



PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS A PARTIR DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS: PANORAMA GLOBAL E A POTENCIALIDADE DO COMPLEXO SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO

PRODUCTION OF BIOFUELS FROM AGRICULTURAL AND FORESTRY RESIDUES: GLOBAL OVERVIEW AND THE POTENTIAL OF THE BRAZILIAN SUGAR-ENERGY COMPLEX

Autores: Stéphanie Cetimária Mariotti Ruiz¹; José Maria Ferreira Jardim da Silveira¹; Marcelo Marques de Magalhães².

Filiação: Instituto de Economia (UNICAMP)¹; Faculdade de Ciências e Engenharia (UNESP)².

E-mail: stephani.ruizunicamp@gmail.com

Grupo de Trabalho (GT): 03. Evolução, estrutura e dinâmica dos complexos agroindustriais

Resumo

A discussão crescente sobre os avanços da transição energética mundial vincula-se com o posicionamento da economia circular com a aplicação da bioeconomia. Transformar resíduos agrícolas e florestais em produtos com valor adicionada para produção de biocombustíveis avançados e viabilizar economicamente é um dos objetivos da bioeconomia. Neste contexto, o estudo visa explorar a dinâmica da situação atual da produção em escala comercial dos biocombustíveis avançados derivados de resíduos agrícolas e florestais, pelo viés da aproximação com o panorama global e as potencialidades do setor sucroenergético brasileiro. Utilizou-se das técnicas de pesquisa descritiva (base de dados IEA) e de pesquisa bibliográfica para o desenvolvimento do estudo. Os resultados sugerem que o panorama global da produção de biocombustíveis avançados, as biorrefinarias em operação e construção possuem desafios em relação a heterogeneidade e custo da matéria-prima; vinculação com o preço do petróleo e com o desenvolvimento de políticas, já as oportunidades se conectam com a diminuição da competição com a produção de alimentos, terras férteis e o uso de água; fortalecimento da economia circular por meio do uso dos resíduos agrícolas e florestais; aumento da produtividade dos biocombustíveis em geral. E a produção de etanol 2G e óleo de pirólise no Brasil impulsiona as potencialidades do setor sucroenergético, principalmente pelo alavanche produtivo de etanol, o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, interesse na agenda de governo pelo viés da transição energética e emissão de poluentes, inovação automobilística (motor híbrido de etanol); comercialização de resíduo de cana-de-açúcar e a diminuição do problema da sazonalidade do fornecimento na entressafra da cana na produção de etanol. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Palavras-chave: biocombustíveis avançados, setor sucroenergético, biorrefinaria, resíduos agrícolas.

Abstract

The growing discussion about the advances of the global energy transition is linked to the positioning of the circular economy with the application of the bioeconomy. Transforming agricultural and forestry residues into value-added products for advanced biofuels production and economic viability is one of the objectives of the bioeconomy. In this context, the study aims to explore the dynamics of the current situation of commercial scale production of advanced biofuels derived from agricultural and forestry residues, by approaching the global picture and the potential of the Brazilian sugar-energy sector. Descriptive research (IEA database) and bibliographic research techniques were used to develop the study. The results suggest that the global panorama of advanced biofuels production, the biorefineries in operation and under construction have challenges in relation to the heterogeneity and cost of raw material; linkage with the price of oil and with the development of policies, while the opportunities are connected with the reduction of competition with food production, fertile land and the use of water; strengthening the circular economy through the use of agricultural and forestry waste; increasing the productivity of biofuels in general. And the production of 2G ethanol and pyrolysis oil in Brazil boosts the potential of the sugar-energy sector, mainly by leveraging ethanol production, increasing sugarcane productivity, interest in the government's agenda for energy transition and pollutant emissions, automotive innovation (hybrid ethanol engine); commercialization of sugarcane waste and the reduction of the seasonal supply problem during the sugarcane off-season in ethanol production. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.



Key words: *advanced biofuels, sugar-energy sector, biorefinery, agricultural residues.*

1. Introdução

A evolução do pensamento econômico pelo viés da produção perpassa por três concepções de cadeias produtivas. Iniciando com a economia linear, posteriormente pela economia de reciclagem e por fim, pela nova concepção conhecida como economia circular. A principal distinção entre essas três visões de sistemas produtivos e de consumo está no destino dos resíduos gerados na etapa da produção e no destino do produto após o consumo.

Stahel (2016) propulsor dos estudos da economia circular descreve no seu artigo publicado na revista *Nature* a economia linear (tradicional derivada da concepção da segunda revolução industrial) como “*the linear economy is driven by ‘bigger-better-faster-safer’ syndrome*” (STAHEL, 2016, p. 436).

Na economia linear (tradicional) o ciclo de vida de um produto (alimentício, energético, químico) segue um processo linear de extração de insumo, produção de um determinado produto, descarte dos resíduos gerados, consumo do produto e por fim o descarte do produto consumido. Na economia da reciclagem o processo é similar como na abordagem da economia linear, mas após o consumo do produto, pode existir a reciclagem do produto após o uso, que retorna como insumo na produção de outro produto, sendo descartado após esse reuso (um exemplo ilustrativo é a cadeia de produção de baterias) (ANDREWS, 2015; BONVIU, 2014).

Stahel (2016, p. 436) define a economia circular fazendo analogia a um lago sem vazamentos: “*a circular economy is like a lake. The reprocessing of goods and materials generates jobs and saves energy while reducing resource consumption and waste*”. Esta analogia indica a evolução de um sistema de produção e consumo que gera resíduos a um sistema sem desperdícios e descartes. Este inicia-se na extração e produção do insumo, produção de um determinado produto, comercialização ou reuso dos resíduos, comercialização do produto inicial, realização de reparos no produto comercializado para reuso, se necessário, reciclagem desse produto que entrará no processo produtivo novamente e terá um novo destino, com perpetuação desse ciclo sem o descarte em nenhuma etapa.

A economia circular representa a discussão sobre a diminuição da necessidade de uso novos recursos a partir da circulação eficiente de recursos materiais e energético por mais tempo. Isto é, a economia circular ultrapassa os conceitos de reciclagem e reaproveitamento, pois significa um redesenho das cadeias produtivas e a conexão de novas cadeias produtivas de insumos, principalmente para a produção energética. No contexto de economia circular, a bioeconomia torna-se referência como ferramenta para o redesenho das cadeias produtivas e cadeias de consumo sustentável (STAHEL, 2016).

A bioeconomia, por sua vez, visa desenvolver estratégias para viabilizar esses novos arranjos e modificações nos arranjos já existentes para o desenvolvimento da economia circular. O aumento do ciclo de vida de um produto que antes era descartado como resíduo, passa a ser usado como matéria-prima para produção de novos produtos, faz com que a demanda por recursos naturais diminua e conseqüentemente os danos ambientais e problemas climáticos sejam amenizados no mesmo contexto. Espera-se neste processo, o aumento das relações econômicas de uma sociedade pelo viés sustentável (MANZANARES *et al.*, 2020; KARP *et al.*, 2021).

A bioeconomia ultrapassa a abordagem de gestão de resíduos com o papel limitado à agregação de valor, passando para uma abrangência mais ampla de reorganização de cadeias, reengenharia de processos produtivos, criação de novos modelos de negócio e também a mudança na relação de suprimentos no sistema de produção e consumo desses novos produtos.



A transformação da resíduos em produtos com valor adicionado para produção de novos produtos para economia é um dos exemplos de ações que a economia circular promove. Entretanto, mudanças sistêmicas precisam se realizadas para gerar compatibilidade técnica e econômica para o progresso da economia circular. Isto significa que, mudanças nos complexos industriais e também no relacionamento dos agentes das cadeias produtivas devem ser discutidas e aprimoradas para o avanço da economia circular (CHANDEL *et al.*, 2020).

O exemplo de uma das principais cadeias de valor que vem passando por mudanças para alavancar a economia circular pela abordagem da bioeconomia, é a cadeia energética. A produção de biocombustíveis teve início na década de 1970, impulsionada pela produção de etanol de cana-de-açúcar, no caso do Brasil. Entretanto, os biocombustíveis tradicionais (etanol de primeira geração, ou etanol 1G), ainda geram competição por terras férteis e uso de água em relação às lavouras alimentícias. Além disso, grande parte dos resíduos gerados no processo produtivo ainda são destinados à produção de energia elétrica através de sua queima.

Os avanços nas discussões sobre mudanças climática, sobre o uso otimizado de terras férteis, sobre o consumo de água e sobre a necessidade de produção de alimentos para alimentar a população, abriu espaço para o uso da bioeconomia como ferramenta da economia circular, tornando-se presente na cadeia de produção de biocombustíveis, a partir do avanço técnico e econômico da produção de biocombustíveis de segunda geração, também conhecidos como biocombustíveis avançados ou celulósicos (etanol 2G) (KARP *et al.*, 2021; CHANDEL *et al.*, 2020).

Os biocombustíveis avançados são exemplos do ciclo presente na economia circular, porque são produzidos a partir de resíduos agrícolas, resíduos urbanos e/ou biomassa lignocelulósica. Portanto, é minimizada a competição em relação às cadeias de produção de alimentos, ao uso de terras férteis e ao consumo de água, bem como o aumento da produtividade das lavouras energéticas e a redução na emissão de poluentes (NALI; RIBEIRO; HORA, 2016).

A produção de biocombustíveis avançados é realizada dentro de uma biorrefinaria. A biorrefinaria é um novo complexo produtivo alavancado pelo pensamento da bioeconomia, cuja semelhança com uma refinaria de petróleo não é por acaso, pois é uma indústria que requer equipamentos específicos e uso de química fina para produção de biocombustíveis avançados e produtos derivados. Entretanto, sua matéria-prima não é derivada do petróleo ou de fontes não renováveis, mas sim de resíduos e biomassa lignocelulósica (LIU *et al.*, 2019).

Avançar nas discussões sobre a viabilização da transição energética, na necessidade de aumento da produtividade das lavouras energéticas sem aumentar a competição com a produção de alimentos, na dependência energética das nações pelo viés da aproximação com a importância do desenvolvimento da economia circular com o uso da ferramenta da bioeconomia, se torna elemento-chave para a viabilidade econômico-financeira dos empreendimentos que visam a promoção da sustentabilidade.

Neste contexto, o estudo tem como objetivo explorar, por meio da caracterização das biorrefinarias mundiais, a situação atual da produção dos biocombustíveis avançados derivados de resíduos agrícolas e florestais. A partir da aproximação com o panorama global das biorrefinarias e as potencialidades da cadeia sucoenergética brasileira, como forma de alavancar a economia circular pela visão da bioeconomia.

2. Metodologia

Para o desenvolvimento do estudo foi aplicado as técnicas de pesquisa descritiva e de pesquisa bibliográfica.

A pesquisa descritiva foi utilizada para identificar as características na produção de biocombustíveis avançados por biorrefinarias pelo mundo, a partir da base de dados sobre as instalações das biorrefinarias da International Energy Agency (IEA, 2023).

Esta base de dados reúne informações de todas as biorrefinarias presentes no mundo, desde biorrefinarias que estão em operação, em fase de construção, em fase de planejamento, em fase de hibernação (construídas, mas não operando) e com construção cancelada. Entretanto, a IEA (2023) não reuni apenas as biorrefinarias produtoras de biocombustíveis avançados, mas também instalações de conversão de biomassa, incluindo combustão, gaseificação e energia elétrica.

Desta forma, o processo de caracterização das biorrefinarias existentes no mundo pelo método descritivo seguiu as seguintes etapas e especificações para que fosse possível extrair apenas as biorrefinarias produtoras de biocombustíveis avançados derivados de resíduos agrícolas e florestais:

Primeiro, foi selecionado as biorrefinarias com o status de operação e em construção no mês de fevereiro de 2023. Foram exploradas as biorrefinarias que estão em operação comercial, com produção ativa de biocombustíveis e as que estão em fase de construção para comercialização no momento da realização do estudo.

Em seguida, foram selecionadas as matérias-primas que as biorrefinarias em operação e em construção utilizam para produção de biocombustíveis avançados. Como o foco do estudo é caracterizar as biorrefinarias que utilizam biomassa lignocelulósica e resíduos agrícolas e florestais, foram selecionadas as matérias-primas com esse tipo de nomenclatura: resíduos agrícolas, mix de biomassas, resíduos florestais, biomassa lignocelulósicas, e açúcar e amido de culturas em geral. Outros tipos de matérias-primas poderiam ser selecionados, como por exemplo: resíduos orgânicos (óleos usados, gordura animal, etc...), entretanto ultrapassaria o escopo do estudo.

No terceiro momento, foram selecionados os tipos de produtos (output) que as biorrefinarias produzem. Dentre as opções, foram selecionados o conjunto de biocombustíveis que se conectavam com as perspectivas do setor sucroenergético (etanol) e de biocombustíveis brasileiros já existentes (biodiesel, biogás, hidrogênio verde) para que fosse possível comparar a dinâmica externa e o potencial brasileiro com a evolução da cadeia tradicional sucroenergética. Desta forma, os biocombustíveis selecionados foram o bio-óleo, biogás, etanol, hidrogênio, biodiesel (HVO), bioLPG (biopropano), butanol, gás de síntese limpo (*clean syngas*), isobuteno, metanol e o óleo de pirólise.

A partir dessa seleção de informações, obteve-se a base de dados das biorrefinarias em construção e em operação pelo mundo. Então, a análise descritiva foi desenvolvida a partir da compreensão dos principais produtos e matérias-primas utilizadas pelas biorrefinarias e posteriormente foram analisadas as biorrefinarias por regiões geográficas (Norte Americano: Estados Unidos e Canadá; Ásia: China, Índia e Japão; Europa: Áustria, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Holanda, Noruega, Romênia, Eslováquia e Suécia; Oceania: Austrália; e por fim, o Sul Americano: Brasil).

A seleção desses países foi determinada pela localização das biorrefinarias, não houve descriminalização de nenhum país, ou seja, esses países foram resultados da localidade das instalações.

Após a realização da análise descritiva das biorrefinarias, foi realizado uma revisão bibliográfica em artigos científicos e sites oficiais sobre divulgação de pesquisas e base de dados sobre biocombustíveis (por exemplos: IRENA, NOVACANA, IEA, OCDE-FAO, CEPEA) sobre o panorama global da produção de biocombustíveis avançados e a

potencialidade do setor sucroenergético brasileiro frente os desafios e as oportunidades presentes nessa nova dinâmica para alavancagem da produção de etanol avançado.

3.Resultados e Discussões

3.1. Caracterização das biorrefinarias ativas e em construção

A produção e a demanda global de biocombustíveis tradicionais ou avançados crescem progressivamente. Atualmente, os Estados Unidos, Canadá, Brasil, Indonésia e Índia respondem por 80% da expansão global do uso de biocombustíveis no mundo. Essa expansão é resultado das políticas públicas com foco em crescimento produtivo e de demanda, além das iniciativas privadas. O Brasil, Índia e Indonésia são exemplos de países que por meio do desenvolvimento de políticas de incentivo financeiros e de garantia de demanda, aceleraram o desenvolvimento dos biocombustíveis (IEA, 2023).

Alavancar a oferta de biocombustíveis a partir da utilização de resíduos agrícolas, resíduos urbanos e culturas energéticas contribui para o aumento da produtividade das matérias-primas sem a expansão do uso da terra e água. Então, para que seja possível a produção a partir dessas “novas” fontes de matérias-primas, é necessário a utilização de indústrias do tipo biorrefinarias.

As biorrefinarias possuem semelhanças com as refinarias de petróleo, entretanto, sua diferenciação está vinculada pela matéria-prima, a biomassa lignocelulósica ao invés do petróleo. A biorrefinaria é uma unidade industrial com alto grau de tecnológico, principalmente em relação aos processos de transformação que necessitam da aplicação de biotecnologia e nanotecnologia nos processos industriais. No caso de uma biorrefinaria produtora de etanol 2G, o seu objetivo é transformar a biomassa em combustível e produtos químicos, podendo utilizar processos distintos para produção, no caso do etanol biocombustível através do bioquímico e termoquímico. A biorrefinaria é uma indústria com produção de múltiplos produtos e uso integral da matéria-prima (DEMIRBAS, 2010; BNDES/CGEE, 2008).

Explorar a dinâmica global atual dessas organizações é fundamental para evidenciar a trajetória que os biocombustíveis avançados estão seguindo e como o Brasil, sendo um protagonista tradicional na produção de biocombustíveis tradicionais pode explorar essa vantagem competitiva existente para alavancar a produção de biocombustíveis. Então, a primeira aproximação com as biorrefinarias é conhecer a dinâmica global dos *inputs* utilizados, *output* produzidos, localização das biorrefinarias e os principais *players* através da análise descritiva.

Sabe-se que as biorrefinarias podem utilizar matérias-primas derivadas de resíduos agropecuários, resíduos florestais, resíduos urbanos ou de qualquer biomassa lignocelulósica. Nota-se que a heterogeneidade das fontes de matéria-prima está presente nas biorrefinarias operantes e em construção pelo mundo (Gráfico 1).

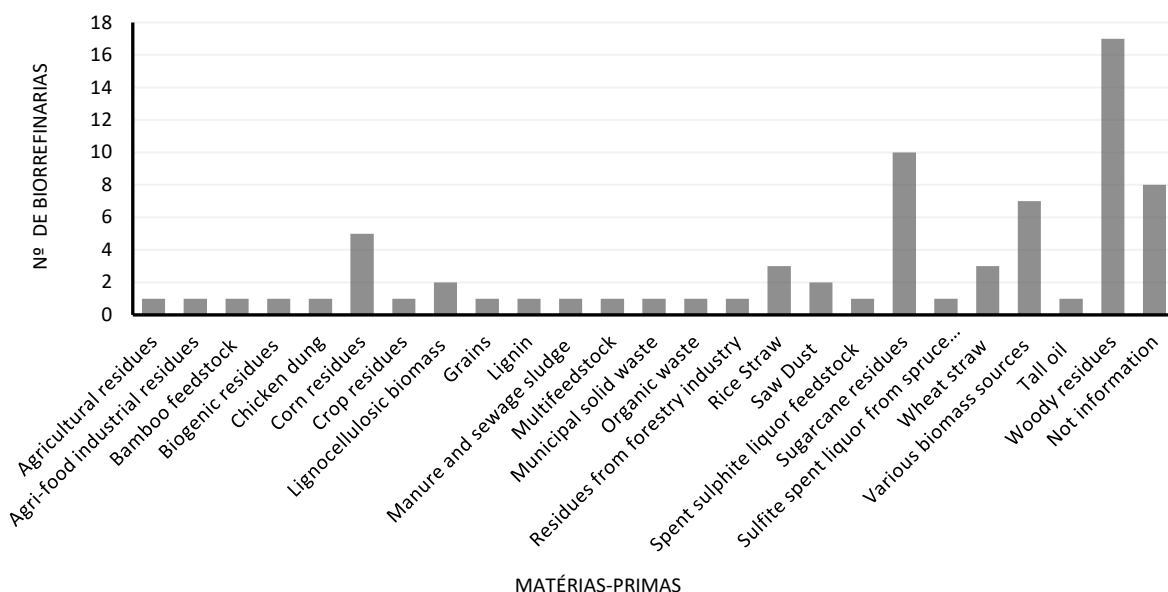


Gráfico 1: Principais *inputs* (matérias-primas) utilizados pelas biorrefinarias operantes e em construção no mundo de 2003 a janeiro de 2023.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em IEA (2023).

Entretanto, a matéria-prima mais utilizada entre as 73 biorrefinarias são as derivadas de resíduos florestais (lascas de madeiras, eucaliptos, pinhos, serragem, madeiras de demolição, restos de árvores e galhos), principalmente pelas biorrefinarias dos EUA, Canadá e Norte-europeu, seguida da biomassa de cana-de-açúcar (palha e bagaço de cana), muito utilizada principalmente nas biorrefinarias Brasileiras e Indianas.

Nota-se também que biomassas derivadas do milho (palha, espiga, etc.) e de fontes variadas de biomassa lignocelulósica também são utilizadas para produção de biocombustíveis avançados.

As biorrefinarias podem produzir diversos tipos de produtos, desde produtos de química fina até mesmo ração animal. Entretanto, toda biorrefinaria possui um produto final principal. O principal produto produzido entre as 73 biorrefinarias em operação e em etapa de construção é o etanol 2G (etanol lignocelulósico) (Gráfico 2). Este tipo de etanol não possui diferença alguma em relação ao etanol 1G (etanol fermentado), a única diferenciação é a matéria-prima e o processo de transformação.

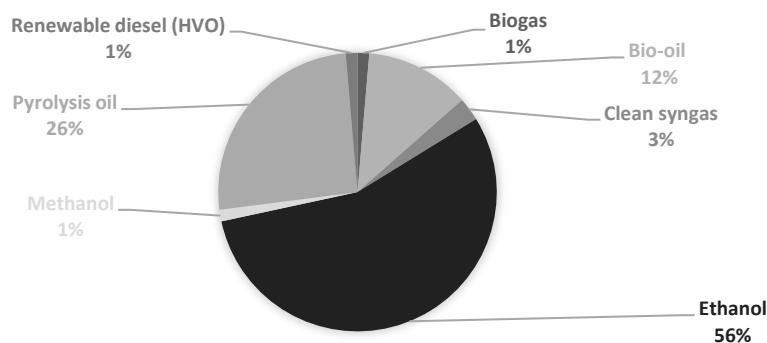


Gráfico 2: Principais *outputs* (produtos finais) produzidos pelas biorrefinarias operantes e em construção no mundo de 2003 a janeiro de 2023.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em IEA (2023).



Em seguida, o segundo produto mais produzido é óleo de pirólise, também conhecido como bio-óleo, um biocombustível sintético e substituto do petróleo, é produzido por resíduos de madeira ou de biomassas secas. O resultado dos principais outputs foi esperado desta forma, pois a seleção dos *inputs* mais usados pelas biorrefinarias, a cana-de-açúcar, resíduos agrícolas e resíduos florestais produzem etanol e óleo de pirólise em sua transformação. Em terceiro lugar, vem os bio-óleos em geral. Seguindo pelo óleo de pirólise, outros bio-óleos são produzidos, principalmente com resíduos florestais. Esses outros tipos de óleos podem ser usados para produção de bioenergia industrial.

A partir da exploração dos principais *inputs* e *outputs* das biorrefinarias espalhadas pelo mundo, a seguir serão analisados as biorrefinarias por regiões de sua localização.

Iniciando pelo o hemisfério norte das américas, o Estados Unidos possui 6 biorrefinarias em operação comercial e 2 em construção, localizadas principalmente na região leste do país. Já o Canadá possui 7 em operação e 2 em construção.

Ao observar as biorrefinarias no Canadá, nota-se que a mais antiga biorrefinaria registrada na IEA (2023) está localizada em Montreal, no Canadá do grupo empresarial *Enerken*, que começou operar em 2003. Está biorrefinaria utiliza resíduos sólidos urbanos como *input* principal, mas também lascas de madeira e palha de trigo; e o seu *output* principal é o etanol e o metanol. Isso significa que a sua fonte de matéria-prima é de base lignocelulósica, abundante também no Brasil com possibilidade de aumento da produção do etanol no país.

Outro fato importante de evidenciar é que das 7 biorrefinarias operantes no Canadá, 5 produzem etanol e 2 produzem óleo de pirólise, sendo que as produtoras de óleo de pirólise utilizam os resíduos florestais para isso e as de etanol produzem a partir de fontes variadas de biomassa lignocelulósica (exemplo: Bagaço de cana-de-açúcar).

Já nos Estados Unidos, a principal fonte de matéria-prima das biorrefinarias é os resíduos de milho (espiga, palha, etc.). Isto porquê a cultura do milho é a mais produzida nos EUA, favorecendo a abundância dessa matéria-prima e produzindo etanol e biogás. Mas além disto, principalmente as biorrefinarias produtoras de óleo de pirólise, utilizam resíduos de madeira, ou seja, outro grande potencial que o Brasil também poderia explorar com maior intensidade com a produção de eucalipto.

Passando para o continente Asiático, em específico na Ásia Meridional, a Índia é o único país com biorrefinarias. O investimento nesse tipo de indústria se justifica principalmente pela necessidade de produção de biocombustíveis para consumo interno e para diminuir a dependência internacional de fornecimento de petróleo. E por ser um país populoso que consequentemente emitem muitos gases poluentes, o Estado também tem como objetivo internacional diminuir as emissões de poluentes e buscar desenvolver uma economia mais sustentável (NITI GOV, 2023).

Desta forma, para suprir as necessidades da população, a partir da produção agrícola, muitos resíduos agrícolas são gerados no país. Então, desde 2017 estão em operação 4 biorrefinarias na Índia e no ano de 2022, iniciou a construção de mais 4 biorrefinarias, evidenciando o potencial de expansão desse tipo de estrutura produtiva para viabilização da economia circular pela via da bioeconomia, a partir do relacionamento entre os setores público e privado indiano.

Em relação as matérias-primas, as principais fonte utilizadas pelas biorrefinarias indianas são derivadas da palha de arroz e da cana-de-açúcar para produção de etanol. E em particular dois casos, uma biorrefinaria em operação do grupo *Shell*, localizada na cidade de Bangalore na Índia, utiliza resíduo florestal para produção de óleo de pirólise e também uma outra biorrefinaria em construção do grupo *Assam Bio Refinery* (ABRPL), localizada em

Numaligarh, utilizam a cultura do bambu para de etanol. Isto significa que a diversidade de uso de várias matérias-primas pelas biorrefinarias pode se adaptar mediante a localização da instalação da biorrefinaria, facilitando o acesso a vários agentes da cadeia de fornecimento de biomassa.

Já na Ásia Oriental, a China e o Japão são os países que possuem biorrefinarias operantes. Atualmente, o Japão possui uma única biorrefinaria, localizada na cidade de Kawasaki-shi, que utiliza biomassa lignocelulósica para produção de etanol e *sustainable aviation fuels* (SAF). Em contrapartida, a China possui 8 biorrefinarias operando comercialmente e todas produzindo etanol como produto principal, a partir de resíduos de milho e de trigo, e resíduos agrícolas em geral.

No continente europeu, a gama de países que possuem biorrefinarias em operação ou em construção ultrapassam os outros continentes. Ao todo são 31 biorrefinarias, localizadas na Áustria (2), Dinamarca (4), Finlândia (7), França (2), Alemanha (3), Holanda (1), Noruega (3), Romênia (1), Eslováquia (1), Suécia (7).

Notou-se que grande parte das biorrefinarias europeias estão localizadas no Norte da Europa e as principais matérias-primas são derivadas dos resíduos agrícolas em abundância na região, ou seja, palha de trigo, resíduos florestais, palha de cereais e resíduos agrícolas em geral.

Além disto, os dois principais produtos produzidos pelas biorrefinarias são o óleo de pirólise e o etanol, ambos são os principais produtos de 20 biorrefinarias (Gráfico 3).

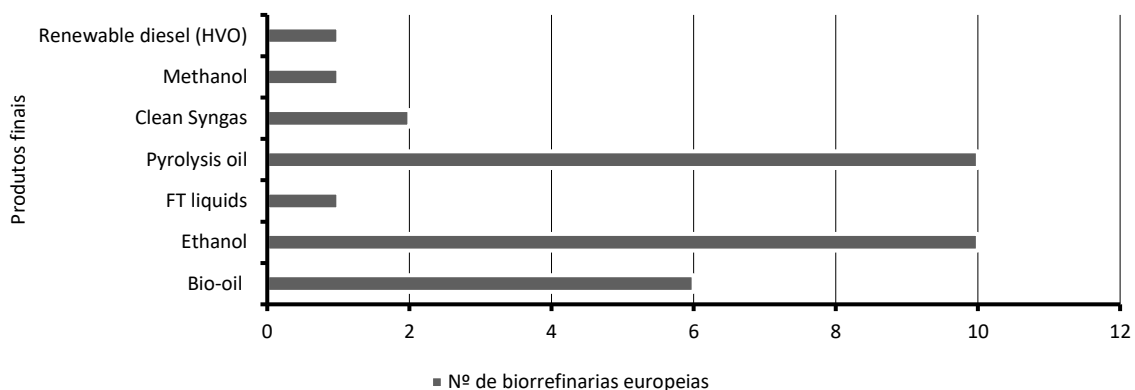


Gráfico 3: Principais *outputs* (produtos finais) produzidos pelas biorrefinarias operantes e em construção no continente europeu de 2003 a janeiro de 2023.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em IEA (2023).

No caso do etanol europeu, a produção deriva das seguintes matérias-primas lignocelulósicas: resíduos florestais, resíduos de cana-de-açúcar, resíduos de cereais, resíduos agroalimentares. As biorrefinarias europeias que utilizam a biomassa derivada cana-de-açúcar são a *Bali biorefinery* do grupo *Borregaard A.S* localizada cidade Sarpsborg na Noruega, a *Sunliquid* do grupo *Clariant* localizada em Strubing na Alemanha e a *Biorefinery Demo Plant* do grupo *Sekab Group* em Ornskoldsy na Suécia.

Mesmo sem produção local de cana-de-açúcar, essas biorrefinarias buscam a obtenção dessa matéria-prima em outros países, como por exemplo na Tailândia e fazem estoques dessa e de outros mix de biomassas, como por exemplo de *miscanthus* resíduos de milho, trigo e cevada (BORREGAARD A.S., 2012; CLARIANT, 2020; SEKAB GROUP, 2023). Isto significa, a biomassa de cana-de-açúcar é um resíduo com grande potencial para alavancagem do valor agregado nas produções do Brasil e incentivo para produção local de etanol celulósico e exportação de resíduos.

Outro ponto importante de salientar sobre as biorrefinarias produtoras de etanol no Europa é que das dez biorrefinarias, duas (Romênia, em Podari e Alemanha, em Straubing) são administradas pelo mesmo grupo empresarial, no caso a empresa *Clariant*.

Na Oceania, existem duas biorrefinarias em operação na Austrália, uma localizada em Somersby, cuja produção principal é de bio-óleo a partir de pinhos (madeira) e a outra localizada na cidade de Mackay, cuja produção principal é de etanol 2G e lignina a partir do bagaço da cana-de-açúcar, resíduos de milho e resíduos florestais. Esta biorrefinaria pertence a *Queensland University of Technology*.

Já no Brasil, atualmente, existem três biorrefinarias, a *Granbio* (em São Miguel no estado de Alagoas), *Raízen energia* (em Costa Pinto no estado de São Paulo) e *Ensyn* da Suzano S.A (em Barra do Riacho no estado de Espírito Santo). As duas em operação comercial são a *Granbio* que iniciou suas atividades em 2014 e a *Raízen energia* em 2015, já a *Ensyn*, Suzano S.A. ainda está em etapa de construção (Tabela 1):

	Organização/Empresa		
	Ensyn, Suzano S.A	GranBio	Raízen Energia
Nome da biorrefinaria	Aracruz Project	Bioflex 1	Brazil
Status	Em construção	Em operação	Em operação
Início	2020	2014	2015
Cidade	Barra do Riacho	São Miguel	Costa Pinto
Tecnologia	Circulante Fluído	Fermentação	Fermentação
Classe da matéria-prima	Resíduo Florestal	Biomassa lignocelulósica	Biomassa lignocelulósica
Tipo da matéria-prima	Resíduo de Eucalipto	Bagaço e palha de cana-de-açúcar	Bagaço e palha de cana-de-açúcar
Produto final principal	Óleo de pirólise	Etanol	Etanol

Tabela 1: Biorrefinarias localizadas no Brasil.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em IEA (2023).

A Granbio é uma empresa brasileira de produção exclusiva de etanol de segunda geração (E2G), além disto, produz biotecnologia industrial para fornecer suporte para o desenvolvimento desse produto, sendo controlada majoritariamente pela GranInvestimentos SA. Com planta industrial localizada na cidade de São Miguel dos Campos (estado de Alagoas) e com sede administrativa em São Paulo (SP). Fundada em 2011 com o objetivo de converter biomassa em biocombustíveis, bioquímicos e materiais renováveis a partir do carbono de celulose e materiais lignocelulósicos (GRANBIOa, 2020; CORREA, 2014).

Após anunciar a intenção de construção da primeira biorrefinaria do hemisfério Sul produtora de etanol de segunda geração, o BNDESPAR, instituição derivado do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social), realizou um aporte de R\$ 600 milhões de reais na empresa. Os recursos foram destinados para o desenvolvimento de tecnologias e projetos para produção de etanol celulósico e de produção de bioquímicos. Sendo que o BNDESPAR deteve 15% das ações ordinárias da empresa, passando a ser membro do Conselho de Administração (GRANBIOb, 2020).

Assim, iniciou a sua produção de etanol 2G do Hemisfério Sul em 2014, com capacidade de produção de 30 milhões de litros por ano. De modo que, o projeto foi enquadrado no PAISS (Programa de Apoio à Inovação dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico) do BNDES. Assim, a empresa recebeu um financiamento de R\$ 280 milhões de reais que foram aplicados na construção da primeira linha industrial (GRANBIOb, 2020).

Para viabilizar o projeto, a GranBio reuniu empresas detentoras das mais avançadas tecnologias para produção do etanol 2G, sendo realizadas parcerias com a Beta Renewables e à Chemtex, afiliadas do grupo italiano Mossi & Ghisolfi, que desenvolveu uma tecnologia de



pré-tratamento e conversão de biomassa (PROESA) capaz de converter vários tipos de matéria-prima em biocombustíveis. Além da aliança com a dinamarquesa Novozymes, líder mundial do segmento de enzimas, e a holandesa DSM, que foi responsável pelo fornecimento das leveduras geneticamente modificadas para fermentação de ambos os açúcares (pentoses e hexoses) (CORREA, 2014; GRANBIOb, 2020).

Atualmente, a GranBio é referência brasileira na produção científica de biotecnologia, até o momento, detém mais de 250 patentes, como por exemplo: Cana Energia Vertix® (em 2018) e processo proprietário de colheita e preparo de biomassa residual (palha de cana) em escala (200 Kt/ano). Outro fator importante de salientar é a autonomia nacional da Granbio, pois a tecnologia utilizada é totalmente desenvolvida pela mesma, no presente momento. Com exportação de etanol de segunda geração para os EUA, além de duas plantas produtivas nos EUA (API USA), sendo uma delas de demonstração (GRANBIOa, 2020; CORREA, 2014).

É notório salientar que a produção de etanol 2G pela GranBio passou por mudanças e problemas produtivos. Pois, desde sua inauguração, a indústria já precisou paralisar suas atividades duas vezes, pelo motivo principal, problemas com o pré-tratamento, pois os dejetos advindos da biomassa (principalmente área) em excesso prejudica o material e a instalação produtivo (LORENZI; ANDRADE, 2019; OLIVEIRA, 2017).

Entretanto, a Granbio anunciou que a Bioflex terá sua capacidade de produção elevada para 60 milhões de litros até 2024, e parte dessa expansão poderá ser convertida para a fabricação de combustível sustentável de aviação (SAF), cuja matéria-prima, assim como a do E2G, é composta por biomassa, como resíduos agrícolas (NOVACANA, 2023).

Já o grupo Raízen, cuja foi uma construída a partir da fusão (Joint Venture) entre da Cosan (empresa brasileira produtora de etanol) e a Shell (empresa holandesa produtora de gasolina), em 2011, foi fundada a Raízen na cidade de Piracicaba (estado de São Paulo). Entretanto, ao contrário da GranBio, a Raízen não produz apenas etanol de segunda geração, mas também (e principalmente) o de primeira geração, chegando ao volume anual de cerca de 2 bilhões de litros e cerca de 40 milhões de litros de etanol celulósico por ano, e como a GranBio, a Raízen também deteve investimento derivado do BNDES através do programa PAISS (cerca de R\$ 207 milhões de reais). E também, atua na produção de açúcar, bioenergia de biomassa (elétrica e térmica) e no segmento de distribuição e infraestrutura de combustíveis (LORENZI; ANDRADE, 2019).

Para atuar no mercado de combustíveis avançados e garantir o seu market-share expressivo no mercado de biocombustíveis, a Raízen atua com projetos de pesquisa voltados para produção mais eficiente do etanol de segunda geração, infraestrutura de biorrefinarias, biodigestão de vinhaça e utilização de novas matérias-primas para produção de biocombustíveis (como por exemplo o sorgo sacarino) (CORREA, 2014).

Além disto, para o desenvolvimento dessas inovações, a Raízen atua como parceira e acionista com empresas como a Novvi (com o foco no desenvolvimento de lubrificante renovável produzido a partir da cana-de-açúcar), como sócia do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), além de ajudar no desenvolvimento de pesquisas tecnológicas com o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). E com as empresas de biotecnologia Codexis (para melhoria nas leveduras de fermentação do etanol) e Iogen Corporation (afiliação Joint Venture para instalação de complexo produtivo de etanol de segunda geração) (CORREA, 2014).

Entretanto, em maio de 2022, a Raizen anunciou a construção de duas plantas de etanol 2G até 2024, cujo investimento será de R\$ 2 bilhões para expansão da oferta de biocombustível nos seus parques de bioenergia e que a meta é chegar em vinte plantas para os próximos 10 anos (ou seja, até 2033) (EPBR, 2022; RAIZEN, 2023).



É válido ressaltar que tanto a Granbio, quanto Raízen utilizam o mesmo *input*, a biomassa derivada da cana-de-açúcar e também produzem o mesmo *output* principal, o etanol de segunda geração. Além disto, ambas realizam a etapa de fornecimento de matéria-prima de forma verticalizada, isso significa que a Raízen, produtora de etanol tradicional e bioenergia utiliza os resíduos do seu próprio sistema produtivo para alimentar a unidade da biorrefinaria. E a Granbio, possui uma variedade própria de cana, chama de cana-energia, cuja possui maiores quantidades de biomassa, desta forma, a sua produção é verticalizada.

Já *Ensyn* Suzano S.A., é uma *aliança* de empresas *Ensyn* e a *Fibria Celulose AS* do grupo da Suzano, cujo foco está no desenvolvimento do projeto Aracruz, ainda em construção, que utilizará a biomassa derivada de resíduos florestais, em específico os resíduos de eucalipto, isto porque a o aglomerado Suzano é o principal produtor de celulose derivada de eucaliptos no mundo, ou seja, o principal sistema produtivo gera diariamente toneladas de resíduos florestais, então o sistema de fornecimento de matéria-prima será internalizado, ou seja, será um sistema de verticalização (ENSYN, 2023).

Adicionalmente, até o ano de 2020, existia outro player brasileiro na produção de etanol 2G, o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), cujo foco principal do sempre foi a pesquisa, desenvolvimento e comercialização de variedades de cana-de-açúcar, com o investimento realizado pelo BNDES e o apoio de centros de pesquisa (USP, Unicamp, UFPR, CTBE, IPT e Embrapa). Entretanto, em julho de 2014 foi construído um projeto piloto de demonstração para a produção de etanol 2G em conjunto com a Usina São Manuel (associada à Copersucar), com capacidade produtiva de 3 milhões de litros ao ano (CORREIA, 2014; LORENZI; ANDRADE, 2019).

Mas em junho de 2020, encerrou sua planta-piloto de etanol celulósico na safra passada (2019/20), pois até o ano de 2018, segundo o Bioenergy (2020), o CTC possuía produção em nível operacional ativo com produção de 2.400 toneladas ao ano (dados 2018). Com tudo, o projeto foi interrompido por causa das dificuldades com a tecnologia de processamento do etanol 2G e pelo seu alto custo produtivo (VALOR ECONÔMICO, 2020; CANAONLINE, 2020b).

Todavia, mesmo com a paralisação das atividades produtivas de etanol de segunda geração, o CTC ainda é um grande player do desenvolvimento e consolidação do etanol de segunda geração no Brasil. Pois, antes da paralisação em junho de 2020, um mês anterior (maio de 2020), o CTC em conjunto com a Embrapa Agroenergia anunciou a criação de um “coquetel enzimático”¹, cujo impulsiona no país a produção de etanol 2G (CANAONLINE, 2020a).

3.2. Panorama da produção de biocombustíveis avançados: desafios e oportunidades

A partir da aproximação com a caracterização das biorrefinarias espalhadas pelo mundo e o histórico das biorrefinarias localizadas no Brasil, é preciso explorar o panorama global da produção de biocombustíveis avançados no que tange os principais desafios que fazem com que a sua propagação escalar em outros países ou mesmo nos países que já possuem biorrefinarias seja atrasada e também as oportunidades que fazem com que essa nova trajetória na dinâmica da produção de biocombustíveis avançados seja alavancada pelos investidores públicos e privados.

Segundo Tyner (2010; 2015) e OECD/FAO (2022), o mercado de biocombustíveis celulósicos possui três incertezas que dificultam o desenvolvimento escalar desse

¹ Coquetel Enzimático CMX é capaz de promover a transformação da celulose da biomassa (bagaço ou palha da cana-de-açúcar) na glicose (C6) que resultará no etanol celulósico. Assim, o “coquetel enzima” totalmente nacional, além do incentivo para o setor, proporciona uma grande diminuição no custo produtivo do etanol celulósico.

biocombustível, mesmo que haja semelhanças com o mercado de biocombustíveis tradicionais (produzidos a partir de fontes alimentícias):

A primeira é a heterogeneidade e custo da matéria-prima. Mesmo que haja abundantemente biomassa lignocelulósica (agrícola, urbana ou culturas energéticas) o fator de não serem homogêneas dificulta a padronização integral da produção dos biocombustíveis. A heterogeneidade da composição, volume e quantidade se torna um desafio regional para cada país, pois a partir da análise descritiva das biorrefinarias presentes no mundo, observamos no Gráfico 1 que existe vários tipos de resíduos agrícolas e urbanos que são utilizados atualmente pelas biorrefinarias em operação e os resíduos que irão ser usados nas biorrefinarias em construção.

Além disto, a disponibilidade e os custos da matéria-prima irão depender especialmente da dinâmica regional da localização da biorrefinaria, ou seja, a quantidade disponível, número de fornecedores, tipo da biomassa presente na região é um fator que implica na difusão padronizada dessa tecnologia que é o biocombustível avançado para a alavancagem da produção.

A viabilidade econômico-financeira da cadeia de fornecimento de matéria-prima se torna elemento-chave para a propagação dos biocombustíveis avançados. A quantidade de contratos, quantidade e qualidade da matéria-prima, localização da biorrefinaria, tipo de investimento, e possibilidade de negociação de precificação da biomassa são fatores que precisam ser desenvolvidos para que seja possível aumentar a viabilidade em massa. Biorrefinarias já existentes que evidenciaram essa dificuldade no fornecimento de forma explícita podem ser exemplificadas pela Clariant (Romênia) (Biofuels Internacional, 2022) e o setor de produção de energia elétrica indiano (Bioenergy insight, 2022).

Evidenciar quais estruturas de governança irão predominar ou coexistir a partir do relacionamento com os fornecedores, que antes forneciam apenas o produto final de sua produção, passando para adição de um novo produto, considerado resíduo sem valor para um produto com valor agregado, se torna fundamental para que esse desafio seja superado na cadeia produtiva de biocombustíveis avançados.

A segunda incerteza é a vinculação com o preço do petróleo. Mesmo os biocombustíveis sendo uma alternativa ao consumo de combustíveis derivados do petróleo, a conexão com a precificação do petróleo e dos biocombustíveis é um desafio observado desde o início da comercialização de biocombustíveis tradicionais (etanol de primeira geração e biodiesel) após a década de 1970.

A precificação do etanol (principal biocombustível produzido) vincula-se com o comportamento do preço do petróleo, ou seja, se existe uma alta nos preços internacionais consequentemente irá aumentar também o preço do etanol. Desta forma, o biocombustível que deveria ser uma alternativa passa ser um bem complementar que acompanha o bem principal (no caso a gasolina).

Este cenário duradouro vincula-se principalmente pelo uso de etanol hidratado para Veículos Flexfuel (FFV) como forma transitória da matriz energética fóssil para uma matriz energética sustentável. OECD/FAO (2022) afirmam que um exemplo do uso dessa estratégia de mistura de combustíveis fósseis e biocombustíveis nos FFV ao mesmo tempo que contribuiu para o aumento da demanda por etanol, ainda não houve a dependência plena sobre a precificação do etanol sem vinculação com o preço do barril de petróleo:

Most biofuels in Brazil are used for blending with fossil fuels. The blending targets are mandated on the biofuel industries in the medium to long term. However, the price shock could affect costs of production and supply chains, and thereby risk delaying the implementation of the policy targets and initiatives. In addition, an economic

recession due to COVID-19 could reduce global transportation fuels and biofuel demand (OCDE-FAO, 2022).

Neste contexto, esse desafio possui grande complexidade de relacionamentos de interesse político, estatais e também de poder energético na comparação entre os biocombustíveis e os combustíveis tradicional. Desta forma, observa-se a terceira incerteza sobre o avanço dos biocombustíveis avançados, a vinculação com o desenvolvimento de políticas de governo que tenham como pauta a transição energética renovável baseada na economia circular pelo viés da bioeconomia.

Com a transitividade governamentais, ações voltadas para o fortalecimento do ecossistema de produção de biocombustíveis podem ser afetadas. A OCDE-FAO (2022), Moncada et al. (2018), Macedo et al., (2008) e González (2018) enfatizam que a dinâmica internacional de produção de biocombustíveis é afetada pelas políticas nacionais que cada país desenvolve e que os três principais objetivos que precisam ser desenvolvidos para o fortalecimento e a viabilidade da transição energética são políticas de apoio ao agricultor, políticas com meta para redução das emissões de GEE, políticas de redução da independência energética de cada nação e também políticas de investimento em matérias-primas de biocombustíveis não tradicionais.

O desenvolvimento de planos de estado que perpetuam a discussão e a pauta no desenvolvimento de políticas públicas acima mencionadas se torna outro elemento chave para a avanço dos biocombustíveis. Este fato é observado na análise descritiva deste estudo na relação dos países que possuem biorrefinarias.

O Brasil, Estados Unidos, Canadá, China, Índia e União Europeia possuem grande parte das biorrefinarias em operação e em construção, ou seja, são países que tradicionalmente buscam alternativas energéticas em pautas governamentais, sejam elas guiadas por discussões ambientais, pauta de governo ou para independência energética. Exemplos das discussões europeias de políticas internas e externas “*European Green Deal* de 2019” e nos objetivos globais da “27ª Conferência do Clima da Organização das Nações Unidas” (COP 27, 2022; EUROPEAN UNION, 2019).

Mesmo na presença dos desafios apresentados, o aumento da produção e do consumo de biocombustíveis avançados geram oportunidades e vantagens em relação, principalmente, aos combustíveis fósseis, mas também aos biocombustíveis tradicionais.

Os avanços dos biocombustíveis celulósicos diminuem a competição com a produção de alimentos, terras férteis e o uso de água. Isto porque a principal matéria-prima utilizada é de resíduos agrícolas e urbanos, sendo produtos que antes eram descartados passam a ganhar valor (POCHA et al., 2022).

Por exemplo, ao mesmo tempo que aumentam a produtividade das plantações agrícolas a partir do uso de parte do produto principal que antes seria descartado, passa a ser utilizado para gerar biocombustíveis, causando aumento da produtividade sem aumentar a extensão de terra e água utilizadas, contribuindo para não competição com as cadeias de alimentos.

Este ponto vantajoso com o avanço dos biocombustíveis avançados favorece os produtores de alimentos, com o aumento da produtividade sem aumentar o uso de terras e também a população em geral com a mudança no destino dos alimentos, que com os biocombustíveis tradicionais era necessário destinar uma porcentagem para ser matéria-prima energética (KHANNA et al., 2017; RIBEIRO, 2018; SUCRE, 2020).

Isto faz com que haja maior quantidade de alimentos disponíveis, podendo influenciar na dinâmica das cadeias de commodities (principais matérias-primas para produção de biocombustíveis tradicionais), além de fortalecer a economia circular por meio do uso dos resíduos dessas culturas.



Outro fator que alavanca os investimentos na produção de biocombustíveis avançados, é o aumento da produtividade da produção de biocombustíveis em comparação com a produção apenas dos biocombustíveis tradicionais. Isto é, produzir etanol por meio também do resíduo de milho ou de cana-de-açúcar favorece o aumento da produtividade com a mesma quantidade de matéria-prima inicial, alavancando a produção e consequentemente, o avanço para diminuição da dependência de combustíveis fósseis, que por sua vez, também contribuirá para o desenvolvimento sustentável das economias que investirem nessa nova trajetória do mercado de biocombustíveis.

3.3. Potencialidades do setor sucroenergético brasileiro

O setor sucroenergético brasileiro em 2022 finalizou o ano com a produção de 28,7 milhões de m³ de etanol, sendo que 50% foi produzida na região sudeste do país. Além disso, esta produção de etanol (tradicional e avançado) foi derivada de 300,5 milhões de toneladas de matéria-prima, sendo que 281,6 milhões de toneladas (93%) foram de cultura da cana-de-açúcar (cana-inteira) e 18,9 milhões de toneladas (6,3%) de outras fontes de matéria-prima, ou seja, dos 6,3% de toneladas, 39,6% foram da cultura do milho, 55,6% de melaço, 4,58% de outras matérias-primas não identificáveis e apenas 0,26% foram derivadas do bagaço e palha da cana-de-açúcar (ANP, 2023).

Observa-se que o setor sucroenergético possui grande dependência da produção de etanol derivado do suco da cana-de-açúcar, isto é, o potencial integral não está sendo utilizado em sua totalidade, pois uma tonelada de cana-de-açúcar é capaz de produzir 80 litros de etanol tradicional mais 32 litros de etanol celulósico (QUEIROZ *et al.*, 2012; LINERO, 2015).

Mesmo com este fato de alavanque produtivo, se o argumento para o aumento da produção de etanol no Brasil ainda fosse entrelaçado com o aumento da produtividade das plantações de cana-de-açúcar, ainda assim não seria racional este aumento. Há uma estagnação na produtividade da cana-de-açúcar desde 2012 na relação quantidade produzida (com oscilações de 700 a 750 milhões de toneladas em nível nacional por ano) e área colhida (com oscilações na faixa de 8 a 10 milhões de hectares por ano no Brasil) (PAM-IBGE, 2023).

O aumento da produtividade de uma tonelada de cana-de-açúcar a partir da produção de etanol celulósico seria uma das potencialidades que o setor sucroenergético poderia realizar para a promoção do aumento da produção de biocombustíveis no Brasil, pois além de aumentar a produção, não aumentaria a área destinada a cana-de-açúcar para produção de mais etanol, consequentemente não haveria maiores níveis de competição das terras férteis para produção de alimentos.

Além da ótica voltada para produção de cana-de-açúcar, estudos realizados sobre a eficiência produtivas das usinas produtoras de etanol tradicional revelam que problemas relacionados com a produção em escala, ineficiências técnicas e desperdício de insumos produtivos são fatores que influenciam nas produtividades das mais de 350 usinas no Brasil (JUNIOR, *et al.*, 2012; PEREIRA; SILVEIRA, 2016; ANP, 2023).

Consequentemente, se mesmo que o caminho escolhido pelo setor privado for o aumento da área plantada de cana, possivelmente os problemas produtivos já presentes no setor sucroenergético relacionados com eficiência produtiva, incentivos públicos e dependência com o preço da gasolina proporcionariam desafios para essa alavancagem.

O Brasil, mesmo sendo um exemplo mundial de produção de biocombustíveis (etanol e biodiesel), desde o início última década tem passado por desafios e estagnação na produção de biocombustíveis, enquanto outras energias limpas (solar e eólica) estão progredindo substancialmente (IRENA, 2022). Esta situação pode ser justificada devido à necessidade de

que os biocombustíveis ainda precisam de apoio de subsídios e intervenção governamental para evolução do mercado (MONCADA *et al.*, 2018).

Neste contexto, a solução para alavancar a eficiência produtiva das usinas é transformando-as em biorrefinarias (SILVEIRA *et al.*, 2015; BONOMI *et al.*, 2016). Isto significa não deixar para trás o exemplo pioneiro e de sucesso que já o setor sucroenergético protagonizou desde a década de 1970 até meados de 2012, mas sim inserir com maior intensidade biorrefinarias com capacidades produtivas superiores as das usinas tradicionais no Brasil.

Esta transformação vem acompanhada não apenas do aumento produtivo do etanol, mas a possibilidade de produção de outros biocombustíveis e produtos de química fina a partir da cana-de-açúcar, mas também resíduos florestais, resíduos agrícolas e de outras culturas energéticas (como por exemplo, produção de etanol a partir do milho, que hoje sendo a União Nacional de Etanol de Milho, a UNEM, o Brasil possui 4 usinas exclusivas para produção) (UNEM, 2023).

Após olharmos para a ótica produtiva agrícola do setor sucroenergético brasileiro e a dinâmica das usinas, o posicionamento governamental também está presente na potencialidade que o setor sucroenergético possui para alavancar a produção, principalmente, do etanol a partir da produção de etanol celulósico.

Historicamente, o setor possui políticas públicas de incentivo à produção e de garantia de demandas de etanol que influenciaram na dinâmica evolutiva do setor. Exemplo dessas políticas são da criação do Proálcool (1975 a 1985) para alavancar os estudos no setor e também fornecer incentivos fiscais para a produção de carros movidos a etanol, cuja produção exponencial iniciou-se em 2003, com a produção de carros *flexfuel* (STOLF; OLIVEIRA, 2020; CORTEZ; BALDASSIN, 2016; BNDES/CGEE, 2008; CRUZ *et al.*, 2016).

E mais recentemente, a sinalização do governo federal, com a publicação da medida provisória nº 1.163, de 28 de fevereiro de 2023, cuja “*reduz alíquotas de contribuições incidentes sobre operações realizadas com gasolina, álcool, gás natural veicular e querosene de aviação*” (BRASIL, 2023). Mesmo havendo redução também no etanol na narrativa da medida provisória, a reoneração é vista com maior intensidade nos combustíveis fósseis. Com a volta dos impostos federais PIS/Cofins e Cide-combustíveis² a reoneração na gasolina será de R\$0,47 e uma reoneração parcial R\$0,02 para o etanol, além da cobrança de imposto sobre exportações do petróleo bruto.

Fato que contribui para o setor sucroenergético como sinalizador de prospecção de incentivos institucionais e fiscais, e a possibilidade de políticas de garantia de demanda de etanol crescentes. Isto porque, a transição energética mundial e brasileira não está apenas na esfera das discussões e acordos internacionais, as ações reais já estão acontecendo, como por exemplo: a transformação da rota de veículos com maior número de carros FFV, carros elétricos e também avanços com veículos motor híbrido etanol (transformação de etanol em moléculas de hidrogênio, que se transformam em eletricidade, com a vantagem de não precisar plugar o veículo na energia elétrica para recarregar) favorecendo do papel protagonista de fornecimento de biocombustíveis do setor sucroenergético (NOVACANA, 2022; UNICAMP, 2021).

Além do protagonismo do setor sucroenergético na transição energética, aumentar a produção de etanol 2G fortalecerá os produtores de cana-de-açúcar. Isto é, a cadeia de fornecimento de cana-de-açúcar já possui mecanismos de coordenação institucional para garantia de precificação da tonelada por meio do ATR (Açúcar Total Recuperável) facilitando

² Programa de Integração Social - PIS, Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social - Cofins, e Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico sobre a importação e a comercialização de petróleo e seus derivados, gás natural e seus derivados, e álcool etílico combustível - Cide-combustíveis.

o gerenciamento e a garantia de fornecimento para as usinas. Entretanto, a precificação da palha não é uma realidade ainda, mas com a produção do etanol 2G, os produtores de cana poderão comercializar esse resíduo com valor adicionado, evidenciando o aumento do seu faturamento e da produtividade do hectare (RIBEIRO, 2018). E do lado das biorrefinarias, a existência de uma cadeia de fornecimento já articulada favorece a viabilidade econômica, mas também evidencia a necessidade de mudanças de coordenação e novas formas de contratos de fornecimento (MERTENS *et al.*, 2018; HUANG; HU, 2018).

A quarta oportunidade que a produção de etanol 2G proporciona está conectada com um dos grandes problemas ainda presente no setor sucroenergético, a sazonalidade do fornecimento de cana que consequentemente afeta o fornecimento linear de etanol no mercado de biocombustíveis e a variação de preços, com subida na entressafra da cana, que geralmente acontece entre os meses de dezembro e abril (Gráfico 4).

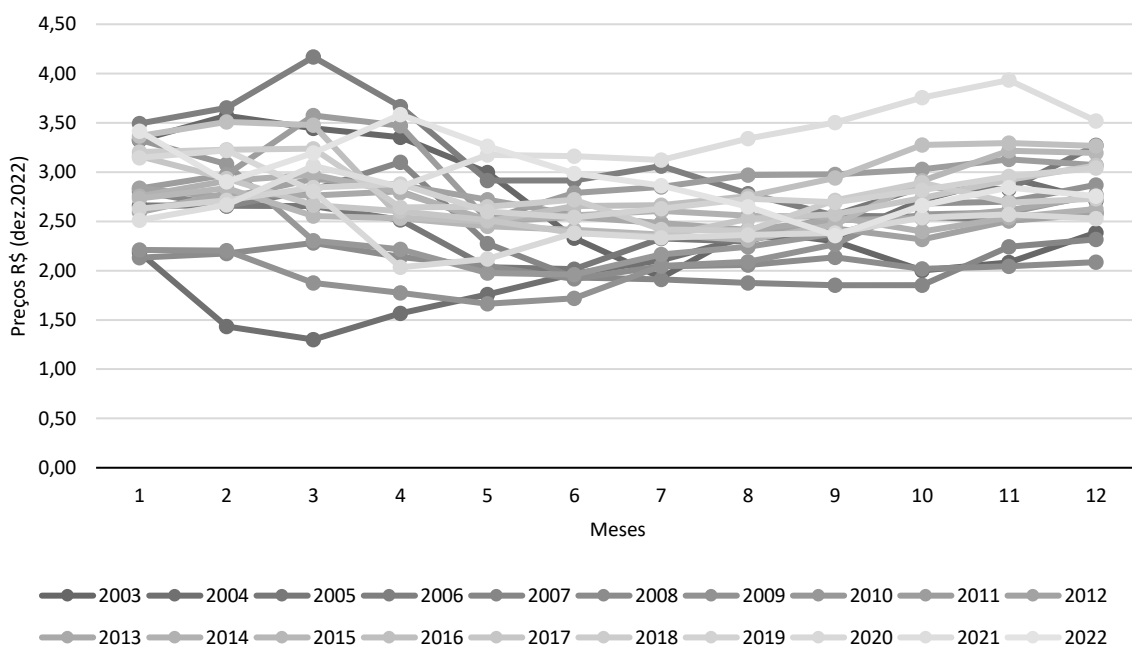


Gráfico 4: Sazonalidade do preço do etanol hidratado (R\$ dez/2022 - Índice IGP-DI/FGV), 2003-2022.
Fonte: CEPEA (2023).

Do lado do produtor, a estocagem da cana é inviável justamente pela perda de ATRs serem rápido demais (principal justificativa para ter apenas fornecedores de cana a 50 Km de distância nas usinas de etanol 1G). Já com a possibilidade de estocagem da biomassa (palha e bagaço), a produção de etanol poderá ser contínua, ou seja, podendo ter produtividade entressafras de cana. Consequentemente, fornecendo estabilidade produtivo de etanol durante o ano e diminuindo as oscilações de preço do etanol pela sazonalidade (PEREIRA, 2009; GUIMARÃES, 2011).

É notório que a potencialidade do setor sucroenergético brasileiro frente a nova fronteira tecnológica da produção de biocombustíveis é substancialmente positiva frente aos outros países produtores de biocombustíveis, justamente pelo fato que o pioneirismo brasileiro no setor, o fortalecimento agrícola de todos os tipos de matéria-prima e a trajetória de apoio público para o avanço da tecnologia dos biocombustíveis no Brasil faz com que seja destaque internacional na transição energética pela via da bioeconomia.

4. Considerações finais



Após explorar a dinâmica da situação atual da produção em escala comercial dos biocombustíveis avançados derivados de resíduos agrícolas e florestais, pelo viés da aproximação com o panorama global das biorrefinarias e as perspectivas de avanços na produção de biocombustíveis avançados no Brasil, principalmente pela cadeia sucroenergética, nota-se que é possível alavancar a economia circular pela visão da bioeconomia.

A comercialização do etanol 2G, principalmente para os mercados internacionais é uma tendência que as biorrefinarias brasileiras atuais e as futuras possuem, pois por ser um etanol que em sua cadeia produtiva emite menos poluentes favorece, os mercados com interesse nesse tipo de produto dão preferência de compra.

Neste contexto, o setor sucroenergético não se resume apenas na comercialização de cana e produção de etanol 1G, mas com as evoluções tecnológicas e a necessidade de aumento produtivo e viabilização da transição energética, o setor passa a ser produtor de etanol 1G, etanol 2G, etanol de milho safrinha, bioenergia elétrica, bioeletricidade do biogás e comercialização de cana-de-açúcar, resíduo de cana, resíduo agrícola e florestal, com possibilidade de auditoria da pegada de carbono dos produtores e a comercialização dos créditos de descarbonização.

Portanto, a aproximação deste estudo com o foco na exploração dos novos arranjos industriais (biorrefinarias) no mundo, o panorama da produção de biocombustíveis avançados e os potenciais do setor sucroenergético brasileiro evidencia que mudanças nas linhas de investimento do setor são prioridades no que tange o avanço em pesquisas gerenciais dos processos presentes na cadeia produtiva, em aumento produtivo a partir de redução de custos e políticas públicas para o avanço real dos biocombustíveis avançados.

5. Propostas futuras

Este estudo é a primeira aproximação com o tema voltado para a fronteira tecnológica presente no setor sucroenergético no que tange o aumento da produtividade e viabilidade da cadeia de biocombustíveis pela ótica da economia circular. A necessidade de desenvolvimento de estudos nos campos técnicos do etanol 2G e biodiesel estão em estágios avançados, ou seja, etapas de estudos sobre reduções de custos de processos de transformação. Entretanto, a necessidade de estudos para a viabilidade econômico-financeira é fundamental para garantir que o setor tenha condições de disseminar essa tecnologia.

Desta forma, o bom funcionamento do mercado de resíduos agrícolas, no Brasil, mais especificamente, do mercado de fornecimento de biomassa de cana-de-açúcar, tem como ponto de partida a viabilidade econômico-financeira das biorrefinarias produtoras de etanol 2G. Por ser um mercado novo, estudos sobre a gestão da cadeia de fornecimento é fator-chave para a viabilização econômico-financeira dos agentes, criando novas formas contratuais, novas formas de gestão da eficiência de fornecimento de matéria-prima e de estruturas de governança que forneçam a sustentação da produção.

6. Financiamento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

7. Referências

ANDREWS, D. The circular economy, design thinking and education for sustainability. **Local economy**, v. 30, n. 3, p. 305-315, 2015.
ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Painel Dinâmico. 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da->



anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-etanol >.

BIOENERGY INSIGHT. Biomass co-firing – why India’s target for coal power plants is challenging. Online. 17, junho, 2022. Disponível em:< <https://www.bioenergy-news.com/news/biomass-co-firing-why-indias-target-for-coal-power-plants-is-challenging/> >.

BIOENERGY. Bioenergy and Sustainable Technologie. **Advanced biofuel facilities database – explanations and definitions**. Commercializing Liquid Biofuels from Biomass. Task 39. IEA Bioenergy. 2020. Disponível em: < <https://demoplants.bioenergy2020.eu/> >.

BIOFUELS INTERNACIONAL. Clariant’s new ethanol plant in Romania officially opened. Online. 9, junho, 2022. Disponível em:< <https://biofuels-news.com/news/clariants-new-ethanol-plant-in-romania-officially-opened/> >.

BNDES/CGEE. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico/ Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. 1º edição. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. p. 316. Disponível em: < <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2002> >.

BONOMI, A. et al. **Virtual biorefinery**. Springer International Publishing, 2016.

BONVIU, F. The European economy: From a linear to a circular economy. **Romanian J. Eur. Aff.**, v. 14, p. 78, 2014.

BORREGAARD A.S. The BALI Project. 2012. Disponível em:< <https://wsuwp-uploads.s3.amazonaws.com/uploads/sites/1520/2016/11/GargulakNWBCC2014p.pdf> >.

BRASIL. Medida Provisória Nº 1.163, de 28 de fevereiro de 2023. Online. Disponível em: < <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9262819&ts=1677674205833&disposition=inline> >.

CANAONLINEa. Pesquisa e desenvolvimento. Embrapa e CTC criam ‘coquetel de enzimas’. Publicado em 27 de maio de 2020. Online. 2020. Disponível em: < <http://www.canaonline.com.br/conteudo/embrapa-e-ctc-criam-coquetel-de-enzimas.html#:~:text=Os%20cientistas%20desenvolveram%20uma%20mistura,que%20vai%20resultar%20no%20biocombust%C3%ADvel> >.

CANAONLINEb. Pesquisa e desenvolvimento. Lucro do CTC cai na safra 2019/20 com encerramento de planta de etanol celulósico. Online. 2020. Disponível em:< <http://www.canaonline.com.br/conteudo/lucro-do-ctc-cai-na-safra-201920-com-encerramento-de-planta-de-etanol-celulosico.html> >.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP. Banco de dados. Etanol. 2023. Disponível em:< <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/consultas-ao-banco-de-dados-do-site.aspx> >.

CHANDEL, A. K. et al. The role of renewable chemicals and biofuels in building a bioeconomy. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, n. 4, p. 830-844, 2020.

CLARIANT. Sunliquid® on a straight-as-straw path to sustainable success. 2020. Disponível em: < <https://www.clariant.com/pt/Corporate/Blog/2020-Blog-Posts/11/sunliquid> >.

COP 27. 27ª United Nations Climate Conference. Egypt Goals and Vision. 2022.

CORREIA, C. B. **Parcerias estratégicas tecnológicas em projetos de etanol celulósico: oportunidades e desafios para as firmas nacionais**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 2014. 127 p.

CORTEZ, L. A. B.; BALDASSIN, R. Police towards bioethanol and their implications: Case Brazil. In: **Global Bioethanol**. Ed. Salles-Filho, L. S. M.; et al. Academic Press, 2016.

CRUZ, C. H. B; et al. Proálcool 40 anos: Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro. CORTEZ, L. A. B.(org.). **Editora Blucher**, 2016.



- DEMIRBAS, A. Biorefineries: for biomass upgrading facilities. **Springer Dordrecht Heidelberg**, London New York, 2010.
- ENSYN. Projeto Aracruz- Aracruz, Espírito Santo, Brasil - Instalação Inicial de Produção de Biocrude em JV com a Suzano. Online. 2023. Disponível em: < <http://www.ensyn.com/brazil.html> >.
- EPBR. Raízen anuncia construção de duas plantas de etanol 2G. Jornalista: Nayara Machado. Online. 2022. Disponível em:< <https://epbr.com.br/raizen-anuncia-a-construcao-de-duas-plantas-de-etanol-2g/> >.
- EUROPEAN UNION. Communication From the Commission “The European Green Deal”. EUR-Lex home. Document 52019DC0640. 2019.
- GONZÁLEZ, C. G. M. **Transição energética global e desenvolvimento sustentável**: limites e possibilidades no capitalismo contemporâneo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2018, p. 200.
- GRANBIOa. Quem somos. Online. 2020. Disponível em: < <http://www.granbio.com.br/conteudos/conheca-a-granbio/> >.
- GRANBIOb. BNDESPAR investe R\$ 600 milhões na GraalBio. Online. 2020. Disponível em: < <http://www.granbio.com.br/bndespar-investe-r-600-milhoes-na-graalbio/> >.
- GUIMARÃES, F. L. **Preços de etanol no Brasil: uma análise espacial**. Tese de Doutorado. FGV EESP - Escola de Economia de São Paulo. 2011.
- HUANG, S.; HU, G. Biomass supply contract pricing and environmental policy analysis: A simulation approach. **Energy**, v. 145, p. 557-566, 2018.
- IRENA. International Renewable Energy Agency. Renewable energy statistics 2022.
- JÚNIOR, A. C. B. et al. Eficiência produtiva e análise econômica e financeira de usinas de cana-de-açúcar do estado de São Paulo. **Revista Ambiente Contábil UFRGN**. v. 4, n. 2, p. 74-92, 2012.
- KARP, S. G. et al. Bioeconomy and biofuels: the case of sugarcane ethanol in Brazil. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 3, p. 899-912, 2021.
- KHANNA, M; et al. Contracting in the biofuel sector. Handbook of Bioenergy Economics and Policy: Volume II. **Springer**. 2017.
- LINERO, F. Aproveitamento da Palha de Cana de Açúcar Planta CTC – Palha Flex. 16º Seminário Brasileiro Agroindustrial A Usina da Recuperação. Ribeirão Preto. 2015.
- LIU, C. G. et al. Cellulosic ethanol production: progress, challenges and strategies for solutions. **Biotechnology advances**, v. 37, n. 3, p. 491-504, 2019.
- LORENZI, B. R.; ANDRADE, T. H. N. Second generation ethanol in brazil: policies and socio-technical networks. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, v. 34, n. 100, 2019.
- MACEDO, I. C. et al. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.
- MANZANARES, P. et al. The role of biorefining research in the development of a modern bioeconomy. **Acta Innovations**, n. 37, p. 47-56, 2020.
- MERTENS, A. et al. Ensuring continuous feedstock supply in agricultural residue value chains: a complex interplay of five influencing factors. **Biomass and bioenergy**, p. 209-220, 2018.
- MONCADA, J. A.; et al. Exploring policy options to spur the expansion of ethanol production and consumption in Brazil: An agent-based modeling approach. **Energy Policy**, 2018.
- NALI, E. C.; RIBEIRO, L. B. N. M.; HORA, A. B. Biorrefinaria integrada à indústria de celulose no Brasil: oportunidade ou necessidade? **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 43, 2016.
- NITI GOV. National Portal of India. Energy. 2023. Disponível em: <<https://www.niti.gov.in/index.php/verticals/energy> >.



NOVACANA. GranBio prevê dobrar capacidade de etanol 2G em Alagoas; avalia combustível de aviação. Online. Publicado em: 03 Jun 2022. Disponível em: < <https://www.novacana.com/noticias/granbio-preve-dobrar-capacidade-etanol-2g-alagoas-avalia-combustivel-aviacao-030622> >.

NOVACANA. Tecnologia inédita da Unicamp usa etanol em carros elétricos. Online. 2022. Disponível em: < <https://www.novacana.com/noticias/tecnologia-inedita-unicamp-usa-etanol-carros-eletricos-050822> >.

OLIVEIRA, A. A. **Mudanças e permanências no Sistema Setorial de Inovação da cana-de-açúcar: o caso do etanol celulósico**. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. 2017. 312 p.

PAM-IBGE. Produção Agrícola Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Plataforma Sidra. 2023. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas> >.

PEREIRA, C. N.; SILVEIRA, J. M. F. J. Análise exploratória da eficiência produtiva das usinas de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, p. 147-166, 2016.

PEREIRA, L. M. **Modelo de formação de preços de commodities agrícolas aplicado ao mercado de açúcar e álcool**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2009.

POCHA, C. K. R., et al. Utilization of agricultural lignocellulosic wastes for biofuels and green diesel production. **Chemosphere**, v. 290, p. 2022.

QUEIROZ, J. H. et al. Potential of sugarcane straw for ethanol production. **Quim. Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

RAIZEN. Etanol de segunda geração: potencial e oportunidades. Online. 2023. Disponível em: < <https://www.raizen.com.br/blog/etanol-de-segunda-geracao> >.

RIBEIRO, C. H. **Proposta e avaliação socioeconômica de um sistema de pagamento de cana-de-açúcar levando em consideração os produtos do bagaço e da palha**. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas. 2018, p. 288.

SEKAB GROUP. North Sweden Cleantech. 2023. Disponível em: < <https://www.northswedencleantech.se/en/cleantech-companies/sekab/> >.

SILVEIRA, J. M. F. J. et al. Collaborative Networks as a measure of the Innovation Systems in second-generation ethanol. **Scientometrics**, v. 103, p. 355-372, 2015.

STAHEL, W. R. The circular economy. **Nature**, v. 531, n. 7595, p. 435-438, 2016.

STOLF, R.; OLIVEIRA, A. P. R. The Success Of The Brazilian Alcohol Program (Proálcool)- A Decade-By-Decade Brief History Of Ethanol In Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 40, 2020.

TYNER, W. E. Biofuel economics and policy: the renewable fuel standard, the blend wall, and future uncertainties. In: **Bioenergy**. Academic Press, 2015. p. 511-521.

TYNER, W. E. Policy update: cellulosic biofuels market uncertainties and government policy. In: **Biofuels**, v 1, n 3. Taylor and Francis online. 2010. p. 389-391.

UNEM. União Nacional de Etanol de Milho. DDG (Dried Distillers Grains) e o WDG (Wet Distillers Grains). Online. 2023. Disponível em: < <https://etanoldemilho.com.br/home/produtos/ddg-ddgs-wdg/> >.

UNICAMP. Volkswagen e Unicamp firmam parceria para apoio a pesquisas sobre etanol e veículos eletrificados. Autoria: Felipe Mateus. Online. 2021. Disponível em: < <https://www.unicamp.br/unicamp/noticias/2021/09/27/volkswagen-e-unicamp-firmam-parceria-para-apoio-pesquisas-sobre-etanol-e> >.

VALOR ECONÔMICO. Agronegócio. Lucro do CTC cai na safra 2019/20 com encerramento de planta de etanol celulósico. Online. 2020. Disponível em: < <https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2020/06/19/lucro-do-ctc-cai-na-safra-201920-com-encerramento-de-planta-de-etanol-celulosico.ghtml> >.