise.

Com o RenovaBio, a comercialização de CBIO, que valoriza a mitigação de gases de efeito estufa em relação ao seu substituto fóssil (no caso do etanol, a gasolina), é uma fonte adicional de receitas. O E2G apresenta emissões significativamente menores ($11,1 \pm 0,8$ t CO₂eq/MJ) comparado ao E1G ($21,1 \pm 0,4$ t CO₂eq/MJ) (Ver Figura 1). No entanto, é a diferença em relação à gasolina (87,4 t CO₂eq/MJ) que determina a geração de CBIO. Como resultado, a geração de CBIO do E2G é apenas 15% maior do que do E1G. A Figura 4 apresenta a sensibilidade do custo do etanol (descontadas as receitas com eletricidades e CBIO) para diferentes preços e formas de contabilização do Crédito de Descarbonização. Observa-se que para a atual contabilização do CBIO, as curvas de custo do E1G e do E2G pouco se aproximam mesmo para preços superiores aos valores máximos registrados até março de 2022 (cerca de R\$100).

Embora não haja previsão específica no regulamento para tal, se considerados os créditos do E2G de forma diferenciada, aplicando um fator multiplicador de 2 ou 3 na geração de CBIO, os custos serão equivalentes para preços de R\$250 e R\$130, respectivamente. Um exemplo onde isso ocorre é a política europeia relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis (RED II), segundo a qual biocombustíveis para transportes produzidos a partir de bagaço e palha podem considerar-se como tendo o dobro do seu

teor energético para efeito do computo de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (EC, 2018).

Figura 4. Análise de sensibilidade do custo do E1G e E2G (descontadas as receitas com eletricidade e CBIO) para diferentes fatores multiplicadores de créditos.



Fonte: elaboração própria.

Observa-se, portanto, que a competitividade do E2G com o E1G dificilmente poderá ser atrelada apenas a incentivos e que o avanço na curva de aprendizado com a instalação de novas plantas deverá ter papel fundamental em reduzir a diferença entre ambos os custos a longo prazo (cerca de 10 anos). Como exemplo, um aumento de rendimento do processo E2G de 15%, que poderia ser alcançado por melhoria da eficiência de enzimas, somado a outras melhorias de processo, teria impacto em todas as componentes de custos.

Assumindo uma redução proporcional (15%) em todos os itens de custo, o E2G poderia ser produzido a R\$2,04/L, considerando o preço médio dos CBIOs do último ano de cerca de R\$50 e a forma de contabilização atual. Esse valor seria apenas 2,5% superior ao do E1G nas mesmas condições (R\$ 1,99/L). Se adicionalmente fosse considerada a integração E1G+E2G (redução de 25% no CAPEX ao invés de 15%), o custo do E2G poderia inclusive ser inferior ao E1G, atingindo R\$ 1,93/l.

Vale ressaltar que grande parte das medidas para redução de custo do E2G – tais como o aumento no rendimento do processo, redução no consumo de enzimas e demais insumos por litro de etanol, e nacionalização da produção de enzimas – também diminuem a intensidade de carbono, aumentando as receitas com CBIOS.

4.4 Potencial de produção e de investimentos em E2G

Potencial de Produção

São apresentadas a seguir as considerações sobre os fatores que influenciam a produção de etanol de 2ª geração no Brasil, bem como seu potencial no horizonte até 2031:

- Potencial Técnico (Brasil) – As estimativas aqui apresentadas levam em conta apenas o potencial técnico da produção do E2G do setor sucroenergético, sem sobrepor aspectos econômicos, de políticas públicas, ou de impactos sobre o meio ambiente, dentre outros. O escopo do estudo inclui a análise para o país como um todo, com segmentações considerando as usinas pertencentes a subgrupos economicamente mais saudáveis, de acordo com classificação do ItaúBBA (2020) em seu portfólio (54% do setor). Note-se que não faz parte do escopo desse estudo o uso de outras biomassas residuais, tais como palhas de milho, soja, arroz, trigo, feijão ou rama de mandioca, possíveis insumos para esta produção (EPE, 2022).
- Premissas – Os itens a seguir foram adotados para a realização das estimativas:
 - Projeção de processamento de cana apresentada no PDE2031 (EPE, 2022) – 630 Mtc em 2022 e 770 Mtc em 2031.
 - Pequena participação de Cana-Energia, variando de 1% a 3% da cana total.
 - Seleção de parcelas do setor sucroenergético com melhores indicadores de saúde financeira, conforme classificação do ItaúBBA (2020) para os grupos em seu portfólio: 1º quartil – 26% (91Mtc/349Mtc); 2º quartil – 45% (158Mtc/349Mtc); 3º quartil – 18% (63Mtc/349Mtc) e 4º quartil – 11% (37Mtc/349Mtc). Assume-se que essa participação percentual seja a mesma para todo o setor sucroenergético.

Figura 5 - Diagnóstico Financeiro do Setor Sucroenergético - Safra 2019/20



Fonte: ItaúBBA (2020)

-
- Foi considerado um fator de adesão por parte de cada quartil, que também varia conforme a saúde financeira: 1º quartil – 50%; 2º quartil – 40%; 3º e 4º quartis, 0%. Desta forma, foram construídos dois cenários: (i) cenário A, 50% do primeiro quartil, o que representa 13% da cana total, e (ii) cenário B, 50% do primeiro e 40% do segundo quartil, resultando em 31% do total.
 - Utilização de 20% do bagaço total disponível pelo setor sucroenergético em ambos cenários, considerando a necessidade de seu uso para geração elétrica.
 - Atentar que a destinação deste montante para produção de E2G torna necessário o incremento da eficiência do parque gerador ou inserção adicional de insumos energéticos, como a lignina, para manutenção do potencial estimado de geração elétrica no horizonte de estudo.
 - Utilização de 63% do total de palhas e pontas disponíveis para a região Centro-Sul.
 - Em média, 63% da palha⁸ produzida na região Centro-Sul do Brasil pode ser removida para fins bioenergéticos, sem comprometer a qualidade dos canaviais, de acordo com estudos realizados pelo PROJETO SUCRE (2019).
 - Adicionalmente, estima-se que parte do setor adotará como estratégia logística o transporte da palha em conjunto com a cana colhida, considerando as mudanças na legislação relativas ao peso dos caminhões em vias públicas (BRASIL, 2021).
 - Considerou-se o indicador de conversão de biomassa em etanol 2G de 300 litros / t, em base seca, com aproveitamento de pentose⁹ (CGEE, 2018; BNDES, 2009, 2021).
 - Para estimativa da quantidade de usinas de E2G necessárias para produção do potencial calculado, adotou-se o tamanho médio das unidades apresentadas no PDE2031 (EPE, 2031):
 - Capacidade Nominal de produção média anual de 100 milhões de litros de E2G.
 - Capacidade Efetiva de produção - 95% da capacidade nominal instalada.
 - Tipo de usinas: anexas às de etanol de cana de 1ª geração.

A seguir são colocadas algumas oportunidades e desafios para a expansão do etanol 2G no horizonte decenal:

- Oportunidades:
 - Regulatória: Resolução Contran 847, de 8 de abril de 2021, dentre outros aspectos, regula a redução de peso dos caminhões nas estradas. Em virtude desse regramento e, de forma a aproveitar o volume/capacidade de carga, os caminhões poderão trazer uma maior quantidade de palhas e pontas junto ao carregamento da cana, podendo aumentar a disponibilidade de matéria-prima para a produção de E2G (BRASIL, 2021).
 - Novas Variedades: Cana-Energia como uma das alternativas que oferece maior rendimento e disponibiliza mais biomassa por tonelada de cana (CGEE, 2018). Caso essa variedade apresentasse uma maior participação no perfil varietal do setor, a disponibilidade de fibras (material lignocelulósicos) em uma poderia ser ampliada. Ressalta-se a necessidade de ajustes nos

⁸ Amplitude que varia de 19% em áreas de baixa aptidão à remoção, 57% em áreas de média aptidão, até 77% em áreas de alta aptidão agroclimática à remoção de palha (PROJETO SUCRE, 2019).

⁹ Açúcar simples cuja cadeia principal é formada por cinco átomos de carbono.

equipamentos das etapas de colheita e processamento, considerando as diferenças na quantidade de fibras, quando comparada às variedades tradicionais.

- Diversificação do portfólio de produtos. A biomassa da cana pode ser usada tanto na geração de energia elétrica (EE), quanto para a produção do E2G. Cabe ao produtor decidir qual será o destino da matéria-prima, sendo, portanto, levado em conta o custo de oportunidade entre a geração de energia elétrica e o valor obtido pela comercialização deste biocombustível. A opção pela produção de E2G também depende do estágio atual e do aumento de eficiência dos sistemas de cogeração para geração elétrica, o que influenciará na disponibilidade de biomassa (CGEE, 2018). Deve-se considerar também na análise para produção do E2G a amortização dos investimentos já realizados para geração elétrica.
- Mercado Internacional para biocombustíveis avançados: Além de apresentar remuneração diferenciada em vários mercados, este tipo de etanol também enfrenta menores barreiras à entrada em diversos países.
- Mercado para o etanol não energético com baixa pegada de carbono. Empresas que buscam insumos com menor pegada de carbono, como, por exemplo, O Boticário, que usa o etanol 2G em seus produtos (Raízen, 2021).
- Maior geração de CBIO por volume. Conforme metodologia utilizada nas certificações das usinas, no âmbito da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), o etanol de segunda geração pode apresentar uma intensidade de carbono menor que o etanol de cana de primeira geração (GRASSI & PEREIRA 2019).

- Desafios:

- Disponibilidade de tecnologia de produção acessível, de forma competitiva (GRADIN, 2021).
- Disponibilidade de suprimentos a custos competitivos, principalmente quanto às enzimas, cujos valores representam de 21% a 50% do custo de produção do E2G, a depender da capacidade da planta e condições de processo, como por exemplo a conversão de C5 em modo de co-fermentação.. (LALLEMAND, 2021). Assim, faz-se necessário o desenho de políticas de incentivos para sua produção nacional.
- Utilização de lignina para a geração elétrica em conjunto com o bagaço. A exemplo da Granbio (Usina Caeté), há a possibilidade que o sistema de cogeração seja alimentado com bagaço de cana e lignina – subproduto gerado no processo de produção do E2G. O uso da lignina traz a vantagem de oferecer menor umidade e, portanto, melhor eficiência na queima e de elevar o período de operação em até 11 meses (GRANBIO, 2022). Deve-se avaliar a replicabilidade e a velocidade de disseminação desta tecnologia nacionalmente.
- Avaliar se há vantagem econômica para a usina de etanol 1G ter flexibilidade para geração de energia elétrica e/ou produção de E2G. Trata-se de uma decisão do produtor, que está constantemente avaliando seu custo de oportunidade, e que pode ou não optar pela alternativa do E2G. A decisão virá do custo de oportunidade e da receita potencial, indicando a importância de avaliar o papel do financiamento público para o estabelecimento desta indústria incipiente.
- Qualificação técnica da mão-de-obra para operar as usinas de etanol 2G. É necessária mão-de-obra qualificada para gerenciar processos de pré-tratamento, hidrólise e fermentação (MACHADO e COSTA, 2020). Atualmente, esta indústria é incipiente no Brasil, necessitando de um plano de capacitação específico.

Visto que o objetivo do presente estudo é fornecer subsídios para estimar o potencial de produção do E2G no país, adotou-se uma hipótese otimista, apresentada em dois cenários A e B, com utilização de 20% do bagaço e de 63% das palhas e pontas. As Tabelas 1 e 2 apresentam as quantidades de cana, bagaço e palhas e pontas para cada cenário.

Tabela 3 - Estimativas de Biomassa para a produção de E2G – Cenário A – 13% da cana total

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Cana (Mtc)	81,8	84,0	86,5	88,6	90,7	92,7	94,9	96,7	98,7	100,4
Bagaço (Mtb)	4,4	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,2	5,3	5,4	5,5
Palhas e pontas (Mtp)	8,0	8,2	8,5	8,7	8,9	9,1	9,3	9,5	9,8	10,0

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Valores de bagaço e palhas e pontas com 50% de umidade.

Tabela 4 - Estimativas de Biomassa para a produção de E2G – Cenário B – 31% da cana total

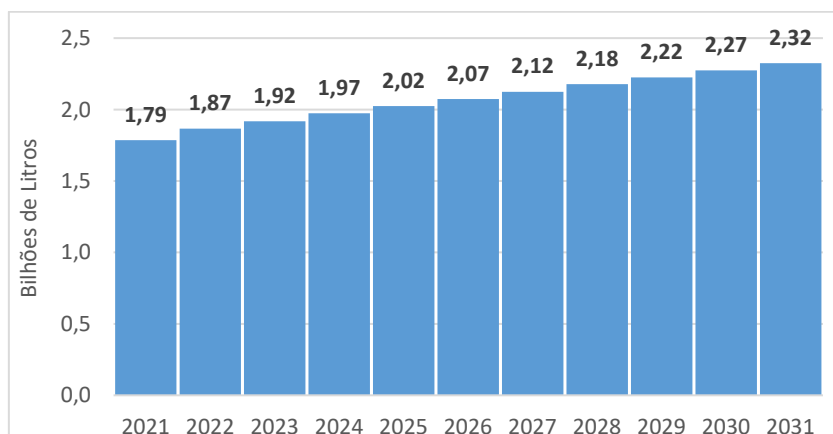
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Cana (Mtc)	195,3	200,7	206,5	211,6	216,6	221,6	226,7	231,0	235,7	239,9
Bagaço (Mtb)	10,6	10,9	11,2	11,5	11,8	12,0	12,4	12,6	12,9	13,2
Palhas e pontas (Mtp)	19,1	19,7	20,2	20,8	21,3	21,8	22,3	22,8	23,3	23,8

Fonte: Elaboração própria

Nota: Valores de bagaço e palhas e pontas com 50% de umidade.

Desta forma, o Gráfico 1 ilustra o potencial de produção de etanol E2G, considerando o cenário A, 1º quartil das usinas do setor sucroenergético, conforme detalhado anteriormente. Estima-se que esta parcela do setor será responsável pelo processamento de 100 milhões de toneladas de cana (Mtc) em 2031, e que, de acordo com as premissas mencionadas, possui um potencial de produção de 2,3 bilhões de litros para este mesmo ano.

Gráfico 2. Potencial de produção de etanol 2G (cenário A – 13% da cana total).

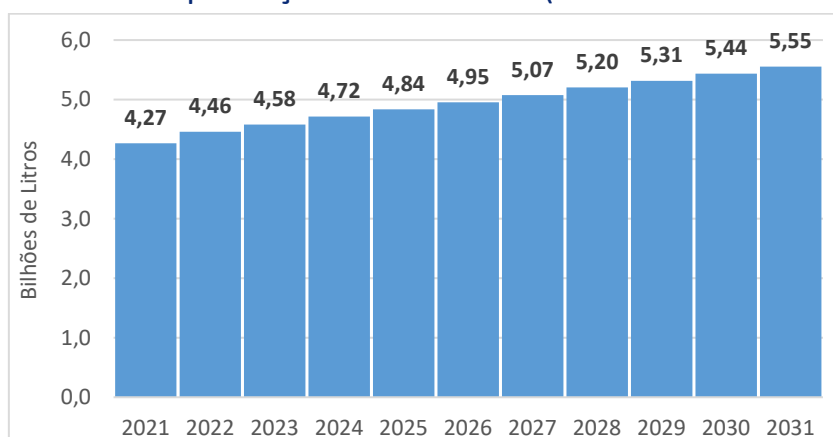


Fonte: Elaboração própria.

Considerando este volume de produção, serão necessárias 31 unidades produtoras de etanol de segunda geração, o que representaria uma capacidade produtiva de 2,5 bilhões de litros / ano.

O Gráfico 2 ilustra o potencial de produção de E2G, considerando o cenário B, 1º e 2º quartis das usinas do setor sucroenergético. Estima-se que esta parcela do setor será responsável pelo processamento de 240 Mtc em 2031, e que, de acordo com as premissas elencadas, represente um potencial de produção de 5,6 bilhões de litros para este ano.

Gráfico 3. Potencial de produção de etanol 2G (cenário B – 31% da cana total).

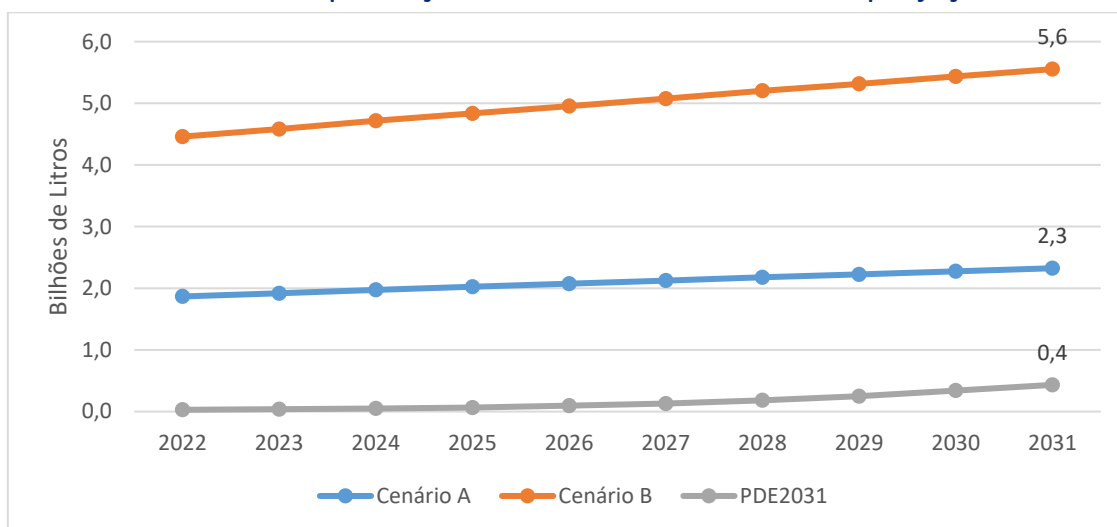


Fonte: Elaboração própria

Para este cenário, seriam necessárias 72 unidades produtoras de etanol de segunda geração, o que representaria uma capacidade produtiva de 6 bilhões de litros / ano.

O Gráfico 3 compara as duas estimativas para o potencial de produção de E2G entre 2022 e 2031, com o apresentado no PDE 2031, 0,4 bilhão de litros. Essa comparação sinaliza que existe um enorme potencial a ser explorado para a produção deste etanol avançado.

Gráfico 4. Potencial de produção de E2G - cenários A e B e projeção PDE 2031.



Fonte: Elaboração própria.

Como comparação, dado que a oferta total de etanol de 1ª geração estimada pelo PDE 2031 é de 46 bilhões de litros, verifica-se que o etanol 2G poderia representar uma participação de 5% e 12% nos cenários A e B, respectivamente.

Potencial de Investimentos

O CAPEX necessário para implantação de plantas de etanol celulósico é de aproximadamente U\$ 2/I10. Considerando as plantas em operação no Brasil e no mundo, estima-se que a escala de produção recomendada seja igual ou superior a 60 MM de litros/ano por planta.

Assim, seriam necessárias 100 plantas para atingir o potencial de 6 bilhões de litros. Os Estados Unidos possuem atualmente 198 usinas de etanol de milho em operação. Quase todas estas plantas foram construídas ao longo dos últimos 20 anos, o que resulta, em média, na construção de 10 usinas de etanol de milho por ano.

¹⁰ Estimativa elaborada a partir dos dados divulgados por Granbio e Raízen

No caso brasileiro, dada a complexidade de financiar e implantar investimentos, pressupõe-se que na presença de uma política pública que forneça o estímulo de preço necessário, seja possível a construção de 5 plantas por ano. Neste cenário, a meta seria atingida em 20 anos, com um investimento total de aproximadamente 12 bilhões de dólares.

Estes investimentos, além do amadurecimento tecnológico, são também desafiados pela falta de previsibilidade/estabilidade quanto aos preços do etanol celulósico e por conta dos seus custos de produção mais elevados hoje.

Um mecanismo simples e seguro de incentivo à produção é desejável para trazer a previsibilidade necessária para os investimentos, que à medida que forem ocorrendo trarão redução de custos por aumento de escala e maturidade da cadeia de fornecimento vinculada.

A substituição dos combustíveis fósseis ainda precisa de um longo tempo para ocorrer. Os investimentos em fósseis já caíram, mas os aportes em renováveis ainda não cresceram o suficiente para garantir a transição sem ameaçar a segurança energética.

A limitação nas inversões e na disponibilidade de hidrocarbonetos pode produzir ainda mais volatilidade e instabilidade econômica. O Brasil exporta petróleo mas importa derivados, pois existe insuficiente capacidade de refino nacional. A construção de novas refinarias é improvável, pois existe capacidade ociosa de refino no mundo.

Portanto, o estímulo ao E2G aliviaria o desbalanço entre extração e refino nacional de petróleo, permitindo que o país explore com mais eficiência esta indústria.

CAPÍTULO V – AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE POLÍTICAS PÚBLICAS

Nesta seção são avaliadas sete alternativas de políticas públicas que, isoladamente e/ou em conjunto, podem ampliar os investimentos na produção e desenvolvimento do E2G. As cinco primeiras propostas, embora apresentem elevado potencial de estímulo, tendem a requerer análise de impacto regulatório mais aprofundada e, portanto, maior prazo de implementação. Por outro lado, as medidas restantes, por apresentarem menor complexidade, podem ser implementadas mais rapidamente, criando estímulos ao E2G já no curto prazo.

5.1 Mandato de mistura obrigatória

A implantação de um mandato de mistura para E2G no Brasil precisa levar em conta três fatores de ordem prática:

- 1) Já existe um mandato para mistura obrigatória de etanol no Brasil (atualmente praticado a 27%). Um mandato específico para etanol celulósico deveria ser apenas o complemento para atingimento ao máximo legal permissível de 27,5% na mistura¹¹.
- 2) A produção de E2G ainda é incipiente e o estabelecimento de compras a um nível reduzido de etanol celulósico pelas distribuidoras superaria a dificuldade de entrega do combustível; reforçando o interesse em um mandato de até 0,5% nesta etapa de desenvolvimento industrial.
- 3) Assegurar ao produtor de E2G a liberdade de exportar seus produtos sem gerar penalidades a si e à distribuição. Os valores de estímulo internacional ao E2G podem apresentar períodos bastante significativos, gerando oportunidade comercial de captura de valor para consolidar os investimentos no parque industrial brasileiro. Este fator de captura de valor reforça a necessidade de uma meta com flexibilidade ao produtor e distribuidor.

Em suma, sugere-se o uso total do limite do atual mandato de mistura de etanol na gasolina, acrescentando-o em até 0,5% especificamente para E2G e conferindo flexibilidade

¹¹ Em caso de implementação desta medida, será necessária avaliação de eventuais barreiras técnicas relacionadas à aferição do teor de mistura do etanol nos procedimentos de fiscalização da ANP.

ao CNPE para otimizar metas de redução de emissões a cada período em coordenação com a evolução da indústria E2G.

Dentre as vantagens do mandato, pode-se citar a experiência de décadas na execução deste tipo de política no Brasil, assim como o fato do prêmio a ser pago ao E2G é feito apenas pelos consumidores de gasolina.

5.2 Leilões

A estratégia de leilões para regular o preço do incentivo ao combustível renovável já foi implementada no Brasil para o caso do mercado de Diesel. Através de um longo processo de consulta pública realizado em 2021 pela ANP, o governo chegou à conclusão que este modelo é ineficiente, e estabelece uma intermediação excessiva do agente público sobre negócios privados. Assim, a partir de 2022 não serão mais realizados leilões de biodiesel, ficando facultado às partes (distribuidoras e produtoras de biodiesel) realizar livres negociações entre si. Assim, um hipotético pedido de implementação de leilões para o E2G esbarraria na recente decisão da ANP de que este não é o mecanismo adequado para estabelecer o preço de compra e venda entre agentes privados.

5.3 Isenções

A alternativa de conceder isenções tributárias para a venda do E2G esbarraria em dois obstáculos principais. O primeiro é que a maior parte da tributação sobre os combustíveis é de competência estadual, e não federal. A obtenção de um consenso no CONFAZ para uma tributação reduzida para o E2G adiciona uma enorme complexidade à implantação de uma política pública uniforme. O segundo obstáculo é que o recolhimento de impostos para o etanol é realizado por meio do regime de substituição tributária. O preço pago às usinas já é um valor sem PIS e Cofins¹². Adicionalmente, o valor dos impostos federais incidentes sobre o etanol, mesmo que fossem isentos, não seriam suficientes para induzir o investimento em etanol celulósico, considerando-se o preço médio do combustível nos últimos 10 anos. Regimes específicos podem ser avaliados, dependendo do interesse do

¹² Programa de Integração Social e Contribuição para Financiamento da Seguridade Social, respectivamente.

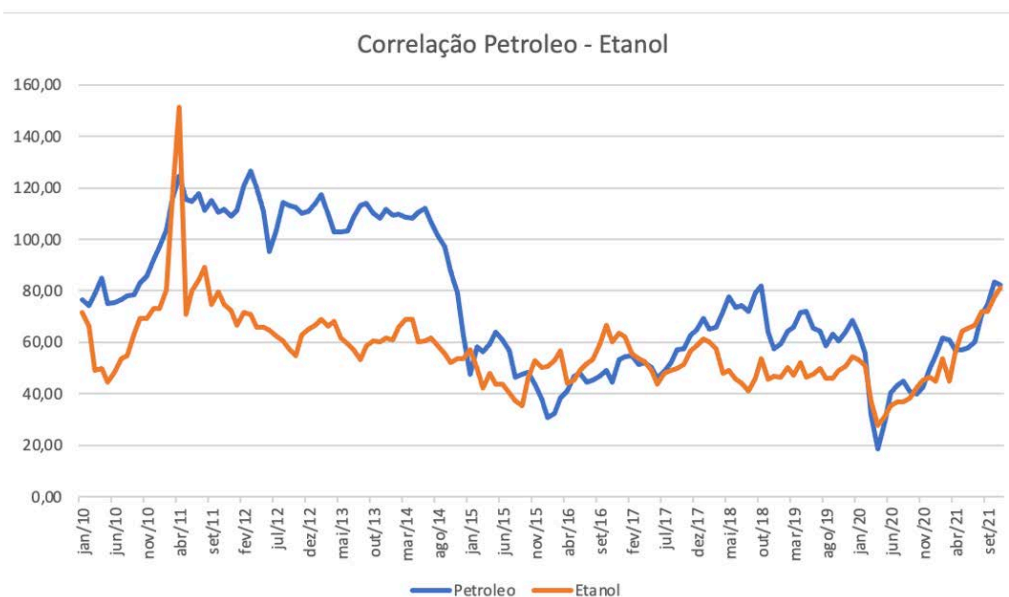
ente federado no qual se pretenda instalar a unidade de produção de E2G. No entanto, há poucas alternativas para gestão do governo federal nesta área.

5.4 Subvenção

Uma análise do comportamento entre os preços do petróleo e do etanol mostra uma forte correlação entre ambos, onde o preço por litro do etanol pago ao produtor corresponde a 1% do Brent na faixa mais usual de posicionamento dos preços. Assim, no caso do petróleo a US 50/bbl, o preço do etanol corresponderia a U\$ 50 cents por litro.

A correlação entre os preços do etanol e do petróleo se tornou mais forte (coeficiente de correlação próximo a 1) a partir de 2016, quando a Petrobras adotou a prática de seguir o preço de paridade de importação (PPI) para definição do preço dos combustíveis nas refinarias. Esta correlação pode ser visualizada no Gráfico 5 abaixo:

Gráfico 5 – Correlação entre os preços do petróleo e do etanol



Fonte: [Mastersenso](#)

Petróleo: Preço do Brent

Etanol: Preço Anidro, [Esalq São Paulo X 100](#)

Partindo da constatação desta equivalência (preço do litro do etanol ao produtor equivalente a 1% do Brent) e, conforme estimado na seção 4.3, da necessidade de preço

do brent igual ou superior a U\$ 6513 para que a indústria de etanol celulósico possa ser competitiva, é possível dimensionar o mecanismo de subvenção mais adequado para o setor.

Como se sabe, a volatilidade de preços de petróleo é muito grande, e embora o brent esteja atualmente acima do patamar de 65/bbl, na média dos últimos 10 anos o preço foi de U\$ 54/bbl.

Para dar a previsibilidade necessária aos investimentos em tecnologias do E2G, sugere-se que o governo ofereça uma subvenção que “congele” o preço do E2G na sua correlação com um barril a U\$ 65 (brent). Este será o Preço de Referência (PR) para definição, por diferença, do valor da subvenção. Assim, se o brent caísse para, por exemplo, U\$ 60/bbl, o valor da subvenção seria de 5 cents por litro. ($65 - 60 = 5$).

A subvenção assim proposta, necessita de uma fonte de financiamento. Considerando que os melhores mecanismos de transição energética são aqueles onde as fontes fósseis custeiam a transição para as fontes renováveis, a CIDE se apresenta como uma fonte de custeio que atende perfeitamente este requisito.

Pode-se argumentar que a parte dos recursos da CIDE é obrigatoriamente repassada aos estados, não possuindo o Governo Federal poder para alterar a destinação desta parcela. Isto, entretanto não impede o uso do mecanismo, pois o governo federal pode compensar esta parcela destinada aos estados com recursos do Contribuição para o PIS/PASEP e da Cofins sobre a gasolina, sem alterar o custo do imposto para o consumidor. Atualmente, o Contribuição para o PIS/PASEP e da Cofins possui um valor fixo de R\$ 0,6869 sobre o litro da gasolina C (R\$ 0,7925 por litro de gasolina A e R\$ 0,1309 por litro de etanol anidro).

Cabe esclarecer que o mecanismo de subvenção proposto apresenta diferentes vantagens dentre elas:

1. Implementação fácil e rápida: Mecanismo semelhante já foi operacionalizado anteriormente no Brasil, a subvenção ao diesel em 2018. No caso do E2G os custos são bem menores.
2. Identificação clara e consistente de fonte de financiamento: a CIDE

13 Vale ressaltar que trata-se de uma estimativa feita com dados de 2020, sendo portanto necessária uma eventual atualização com informações disponíveis no momento do detalhamento e implementação da política de subvenção.

-
3. Garantia de previsibilidade para o investidor: qualquer que seja a volatilidade dos preços do petróleo, para o produtor de celulósico este preço será igual ou superior a U\$ 65/bbl, o que garante uma remuneração mínima do etanol em U\$ 0,65/litro;
 4. Não causa elevação dos preços do combustível ao consumidor: A subvenção é custeada por um tributo já aplicado sobre os combustíveis fósseis, e não exige a sua majoração.
 5. Econômica para os cofres públicos, pois tem um teto e é autorregulada: O valor da subvenção varia na razão inversa dos preços do petróleo, e o valor máximo é definido pela arrecadação da CIDE gasolina;
 6. Transparente e facilmente auditável: A capacidade e a efetiva produção das plantas de E2G pode ser comprovada usando-se os mesmos mecanismos utilizados atualmente para as usinas de etanol tradicional
 - a) A utilização de incentivos para desonerar o investimento pode ser implantada em paralelo com a subvenção proposta. Em tópico posterior, serão apresentadas as principais formas de desoneração aplicáveis ao E2G.

5.5 Desoneração dos investimentos

De maneira complementar aos mecanismos de Mandato e Subvenção apresentados acima, são propostas as seguintes medidas de desoneração a investimentos em plantas de E2G:

- a. Isenção do PIS/PASEP, Confins e IPI nas compras ou locações de equipamentos e serviços para projetos de implantação, ampliação, modernização ou manutenção de infraestrutura para produção de E2G, tanto nas operações internas quanto de importação.
- b. Isenção do Imposto de Importação nas compras de equipamentos e serviços para projetos de implantação, ampliação, modernização ou manutenção de infraestrutura para produção de E2G.
- c. Redução a zero das alíquotas de IRRF¹⁴ sobre os valores pagos para importação de serviços destinados a projetos de implantação, ampliação, modernização ou manutenção de infraestrutura para produção de E2G.

¹⁴ Imposto sobre a renda retido na fonte.

-
- d. Redução a zero das alíquotas de PIS e Cofins sobre a comercialização de biomassa celulósica com fins energéticos para empresas produtoras de E2G (palha de cana, bagaço de cana, cavaco, madeira).

5.6 Incentivos no âmbito do RenovaBio

A Lei 13.576/2017 instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis e prevê dois instrumentos de incentivo ao mercado de biocombustíveis que poderiam ser utilizados por meio de regulamento para conferir vantagens específicas para o caso do E2G:

Art. 8º O regulamento poderá autorizar a redução da meta individual do distribuidor de combustíveis nos seguintes casos:

I - aquisição de biocombustíveis mediante:

a) contratos de fornecimento com prazo superior a um ano, firmados com produtor de biocombustível detentor do Certificado da Produção Eficiente de Biocombustíveis

(...)

Art. 28. Será aplicado um bônus sobre a Nota de Eficiência Energético-Ambiental do produtor ou do importador de biocombustível cuja Certificação de Biocombustíveis comprove a emissão negativa de gases causadores do efeito estufa no ciclo de vida em relação ao seu substituto de origem fóssil.

Parágrafo único. Será de até 20% (vinte por cento) sobre o valor da Nota de Eficiência Energético-Ambiental mencionada no caput deste artigo o valor do bônus previsto neste artigo.

Como instrumento de incentivo à demanda, o regulamento (art. 8º) a ser oferecido pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis poderia privilegiar o estabelecimento de contratos de fornecimento superiores a um ano no caso de contratação de volumes de E2G para a parte obrigada. Ao conceder um eventual desconto na meta individual para o caso de contratos que incluíssem o E2G, haveria naturalmente, via mercado, a incorporação de prêmio para o produto.

No caso do bônus (art. 28) sobre a Nota de Eficiência Energético-Ambiental do produtor ou do importador de biocombustível, tem-se que o E2G é o biocombustível com maior perspectiva de lograr ao produtor certificado a comprovação de emissão negativa e, portanto, fazer jus ao bônus que resultará na maior emissão de CBIO.

5.7 Financiamento

Tanto BNDES quanto FINEP já dispõem de diversos instrumentos que podem apoiar desde a pesquisa básica até investimento em capacidade de produção de E2G e seus principais insumos, como enzimas e equipamentos.

No caso do BNDES, podemos destacar o fomento à inovação tecnológica por meio de parceria com a Embrapii disponibilizando recursos não reembolsáveis, que podem chegar a R\$ 75 milhões, se considerarmos os aportes do BNDES combinados com as contrapartidas da Embrapii e empresas parceiras. Os recursos podem apoiar o desenvolvimento de tecnologias de produção e utilização de novos biocombustíveis, dentre os quais está incluído o E2G.

Ainda em relação ao BNDES, está em curso a adaptação do Fundo Clima, programa de crédito com taxas mais competitivas, para apoiar as ações ligadas ao Programa Combustível do Futuro. Assim, em breve será possível utilizar os recursos do Fundo Clima para fomentar tanto o desenvolvimento tecnológico quanto o aumento de capacidade produtiva do E2G no Brasil.

No caso da Finep, há as linhas de financiamento reembolsável para empresas e instituições sem fins lucrativos com taxas de juros muito competitivas, sendo que, quanto maior o grau de inovação e a sua relevância para o setor, menores são as taxas. Recentemente, conforme Portaria MCTI nº 5.744, de 31.03.2022, há a possibilidade de bônus adicional para Temas Prioritários.

Há também as linhas não-reembolsáveis que contemplam encomendas tecnológicas, editais de subvenção econômica e cooperativo ICT-empresa, que são realizados conforme determinação do Comitê de Coordenação do FNDCT, que podem direcionar recursos para o desenvolvimento de tecnologias para o E2G no Brasil.

Existe também o programa de fluxo contínuo Rota 2030, realizada em parceria com MME, que disponibiliza recursos não-reembolsáveis para a cadeia automotiva, incluindo novas tecnologias relacionadas a biocombustíveis.

Conforme Portaria MCTI nº 4.382, de 14.01.2021, ainda em fase de implementação, existe a possibilidade de apoio via debêntures incentivadas, que possibilitaria o financiamento privado de projetos de novas plantas de E2G a taxas mais competitivas.

5.8 Fomento à inovação tecnológica

Em termos de desenvolvimento tecnológico, a produção de E2G demonstra-se factível e viável, tendo em vista os volumes já produzidos e planos de instalação de novas unidades industriais divulgados. Os mecanismos de demanda citados anteriormente terão papel fundamental para esta expansão (ganho de escala) e atração de fornecedores locais de insumos e equipamentos, acelerando a curva de aprendizado e reduzindo os custos operacionais e de capital. Ainda assim, existe grande margem para redução de custos com avanços tecnológicos que viabilizem ganhos nos rendimentos industriais. Além disso, as possibilidades de integração de coprodutos com maior valor agregado à produção de E2G ainda foram pouco exploradas.

A utilização de resíduos agroindustriais como matéria-prima, ao mesmo tempo que traz inúmeras oportunidades e vantagens econômicas e ambientais, incorpora complexidade ao processo de produção. Por exemplo, as primeiras unidades industriais no país dedicaram os anos iniciais de funcionamento para solucionar problemas operacionais e desenvolver tecnologias próprias que fossem adequadas para a biomassa predominante no país, resíduos agroindustriais de cana-de-açúcar (bagaço e palha). Em paralelo, muitos esforços em pesquisa foram dedicados ao desenvolvimento das diversas etapas envolvidas no processo de E2G.

No entanto, sem uma forte coordenação entre estes e uma integração entre os setores acadêmico e privado, a transferência de conhecimento e tecnologias à indústria foi bastante limitada. Isso porque, apesar de iniciativas neste sentido, como o PAISS (Plano BNDES-Finep de Apoio à Inovação dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico) 1 e 2, grande parte dos projetos apoiou-se em tecnologias desenvolvidas no exterior, para minimizar os riscos uma vez que os recursos eram majoritariamente não reembolsáveis (Milanez et al., 2015).

Neste sentido, destaca-se a necessidade de esforços intensivos, interdisciplinares e concentrados entre os setores acadêmico e industrial de modo que parcerias que combinem planos de negócio e projetos de pesquisa em torno de focos temáticos estratégicos de P&D&I possam aumentar a competitividade do E2G brasileiro. Particularmente, com avanços importantes nos últimos anos em biologia sintética, tanto em técnicas de edição genética quanto em termos de elucidação de mecanismos biológicos, existe grande potencial para acelerar a descoberta e o desenvolvimento de biotecnologias habilitadoras para o melhor aproveitamento das matérias-primas renováveis. Neste contexto, os sistemas enzimáticos e as plataformas microbianas

possuem papel crucial na desconstrução dos materiais lignocelulósicos em açúcares e lignina e posterior aproveitamento para produção de E2G e outros produtos.

No caso das enzimas, as atividades de P&D&I devem visar o aumento da eficiência de conversão em açúcares, a customização para matérias-primas locais bem como a utilização de insumos mais baratos e disponíveis no país na sua produção (Fonseca et al., 2020). Além disso, o desenvolvimento de cepas industriais para a produção local de enzimas, de forma integrada à unidade de produção de etanol E2G, poderia reduzir os custos e os impactos ambientais associados às etapas de purificação, embalagem, transporte e armazenamento, aumentando significativamente a competitividade da tecnologia. Vale ressaltar o potencial de aplicação da tecnologia além da produção de biocombustíveis, podendo impactar em outros setores da economia, como o químico, de alimentos e de materiais.

Para a conversão dos açúcares liberados, tanto as pentoses quanto as hexoses, o desenvolvimento de cepas microbianas com robustez industrial, tolerantes a compostos inibidores e capazes de alcançar altos rendimentos e maiores concentrações de produto é central para aumentos de eficiência na produção do E2G e pode servir de base para obtenção de outros produtos a partir de açúcares avançados. Além disso, desenvolvimentos como estes aplicados aos compostos derivados da lignina abrem grande oportunidade para a diversificação do portfólio das biorrefinarias, sem competir pela matéria-prima com a produção de E2G, podendo trazer impactos positivos tanto em termos econômicos quanto ambientais.

Além disso, o escalonamento das tecnologias deve ser considerado como uma ponte entre os setores acadêmico e produtivo, de modo a identificar e solucionar possíveis obstáculos em uma escala menor, mas industrialmente relevante, reduzindo o risco e aumentando a possibilidade de transferência de tecnologia à indústria. Portanto, investimentos em uma infraestrutura que permita integrar múltiplas tecnologias e validar o desempenho dos processos devem ser priorizados. Ainda no que tange à integração de tecnologias, a utilização de ferramentas computacionais e metodologias de avaliação de sustentabilidade devem ser empregadas de modo a fornecer informações que subsidiem a posterior implementação das tecnologias e direcionem a soluções que tragam maiores benefícios socioeconômicos e ambientais.

O fomento tecnológico local deve viabilizar o desenvolvimento de tecnologias próprias e a capacitação, permitindo que o Brasil passe de uma posição de importador de tecnologias e insumos e usufrua de suas vantagens em termos de biomassa abundante e biodiversidade para se consolidar como referência na produção de biocombustíveis e outros produtos renováveis, que são fundamentais na transição para uma economia de baixo carbono, circular e sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP. (2022). Painéis Dinâmicos sobre Combustíveis. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-sobre-combustiveis>. Acesso em 16.01.2022.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2022). Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-produtores-e-importadores-de-derivados-de-petroleo>
- BAIN & COMPANY; GAS ENERGY. Potencial de diversificação da indústria química: Químicos com base em fontes renováveis. 2014. Disponível em <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15322>. Acesso em 07.04.2022.
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2009). *O etanol de segunda geração: limites e oportunidades*. Autores: Sergio Eduardo Silveira da Rosa & Jorge Luiz Faria Garcia. Rio de Janeiro, dezembro 2009. Disponível em: www.bndes.gov.br; acesso em 16.11.2021.
- BRASIL – Diário Oficial da União (2021). *RESOLUÇÃO CONTRAN Nº 847, DE 8 DE ABRIL DE 2021*. Altera a Resolução CONTRAN nº 292, de 29 de agosto de 2008, que dispõe sobre as modificações de veículos previstas nos artigos 98 e 106 da Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, que institui o Código de Trânsito Brasileiro e dá outras providências, para permitir a alteração do diâmetro externo do conjunto pneu/roda para veículos classificados na espécie misto, tipo utilitário, carroçaria jipe. Disponível: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-contran-n-847-de-8-de-abril-de-2021-313197700>. Acesso em 17.11.2021.
- CGEE - Relatório prospecção etanol de segunda geração - E2G 2030. Brasília, DF, 2018. Disponível em: www.cgee.org.br, acesso em 17.11.2021.
- EIA – U. S. Energy Information Administration (2022). Disponível em: <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=RBRT&f=M>
- European Commission (2018) Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2011). Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração? Brasília, abril 2011. Disponível em: www.infoteca.cnptia.embrapa.br > CITE04; acesso em 16.11.2021.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2021b). *Fact Sheet: Etanol lignocelulósico ou de segunda geração – E2G*. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-628/FS-EPE-DPG-SDB-2021-01-E2G_PT.pdf.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2022a). Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2031. Disponível em: www.epe.gov.br., acesso em 24.01.2022.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2022b). Sistema de Informação para Energia – SI Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/sienergia>.
- Fonseca, L. M., Parreiras, L. S., & Murakami, M. T. (2020). Rational engineering of the *Trichoderma reesei* RUT-C30 strain into an industrially relevant platform for cellulase production. *Biotechnology for biofuels*, 13, 1-15.
- GRADIN, E. (2021). Apresentação durante Reunião do CT-CF-E2G, em 07.10.2021.
- GRANBIO. (2022). Granbio, Alagoas. Acesso em 12 de Janeiro de 2022, disponível em <http://www.granbio.com.br/>
- Hernandes, T.A.D., Duft, D.G., dos S. Luciano, A.C., Leal, M.R.L.V., Cavalett, O. (2021). Identifying suitable areas for expanding sugarcane ethanol production in Brazil under conservation of environmentally relevant habitats. *J. Clean. Prod.* 292, 125318
- IEA – International Energy Agency (2021). *World Energy Outlook 2021*. Disponível em: www.iea.org/weo.
- IEA Bioenergy (2019). Task 39: Technical Report - Comparison of Biofuel Life Cycle Analysis Tools Phase 2, Part 2: biochemical 2G ethanol production and distribution. Disponível em: <https://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2020/02/Task-39-Phase-2.2-Ethanol-2G-Comparison-of-Biofuel-Life-Cycle-Analysis-Tools.pdf>
- IEA Bioenergy (2020). Task 41: Advanced Biofuels –Potential for Cost Reduction. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41_CostReductionBiofuels_11_02_19-final.pdf
- ITAÚ BBA (2020). Diálogos do setor sucoenergético_ItaúBBA_Nov20. Comunicação pessoal.

- JORNAL DA UNICAMP (2019). Enzima modificada pode aumentar a produção de etanol de segunda geração. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/ju/noticias/2019/04/09/enzima-modificada-pode-aumentar-producao-de-etanol-de-segunda-geracao>. Acesso em 03 Feb 2022.
- LALLEMAND, 2021. Apresentação realizada para o Grupo de trabalho sobre E2G, no âmbito do subcomitê do ciclo Otto do Comitê Técnico – Combustível do Futuro.
- LORENZI, B. R., ANDRADE, T. H. N. (2019). O Etanol de Segunda Geração no Brasil: Políticas e Redes Sociotécnicas. Ver. Bras. Ci. Soc. 34 (100), 2019, <https://doi.org/10.1590/3410014/2019>.
- MACHADO, L. G. L., COSTA, F. C. (2020). *Estudo do Mercado do Etanol de 2ª Geração no Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). USP – Engenharia Química.
- MELO, N. R. (2020). Etanol 2G: Processo Produtivo e seu Contexto Atual no Brasil. Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Química.
- MORAIS, P. P; PASCOAL, P. V; ROCHA, E. DE SÁ; MARTINS, E. C. A. (2017). Etanol de 2 geração: atual produção e perspectivas. Bioenergia em Revista: Diálogos, ano 7, n. 1, p. 45-57, jan./jun. 2017. Disponível em: <http://fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/viewFile/229/141>Acesso em 16.11.2021.
- Milanez, A. Y. et al. (2015). De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. BNDES Setorial, 41, 237–94.
- MITSUHARA, A. T. (2021). Revisão sobre o potencial de produção de etanol de segunda geração a partir da palha de cana de açúcar. Trabalho de conclusão de curso, UNESP, Araraquara, 13 agosto 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/214122>. Acesso em 16.11.2021.
- NDC Registry (2021). Brazil's Nationally Determined Contribution. Disponível em: www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Party.aspx?party=BRA.
- OECD/IEA (2017). Technology Roadmap Delivering Sustainable Bioenergy. Disponível em: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology_Roadmap_Delivering_Sustainable_Bioenergy.pdf
- PROJETO SUCRE (2019). Guia de Boas Práticas de Remoção da Palha da Cana-de-Açúcar. Outubro de 2019.
- PROJETO SUCRE (2020). Relatório Final 2020 <https://lnbr.cnpem.br/wp-content/uploads/2020/07/SUCRE-Project-Final-Report.pdf> e Guia de Boas Práticas de Remoção da Palha da Cana-de-Açúcar. Outubro de 2019. <https://lnbr.cnpem.br/wp-content/uploads/2020/07/Tutorial-Mapas-de-Palha-Projeto-SUCRE.pdf>
- RAÍZEN. (2018). *Tecnologia em Energia Renovável. Etanol de Segunda Geração*. Raízen, São Paulo. Fonte: https://www.google.com/search?q=sede+da+raizen&rlz=1C1GCEA_en&oq=sede+da+raizen&aqs=chrome..69i57.2976j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8&safe=active&ssui=on
- RAÍZEN. (2021). *Raízen passa a fornecer EcoÁlcool à toda linha de perfumaria do Grupo Boticário*. Raízen, São Paulo. Fonte: <https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-passa-a-fornecer-ecoalcohol-a-toda-linha-de-perfumaria-do-grupo-boticario>.
- UNICA. A Energia da Cana-de-Açúcar. 2a edição ed. São Paulo-SP: [s. n.], 2007. E-book. Disponível em: https://unica.com.br/wp-content/uploads/2019/08/cana_livro_unica.pdf. Acesso em: 17.11.2021.
- Walter, A. et al. (2014). Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 3(1), 70-92.
- Wang, M; Han, J; Dunn, JB; Cai, H; Elgowainy, A. (2012). Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS 7:1-13. doi:10.1088/1748-9326/7/4/045905
- W.G. Hettinga, H.M. Junginger, S.C. Dekker, M. Hoogwijk, A.J. McAloon, K.B. Hicks (2009). Understanding the reductions in US corn ethanol production costs: An experience curve approach, Energy Policy, Volume 37, Issue 1, 2009, Pages 190-203.