

BIOENERGIA NO BRASIL: ONDE ESTAMOS E QUAIS NOSSOS HORIZONTES

Luiz Augusto Horta Nogueira^{1,2}

Rafael Silva Capaz¹

Electo Silva Lora¹

¹Universidade Federal de Itajubá

²Universidade Estadual de Campinas

DOI: 10.47168/rbe.v27i3.640

RESUMO

A bioenergia representa uma alternativa fundamental e estratégica para a tão ambicionada transição energética para sistemas renováveis e mais sustentáveis. Considerando as características edafoclimáticas e amplo território, o Brasil pode ocupar um relevante protagonismo nesta transição. Além do mais, a “vocação natural” do Brasil à bioenergia já é confirmada pela contribuição substancial dos recursos bioenergéticos, em suas formas mais modernas, na oferta interna de energia. Este trabalho discorre sobre a produção e uso da bioenergia no país, desde aspectos históricos, passando pelo seu potencial e perspectivas de novos mercados, como combustíveis líquidos, biogás, hidrogênio e bioeletricidade.

Palavras-chave: Bioenergia, Biocombustíveis, Biogás, Hidrogênio, Bioeletricidade.

ABSTRACT

Bioenergy represents a fundamental and strategic alternative for the ambitious energy transition to renewable and more sustainable systems. Considering its edaphoclimatic characteristics and wide territory, Brazil can play a relevant role in this transition. Furthermore, Brazil's “natural vocation” to bioenergy is already confirmed by the substantial contribution of bioenergy resources, in their most modern forms, to the domestic energy supply. This work discusses the production and use of bioenergy in the Brazil, from historical aspects to its potential and prospects for new markets such as, liquid biofuels, biogas, hydrogen, and bioelectricity.

Keywords: Bioenergy, Biofuels, Biogas, Hydrogen, Bioelectricity.

1. INTRODUÇÃO

Os vetores energéticos derivados da energia solar acumulada nos vegetais mediante processo fotossintético recente constituem a primeira forma de energia exógena utilizada pela humanidade, desde a descoberta das técnicas de fazer fogo há cerca de meio milhão de anos. Ao longo de milênios, os biocombustíveis, como a lenha e os resíduos agrícolas, foram a única fonte de energia para processos de aquecimento, atendendo à preparação de alimentos, calefação de ambientes e produção de materiais como cerâmica, vidro e metais. Apenas há poucos séculos que formas fósseis de energia solar, também acumuladas por vegetais e transformadas durante eras geológicas em reservas de hidrocarbonetos no subsolo, passaram a ser avidamente utilizadas, sob a falsa impressão de uma fartura inesgotável.

Se em escala global, os combustíveis fósseis atualmente predominam na oferta de energias primárias, em muitos países a biomassa ainda responde por uma parcela relevante da demanda e, no contexto da transição energética para sistemas energéticos renováveis e mais sustentáveis, a bioenergia representa uma alternativa imprescindível (IRENA, 2019). Segundo projeções da IEA, o consumo de bioenergia em transporte precisa quase triplicar até 2030 (para 298 Mtep) para atender o desejável cenário de desenvolvimento sustentável (SDS), alcançando 9% da demanda global de energia para transporte, em comparação com a participação observada em 2018, cerca de 3% (IEA, 2020). Diversos e bem fundamentados estudos sobre a disponibilidade de terras agricultáveis e recursos naturais têm confirmado a possibilidade de ampliar de forma significativa a oferta de bioenergia, sempre que implementada de forma racional (Souza et al., 2015). Nessa direção, o Brasil oferece um exemplo interessante, na medida em que a biomassa sempre se manteve relevante na matriz energética brasileira, com as formas tradicionais sendo substituídas ao longo das últimas décadas por formas mais eficientes, se deslocando do uso tradicional da lenha para cocção no setor residencial para os biocombustíveis no transporte, na indústria em sistemas de cogeração de energias térmica e elétrica e na geração independente de energia elétrica.

Na verdade, já no período colonial, a ampla oferta de biomassa florestal, decorrente de condições edafoclimáticas especialmente favoráveis em grande parte de nosso território, foi determinante para que a lenha tenha sido o combustível básico para o mais importante ciclo econômico dos primeiros séculos no Brasil. Ao visitar engenhos de açúcar do Recôncavo Baiano em meados do século XVII, Antonil (1982) relatou:

(...) as fornalhas, que por sete meses ardem dia e noite, querem muita lenha... pois o alimento do fogo é a lenha, e só o Brasil, com a imensidade dos matos que tem, podia fartar, como fartou por tantos anos, e fartará nos tempos vindouros, a tantas fornalhas, quantas são as que se contam nos engenhos da Bahia, Pernambuco e Rio de Janeiro (...).

Certamente esse atento viajante teria uma opinião diferente nos dias de hoje, seja ao ver que grande parte da “imensidade dos matos” ficou bastante reduzida depois de alguns séculos de exploração contínua e impiedosa (DEAN, 1996), seja por constatar surpresa que nas usinas atuais, os engenhos modernos, não se usa mais lenha, pois o bagaço da própria cana fornece toda a energia necessária para o processo industrial e ainda gera excedentes consideráveis de energia elétrica, bem como simultaneamente se produz açúcar e etanol, combustível que movimenta milhões de carros no país. Tais cenários, permitem situar a problemática e os desafios da bioenergia, no Brasil e em outros países: por um lado, incrementar a oferta sustentável de biomassa, sob um conceito de produtividade que considere os recursos naturais (solo, água, etc.) referidos ao ciclo de vida, por outro lado, adotar processos eficientes para sua conversão em formas finais e úteis de energia.

Estas notas apresentam inicialmente a situação atual da produção e uso da bioenergia no país. A seguir, de forma concisa e sem pretensão de exaurir temas tão amplos, discute-se sobre o potencial bioenergético brasileiro considerando os cultivos para fins energéticos e os resíduos de biomassa, e as perspectivas para a produção de novos vetores energéticos a partir de tecnologias emergentes. Concluindo, se destacam os aspectos estratégicos e diferenciais da bioenergia, e a importância das políticas públicas, que permitam reforçar a racionalidade do sistema energético brasileiro.

2. EVOLUÇÃO E SITUAÇÃO ATUAL DA BIOENERGIA NO BRASIL

Dado o seu reconhecido potencial edafoclimático e amplo território, não surpreende que o Brasil seja um dos países onde a bioenergia, e especialmente em suas formas mais modernas, seja mais intensamente utilizada. Em 2020, a bioenergia representou 33,7% do consumo total de energia, respondeu por 9,1% da energia elétrica produzida e contribuiu com 70% do total de energia renovável utilizado no

Brasil (EPE, 2021). Para os setores mais relevantes na demanda energética, em dados de 2019, a bioenergia também foi relevante, significando nas indústrias 39,9%, no transporte 25,1% e nas residências 28,1% dos respectivos consumos setoriais (EPE, 2021). O uso extensivo da bioenergia, juntamente com a energia fornecida por outras fontes renováveis, permite situar a matriz energética brasileira entre aquelas com maior percentual de energia renovável do mundo.

É interessante estimar a fração da bioenergia consumida no Brasil que utiliza biomassa de forma sustentável e responsável, sem a predação de recursos naturais. Com esse objetivo, pode ser assumido que os biocombustíveis utilizados no setor de transporte (etanol, biodiesel e biometano) e na geração de energia elétrica, bem como a totalidade dos resíduos agroindustriais (como bagaço, licor negro e resíduos da indústria madeireira). De forma conservadora, se admitiu que 80% da lenha nas indústrias e 50% da lenha empregada na produção de carvão vegetal correspondem à produtos de atividades agrícolas e florestais convencionais, não associados a processos de desmatamento. Analogamente, o uso residencial de biomassa para cocção, ainda praticado por milhões de famílias brasileiras, não pode ser associado a uso predatório de formações naturais, já que tal combustível é sempre coletado ou recuperado de madeira rejeitada ou podas. Sob tais hipóteses, sintetizadas na Figura 1 (NOGUEIRA et al, 2020), se estimou que pelo menos 81% do consumo total de bioenergia no Brasil em 2017 baseia-se em biomassa renovável ou aproveitada, com a parcela restante correspondendo a processos baseados em biomassa nativa, cuja sustentabilidade caberia avaliar (NOGUEIRA et al, 2020).

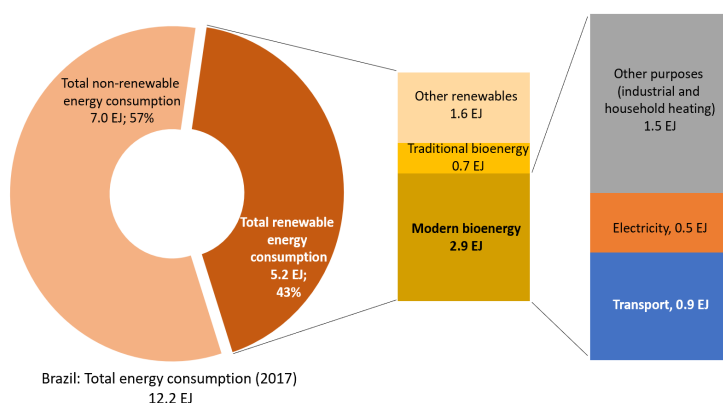


Figura 1 - Participação da bioenergia no consumo de energia primária no Brasil e composição da demanda bioenergética em 2017

A produção e uso de biocombustíveis modernos no Brasil teve início com a adoção da mistura obrigatória de um mínimo de 5% de etanol à gasolina comercializada a partir de 1931, iniciativa posteriormente reforçada com o Plano Nacional do Álcool em 1975, que promoveu a elevação progressiva do teor de etanol na gasolina, a adoção de veículos a etanol puro em 1979 e a introdução dos veículos flexfuel em 2003. Assim, ao longo de quase um século, o Brasil tem empreendido uma persistente jornada para substituir com sucesso os combustíveis fósseis pelos biocombustíveis. Atualmente, os biocombustíveis são distribuídos em todos os 41,7 mil postos do país, na forma de gasolina com 27% de etanol, etanol hidratado puro e diesel com 13% de biodiesel (devendo alcançar 15%) em 2023.

A matéria-prima principal para a produção de etanol é a cana-de-açúcar, processada em unidades associadas ou não à fabricação de açúcar, enquanto para o biodiesel, se utiliza o óleo de soja, complementado por outros óleos vegetais (como algodão, amendoim e girassol) e gorduras animais (como sebo bovino). A Figura 2 apresenta a evolução do teor de etanol e biodiesel respectivamente na gasolina e diesel no Brasil e a Figura 3 (EPE, 2021) mostra como variou nos últimos anos a substituição dos derivados de petróleo por biocombustíveis.

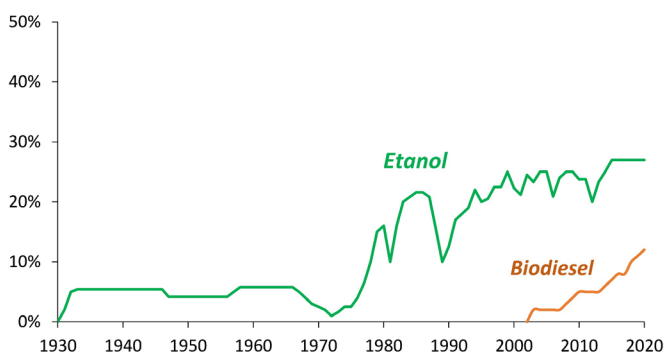


Figura 2 - Evolução do teor de biocombustíveis na gasolina e diesel no Brasil (% em volume)

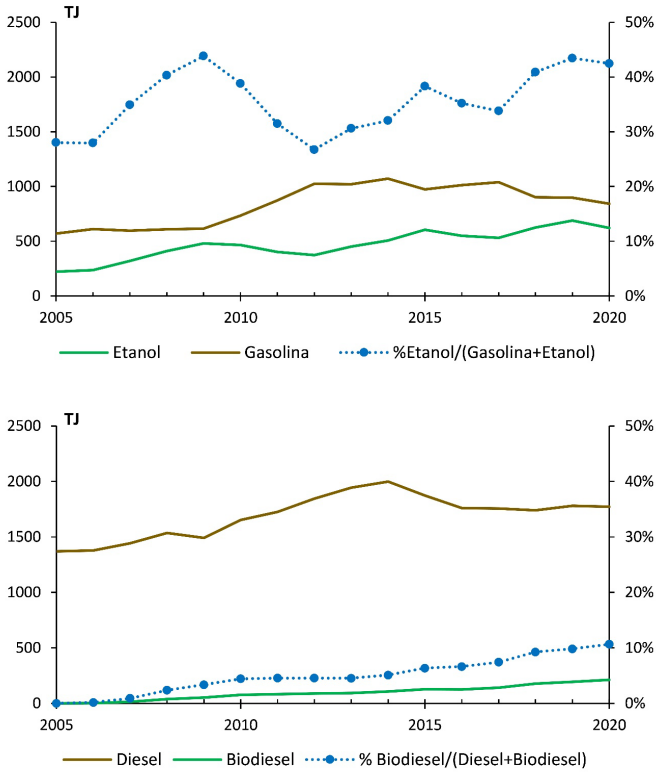


Figura 3 - Consumo de biocombustíveis e derivados de petróleo e participação dos biocombustíveis no mercado de combustíveis (EPE, 2021)

A produção de bioeletricidade no Brasil utiliza diversos tipos de biomassa e alcançou 55,6 TWh em 2020, representando 9% da oferta total no país, sua maior parte em usinas sucroalcooleiras (70%) e plantas de celulose (26%), como mostra a Figura 4 (EPE, 2021). A maior parte dessas centrais termelétricas opera em ciclos de cogeração de elevada eficiência, combinando a geração de energia elétrica com a produção de calor útil, em unidades instaladas junto a plantas industriais que fornecem o biocombustível e utilizam a energia térmica rejeitada pelas turbinas a vapor.

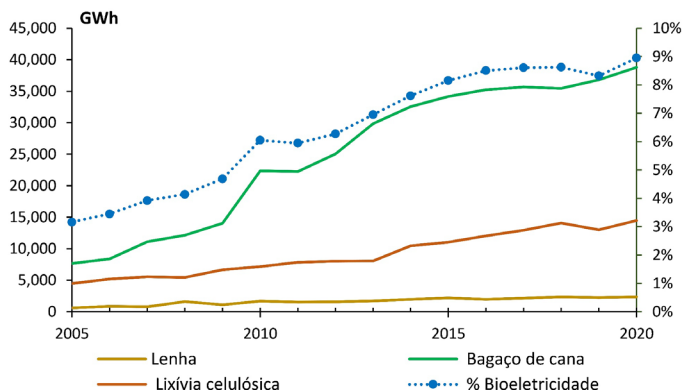


Figura 4 - Produção de eletricidade a partir de biomassa e participação na oferta de energia elétrica

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica, em 2020 estavam em operação no Brasil 557 centrais termelétricas a biomassa com uma potência instalada total de 15,04 GW (SIGA, 2021). Na Tabela 1 (SIGA, 2021) são apresentados o número de centrais e a capacidade por biomassa utilizada.

Tabela 1 - Centrais termelétricas a biomassa em operação no Brasil em 2020

Biomassa utilizada	Número de centrais	Potência (MW)	Potência média (MW)
Lixívia celulósica	18	2.531	140,6
Bagaço de cana	404	11.561	28,6
Capim elefante	2	32	15,9
Gás de alto forno	12	128	10,7
Madeira	69	549	7,9
Biogás	38	181	4,8
RSU	1	4	4,3
Casca de arroz	13	53	4,1
Total	557	15.039	27,0

Entre as principais motivações para o uso crescente de bioenergia em substituição aos combustíveis fósseis encontra-se a possível redução das emissões de gases de efeito estufa e a segurança energética. Neste contexto, o consumo atual de etanol e biodiesel no Brasil substituiu em 2019 cerca de 600 mil barris de petróleo por dia e evitou a emissão de 69,6 Mt de CO_{2eq}, enquanto a geração de bioeletricidade mitigou a emissão de 2,8 Mt de CO_{2eq} (EPE, 2020b). Todos os mais de 47 milhões de veículos brasileiros, desde motocicletas a caminhões pesados, utilizam algum tipo de biocombustível, puro ou em mistura com derivados de petróleo.

Um elemento novo e de grande importância para o desenvolvimento da bioenergia sustentável no Brasil é a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei 13.576/2017, que reconhece o papel estratégico dos biocombustíveis na matriz energética brasileira, sua contribuição para a segurança energética a descarbonização no setor de combustíveis. A produção e uso de biocombustíveis consiste num componente importante para o cumprimento das metas brasileiras de redução das emissões estabelecidas nos acordos de enfrentamento das mudanças climáticas. Nesse contexto, em uma bem sucedida articulação de agências de governo (MME, MAPA, ANP, EPE, Embrapa), com apoio de universidades e centros de pesquisa e entidades privadas, se implementou uma consistente base legal, atendendo três eixos estratégicos: Metas de Descarbonização (em linha com os compromissos brasileiros e endossadas pelo CNPE); Certificação Ambiental da Produção de Biocombustíveis (por entidades certificadoras independentes acreditadas, avaliando a eficiência ambiental a cada unidade produtora); e Crédito de Descarbonização (CBio) (título negociável referente a uma tonelada de CO₂ não emitida, concedidos aos produtores de biocombustíveis em função de sua produção e eficiência certificada, a ser adquiridos pelas distribuidoras de combustíveis fósseis para atender suas metas de descarbonização). Em 2020, primeiro ano efetivo de operação do RenovaBio, foram emitidos 18,5 milhões de CBios e comercializados cerca de 15 milhões na Bolsa de Valores B3 a um preço médio de R\$ 43,66. A meta de comercialização para 2021, quando se espera que os efeitos da atual pandemia sobre a demanda de combustíveis tenham sido superados, é de 24 milhões de CBios (NASTARI, 2018; MME, 2021; ANP, 2021a).

3. POTENCIAL PARA PRODUÇÃO DE BIOENERGIA SUSTENTÁVEL NO BRASIL

A oferta potencial de bioenergia, em bases sustentáveis, pode ser estimada considerando as diferentes fontes de biomassa usadas

na produção de energia. Assim, os recursos bioenergéticos podem ser (FAO, 2003):

- diretos: biomassa produzida especificamente para fins energéticos, como a cana utilizada para produzir etanol e eletricidade e a lenha oriunda da silvicultura;
- indiretos: biomassa produzida como subproduto de processos agroindustriais e florestais, como a lixívia celulósica na indústria de papel, o bagaço na moagem da cana-de-açúcar, a palha de cana coletada no campo, as cascas de arroz geradas no seu processamento e os resíduos florestais obtidos das operações silviculturais;
- recuperados: biomassa produzida a partir de materiais já utilizados pela sociedade, como caixas de madeira e papelão, e uma fração importante dos resíduos líquidos e sólidos urbanos.

Apenas a primeira categoria depende do cultivo de áreas agrícolas ou florestais, que podem ser ocupadas de forma intercalar com outros usos do solo, enquanto as demais dependem essencialmente das atividades humanas e consequente geração de resíduos e subprodutos.

Considerando inicialmente o potencial de produção de bioenergia que depende do uso do solo, as condições brasileiras são especialmente favoráveis, conjugando um clima propício com amplas áreas disponíveis e topografia adequada. Nesse sentido, são referências importantes os mapas resultantes do zoneamento agroecológico conduzido pela Embrapa Solos para as duas culturas já conhecidas no Brasil de maior potencial produtivo de biocombustíveis líquidos por área cultivada: cana-de-açúcar e palma africana (dendê). Tal zoneamento foi resultado de um levantamento exaustivo envolvendo dezenas de pesquisadores e instituições agrícolas e ambientais e considerando mapas de solo, clima, pluviosidade e topografia na classificação e definição das áreas de maior potencial de rendimento, respeitando as regulamentações ambientais e áreas que deveriam ser preservadas, bem como reduzindo a competição com áreas dedicadas à produção de alimentos. Esses mapas apresentam detalhadamente as áreas adequadas a cada cultura e excluem seu cultivo em biomas sensíveis e a expansão em áreas de qualquer tipo de vegetação nativa (EMBRAPA, 2009; EMBRAPA, 2010). Este zoneamento é fundamental para orientar as ações do governo brasileiro e garantir que a produção de bioenergia não ocorra em áreas ambientalmente sensíveis ou reduza as áreas atualmente destinadas a outros produtos agrícolas.

No zoneamento agroecológico brasileiro para a cana-de-açúcar, baseando-se em dados de uso da terra de 2002, aproximadamente 65,0 Mha foram considerados adequados para a expansão dessa cultura. Naquela época, cerca de 5,2 Mha eram destinados para a

produção de cana no Brasil. Com base na produtividade potencial, 19,3 Mha foram considerados como tendo potencial para alto rendimento e 41,5 Mha foram considerados como potencial médio. Dentre outras restrições, estão excluídas as seguintes áreas: (a) terrenos com declividade superior a 12%, considerando a adoção de colheita mecanizada, (b) áreas com vegetação nativa, (c) biomas Amazônia e Pantanal, (d) áreas de proteção ambiental e (f) terras indígenas. Enquanto a atual área plantada com cana-de-açúcar, para produção de açúcar e bioenergia, representa aproximadamente 1% da área total do Brasil (10,6 Mha em 2018, (UNICADATA, 2021)), o zoneamento agroecológico indica que a produção de cana-de-açúcar poderia se expandir para ocupar 7,5% das terras brasileiras, tornando evidente que “há terras mais do que suficientes para demandas futuras de açúcar e etanol projetadas para as próximas décadas nos mercados interno e externo” (Embrapa, 2009).

Com relação ao biodiesel, pressupondo a introdução progressiva de rotas de produção mais eficientes, o zoneamento agroecológico do dendê no Brasil considera dois níveis tecnológicos de manejo da cultura: empregando a tecnologia atual, com modesto capital de investimento e uso limitado de mecanização; e pressupondo a adoção de tecnologias aprimoradas e uso intensivo de mecanização e investimento de capital nas operações agrícolas. Como para a cana-de-açúcar, neste zoneamento foram considerados os requisitos ecofisiológicos da palma e as condicionantes ambientais, incluindo aspectos pedológicos, climáticos e topográficos, e foram excluídas as áreas protegidas por restrições legais ou regulamentares. Para o primeiro nível de manejo, o nível conservador, estima-se que 29,7 Mha de áreas já desmatadas na região amazônica seriam adequadas para a expansão da cultura do dendê. Deste montante – que equivalia a aproximadamente 5,9% da área denominada Amazônia Legal e 13,9% das áreas então desmatadas – cerca de 25% e 75% corresponderiam às condições preferenciais e regulares de expansão, respectivamente (Embrapa, 2010). Embora este estudo tenha se baseado em dados de uso da terra no ano de 2006, a área estimada para a expansão do dendê seria ainda maior do que a área global destinada à esta cultura em 2018 (FAO, 2018), indicando o considerável potencial brasileiro, conforme já salientado por alguns autores (BRANFORD and TORRES, 2018; PIRKER et al., 2016).

Atualmente, a cultura do dendê ocupa 236 mil hectares e, desde 2010, menos de 1,0% da expansão da cultura, mesmo que pequena, esteve relacionada à conversão de florestas nativas (Bonomi et al., 2018). Além disso, a indústria nacional já enxerga vantagens em não estar associada ao desmatamento de florestas tropicais. Atualmente, o Brasil apresenta uma das maiores proporções (cerca de 30%) da pro-

dução de óleo de palma certificada pela *Roundtable of Sustainable Palm Oil* (RSPO) (BRANFORD and TORRES, 2018; RSPO, 2019). Por outro lado, riscos de desmatamento a partir de um eventual aumento da demanda por óleo de palma no Brasil devem ser devidamente considerados, uma vez que as atuais plantações de palma estão em sua maioria próximas à floresta amazônica e as áreas potenciais para expansão da palma exigiram uma infraestrutura adequada para ser acessada, que não existe atualmente (BARBER et al., 2014).

Outras palmáceas como macaúba têm ganhado força no cenário nacional para a produção de bioenergia. Além dos elevados rendimentos agrícolas, a potencial área de cultivo estaria fora da região amazônica, reduzindo possíveis pressões para ao desmatamento de florestas tropicais, além da possibilidade de expansão em áreas de pastagens ou ser usada na recuperação de áreas degradadas. Alguns autores estimaram o potencial de 6,2 Mha para expansão na região sudeste do Brasil (PLATH et al., 2016), em condições ambientais altamente adequadas. Além disso, como os produtos da macaúba não são comumente utilizados para alimentação, seu uso para a produção de energia não estaria diretamente associado para a competição com alimentos (CARDOSO et al., 2017). Enquanto o aprendizado da cultura da macaúba em escala e para fins comerciais está se consolidando a partir de consideráveis esforços em pesquisa (CARDOSO et al., 2017; PLATH et al., 2016), espera-se contar com este potencial daqui 15 anos (CORTEZ, 2014).

Um aspecto importante do uso da terra para a produção de biocombustíveis no Brasil é o potencial de recuperação de áreas degradadas ou de baixo rendimento, resgatando essas terras para a produção econômica. Durante as últimas décadas a expansão da fronteira agrícola do Brasil tem ocorrido principalmente sobre as pastagens de baixa produtividade, utilizadas durante séculos adotando práticas quase extrativas para a pecuária extensiva e que ainda ocupam grande parte do território nacional (MOREIRA et al., 2011). Com a adoção de melhores práticas, como a introdução de forrageiras mais produtivas, rotação de pastos, melhoramento genético e manejo adequado do rebanho, a produtividade da pecuária apresentou notável ganho de eficiência, ocupando menos área e ampliando a produção de proteína animal. Como mostra a Figura 5 (partir de ATHENAGRO, 2019), entre 1990 e 2018, a área de pastagem diminuiu de 192 Mha para 161 Mha (-16%) e a produção de carne aumentou quase três vezes, alcançando 48 Mton (ATHENAGRO, 2019). De fato, o conflito entre alimentos e bioenergia, neste contexto, poderia ser considerado uma falácia.

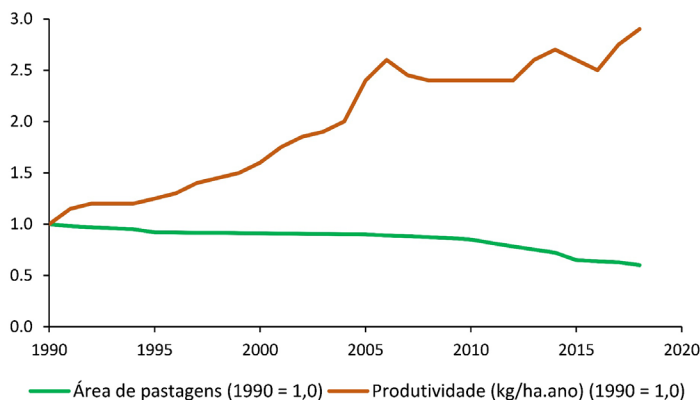


Figura 5 - Evolução da área de pastagem e produtividade do rebanho bovino no Brasil

Conforme indicado nos parágrafos anteriores, a oferta potencial e em bases sustentáveis de biomassa no Brasil é expressiva e variada, compatível com a amplitude e topografia favorável do território e o predomínio de um clima tropical úmido, pontos favoráveis à produção agrícola, bem como devido à numerosa população e diversificada atividade econômica, que gera volumes elevados de recursos indiretos e recuperados de biomassa. Não obstante, a revisão e atualização dos levantamentos de potencial para produção de biomassa, plantada ou reciclada, sempre serão úteis, inclusive porque podem adotar diferentes cenários e obter resultados distintos. Por exemplo, um estudo do potencial brasileiro de bioenergia, adotando produtividades conservadoras e essencialmente reproduzindo o contexto tecnológico atual para a produção e conversão de biomassa e assumindo a disponibilidade de 25 Mha adicionais para a produção dedicada à bioenergia até 2030, estima que será possível à bioenergia substituir apenas parcialmente (78% da gasolina e 58% do diesel) os derivados de petróleo usados no setor de transportes no Brasil (WWF, 2021). Em outra projeção, adotando condicionantes similares para assegurar a sustentabilidade, mas assumindo eficiências e produtividades compatíveis com a evolução observada em anos recentes e visando a descarbonização das emissões, estima-se que é possível a completa substituição das energias fósseis no transporte no Brasil nesse mesmo ano (AMF&IEA BIOENERGY, 2020).

Por sua vez, o potencial bioenergético da biomassa residual – quer seja obtida durante operações agrícolas, ou processamento da matéria-prima, ou ainda associado à disposição final de resíduos indus-

trias ou residenciais – tem ganhado destaque devido a eventual não competição por terra ou com a alimentos; bem como os aparentes baixos custos de aquisição. Atualmente, as “políticas de baixo carbono” (*Low-carbon Policies*) têm motivado claramente o uso de matérias-primas residuais para a produção de biocombustíveis (CAPAZ et al., 2021b).

Tal potencial depende da disponibilidade de biomassa que, por sua vez, está em função do cenário socioeconômico considerado, bem como do tipo de recurso e tecnologia de conversão. Estas condicionantes tornam a estimativa do potencial mais difícil, sobretudo quando a heterogeneidade do recurso (por exemplo nos resíduos sólidos urbanos) e sua dispersão geográfica (por exemplo nos resíduos agrícolas) impõe desafios logísticos, em alguns estudos limitar a avaliação ao potencial técnico, que prescinde de estudos econômicos.

Os Atlas de Bioenergia do Brasil (COELHO et al., 2012), elaborados pelo então Centro de Referência em Biomassa (CENBIO, atual GBIO) e publicados entre 2005 e 2012 procurou oferecer uma perspectiva abrangente sobre o potencial bioenergético de resíduos assumindo diferentes tecnologias de conversão. Entre os resíduos considerados encontram-se resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha), resíduos do processamento da madeira, resíduos agrícolas (casca de arroz, amendoim e coco), e biogás proveniente do tratamento de efluentes da suinocultura, efluentes líquidos domésticos e comerciais; e resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. Para efeito de comparação, em base energética, o potencial a partir dos resíduos de cana despontou como o mais promissor (290 PJ/ano), seguido pelo potencial dos resíduos de madeira (50 PJ/ano), biogás (16 PJ/ano) e resíduos agrícolas (10 PJ/ano). Vale salientar que a oferta interna média de energia no Brasil nos últimos dez anos foi próxima de 12 mil PJ.

Outros estudos como (LA PICIRELLI DE SOUZA et al., 2021; PORTUGAL-PEREIRA et al., 2015) avaliaram os vários potenciais de geração de energia a partir da disponibilidade resíduos agroindustriais avaliada em vários contextos. Ganha destaque a biomassa residual proveniente das grandes culturas brasileiras como cana, soja e milho, seguido dos resíduos da silvicultura. De acordo com o primeiro estudo, cerca de 7200 PJ/ano poderiam ser teoricamente obtidos a partir de 400 Mt de resíduos (dados de 2018), considerando a geração, disponibilidade, e poder calorífico. Porém, assumindo limites técnicos e de logística, o potencial dos resíduos seria reduzido a menos de 500 PJ/ano.

4. PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS PARA A BIOENERGIA NO BRASIL

O relevante potencial bioenergético do Brasil, conforme explorado no item anterior, ganha contornos diferentes quando é avaliado sob a perspectiva das diferentes alternativas tecnológicas de conversão a fim de abastecer novos mercados. Sem a pretensão de exaurir o tema, nos itens seguintes serão pontuadas algumas das principais tendências tecnológicas para a conversão de bioenergia, na perspectiva do mercado a ser atendido.

4.1 Biocombustíveis líquidos convencionais

Conforme mencionado, a produção atual e uso de biocombustíveis no Brasil, que supera consideravelmente o percentual do que é utilizado na maioria dos países do mundo, consiste em basicamente etanol de cana-de-açúcar e biodiesel.

O parque produtivo de etanol no Brasil, composto por mais de 350 usinas, apresentou uma capacidade média de moagem de 2.5 milhões de toneladas de cana/ano, com geração de eletricidade excedente de 35 kWh/t cana processada, e produção de etanol em próximos de 80 L/t_{cana}, considerando toda a alocação da cana para esta finalidade. Espera-se contar com a instalação de mais 8 usinas de cana-de-açúcar até 2030, com capacidade média de moagem anual de 3.8 milhões de toneladas por usina (EPE, 2020a).

Entende-se que a atual política de biocombustíveis no Brasil (RenovaBio) possa efetivamente incentivar a modernização do setor, que sofreu com recentes reveses na década passada. Logo nos primeiros meses de 2021, foram contabilizados a emissão de aproximadamente 2.5 milhões de créditos CBIOS por mês, contando à época com aproximadamente 270 unidades produtoras de biocombustíveis, sendo que 90% destas correspondiam a usinas de etanol a partir de cana (NOVACANA, 2021b).

Por outro lado, vislumbrando novas oportunidades para o setor de etanol, o uso do milho como matéria-prima tem ganhado espaço nos últimos anos. Em 2019 a produção de etanol de milho correspondeu a aproximadamente 3.6% da produção nacional, i.e., 1,3 milhões de litros a partir de oito unidades do tipo *flex* (associadas às unidades de etanol de cana) e quatro unidades *full*, tendo milho como único insumo. Estima-se que, com a implantação de 7 unidades *flex* e 18 do tipo *full*, a produção alcance 5,7 bilhões de litros em 2030, representando 12% da produção de etanol estimada para aquele ano (EPE, 2020a).

Para a produção de biodiesel, nos próximos anos espera-se que seja mantido o perfil convencional de produção em termos anos da

composição da matéria-prima e processos, i.e., transesterificação alcalina com metanol. Mesmo assim, vale citar o crescente interesse na transesterificação enzimática (MILESSI et al., 2021). Entre as vantagens oferecidas pelo processo enzimático em comparação com o processo convencional estariam a menor geração de efluentes, a obtenção da glicerina com maior pureza, melhores resultados de performance ambiental, além da baixa influência da presença de ácidos graxos livres, tipicamente encontrados em matérias-primas residuais como óleo de fritura (ZHONG et al., 2020).

4.2 Biocombustíveis líquidos veiculares alternativos

Atualmente, o Brasil conta com duas plantas *stand-alone* de etanol lignocelulósico a partir de hidrólise enzimática, com capacidade de produção nominal anual de 40 milhões de litros a partir de bagaço de cana (RAÍZEN, 2021) e 60 milhões de litros a partir de palha de cana (GRANBIO, 2021). Problemas técnicos associados ao processamento da matéria-prima têm explicado a produção inconstante nos últimos anos e bem abaixo da capacidade nominal. Tais fatos não são exclusividade das plantas brasileiras, uma vez que muitas usinas encontram-se paradas. Entre as safras 2017-2019, ambas as unidades existentes no Brasil produziram ao todo cerca de 45 milhões de litros de etanol, sendo parte exportada para ao mercado americano (EPE, 2020b).

No horizonte decenal, as estimativas para a produção de etanol lignocelulósico são conservadoras e sugerem uma produção de até 400 milhões de litros em 2030 (EPE, 2020a). Embora este montante seja equivalente a menos de 1% da oferta de etanol estimada para aquele ano, existe uma clara percepção do crescimento do setor nos próximos anos (NOVACANA, 2021a).

Nos estudos citados anteriormente, dentre o potencial de resíduos lignocelulósicos, os resíduos provenientes do setor da cana-de-açúcar recebem grande destaque, juntamente com resíduos de soja, milho e resíduos florestais. Considerando a ausência de práticas consolidadas no recolhimento dos resíduos de soja e milho – possivelmente pelos benefícios nutricionais para o solo e a cultura – e a indicação de relevante geração de resíduos de colheita de madeira plantada (IBA, 2019), Capaz et al. (2021) estimou a disponibilidade de aproximadamente 14,6 e 55,3 Mt(base seca), de resíduos florestais e de cana (palha e bagaço), respectivamente. A partir deste montante, o potencial de produção de etanol lignocelulósico aproximar-se-ia de 60% da oferta total de etanol contabilizada em 2019 (34.5 milhões de litros ou cerca de 770 PJ (EPE, 2021)), ou cerca de 50% do consumo de gasolina no mesmo ano, conforme apresenta a Figura 6, baseada

em Bonomi et al. (2016); Capaz et al. (2021a); e Roberto Schaeffer et al., (2020).

Porém, ao lado dos desafios tecnológicos referentes à produção de etanol lignocelulósico, a disponibilidade destas matérias-primas também deve ser encarada com ressalvas.

Vale salientar, no entanto, que a viabilidade econômica e ambiental de coletar os resíduos de madeira e destiná-los para a produção de etanol ainda carece de uma avaliação mais robusta, como tem sido feito nos recentes estudos sobre a palha da cana (CARDOSO, 2014; CARDOSO et al., 2018; LEAL and HERNANDES, 2020). Algumas empresas de papel e celulose indicam o recolhimento dos resíduos florestais baseado em critérios tipicamente econômicos e não tem sido observado efeitos ambientais adversos em áreas onde todo o resíduo é colhido em comparação com áreas onde é mantido no campo (COELHO, 2018).

Por sua vez, atualmente não existe um mercado consolidado de resíduos lignocelulósicos de cana e nem um excedente operacional desta ordem de grandeza é verificado. Os valores mencionados acima, baseando-se em (SEABRA and MACEDO, 2011) foram estimados considerando a otimização das usinas atuais, especialmente pela redução do consumo de vapor e melhorias nos processos de cogeração, de modo que a planta continuasse a ser autossuficiente e houvesse um excedente de resíduos com possível comercialização.

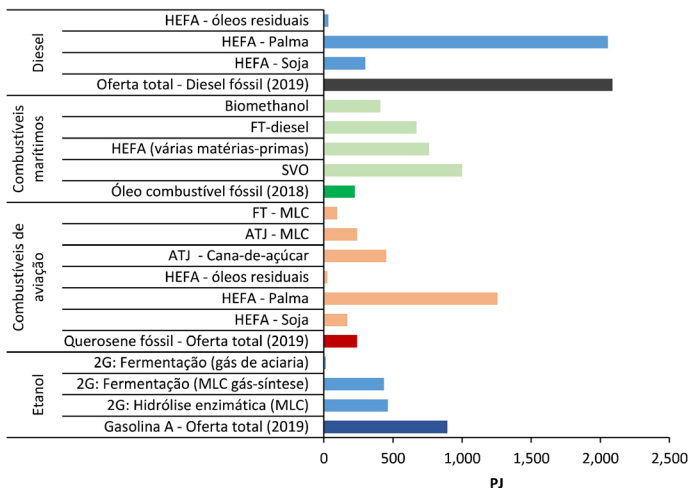


Figura 6 - Potencial de produção de biocombustíveis líquidos a partir de diferentes rotas produtivas e matéria-prima em comparação com a recente oferta interna de combustíveis fósseis

Por outro lado, percebe-se que, recentemente, a produção de etanol tem alcançado novas fronteiras com a instalação das primeiras plantas em escala comercial de fermentação de gases (LANZATECH, 2018). A utilização de gases residuais, como o gás de aciaria, ou o gás-de-síntese obtido a partir de biomassa residual (HANDLER et al., 2016; OU et al., 2013) abre novas possibilidades para a valorização de resíduos, além do relevante apelo ambiental.

Considerando os rendimentos encontrados na literatura (CA-PAZ et al., 2021a; DE MEDEIROS et al., 2017) e a eventual disponibilidade de resíduos florestais e de cana, a obtenção de etanol a partir da fermentação de gases aproxima-se ao que foi estimado para a rota de hidrólise (450 PJ). Por outro lado, a utilização de gases de aciaria resultaria num tímido potencial total (13 PJ), embora possa ser considerado estratégico a partir da perspectiva das siderúrgicas.

No contexto dos veículos rodoviários pesados, que correspondem majoritariamente ao principal modal para o transporte de cargas no Brasil, percebe-se que o consumo de diesel no Brasil, ultrapassa em aproximadamente 1,5 vezes o consumo da gasolina. Neste contexto, o hidrotreatamento de óleos vegetais (HVO, *hydrotreated vegetable oil*) ou ésteres de ácidos graxos (HEFA, *hydroprocessed esters and fatty acids*), já produzido comercialmente em vários locais do mundo como Estados Unidos e Holanda, passa a ser uma alternativa estratégica.

Embora os volumes produtivos de etanol no mundo (114 bilhões de litros) e biodiesel (47 bilhões de litros) sejam bem maiores que o HVO, as taxas anuais de crescimento na produção de HVO (6% ao ano desde 2014) aproxima-se do verificado para o etanol e apresentou-se acima do biodiesel (3%) no mesmo período, o que demonstra o crescente interesse do setor. Em 2019, a produção mundial de HVO alcançou 6.5 bilhões de litros (REN21, 2020).

De maneira geral, o processo de obtenção do HVO, que difere totalmente da produção de biodiesel, consiste no hidrotreatamento de matéria-prima oleaginosa com hidrogênio na presença de um catalisador. A partir deste processo, as ligações são saturadas, o oxigênio é removido das cadeias, bem como a “espinha dorsal” dos triglicerídeos de onde se obtém o propano. Posteriormente, as cadeias de hidrocarbonetos são hidrocraqueadas em diferentes faixas, isomerizadas e, por fim, fracionadas produzindo combustíveis como diesel, querosene, e outros produtos, como nafta e propano (PEARLSON et al., 2013; VÁSQUEZ et al., 2017). Vale salientar que o combustível H-Bio patenteado pela Petrobras baseia-se em processos similares aos descritos acima, porém seria obtido a partir do co-processamento dos óleos vegetais com o diesel fóssil dentro do processo de refino (PETROBRAS, 2021).

A agência brasileira de regulação de combustíveis publicou recentemente uma resolução com as especificações para a produção do diesel verde (ANP, 2021b). Nesta resolução estão definidas tecnologias passíveis para a produção do diesel verde, sendo que algumas já encontram-se disponíveis em escala comercial como: o hidrotratamento de óleos e gorduras, como descrito acima, o processo *Fischer-Tropsch* do gás de síntese obtido da biomassa, e a oligomerização de etanol ou isobutanol. A fermentação de carboidratos e hidrotermólise catalítica também foram incluídas. Após intensas discussões (BIODIESELBR, 2020a, 2020b) e pressões por parte da Petrobras para a inclusão do H-Bio – com co-processamento de 5% de óleo vegetal com o diesel fóssil – no grupo das tecnologias associadas ao diesel verde, a agência descartou esta alternativa visto a pequena contribuição de energia renovável ao produto final (MACHADO, 2021).

Considerando a produção de diesel verde a partir do hidrotratamento de óleos vegetais, já que é a rota mais madura (PEARLSON et al., 2013), estima-se que a área de soja necessária para abastecer o consumo total de diesel em 2019 no Brasil, seria de aproximadamente 130 Mha, ou seja, cerca de três vezes mais do que cultivado atualmente no Brasil (IBGE, 2019). Assumindo a expansão da palma, em função da elevada produtividade de óleo desta espécie, seriam necessários aproximadamente 23 Mha, o que se aproxima valor disponível estimado para a expansão desta cultura em áreas degradadas (EMBRAPA, 2010). Tais valores de área reduzir-se-iam a 26 e 5 Mha, respectivamente, caso a produção de HVO em território nacional substituísse o montante importado de diesel, que tem representado cerca de 20% da oferta total deste combustível no país nos últimos anos (EPE, 2021).

A despeito do claro interesse em fomentar a consolidação da cadeia do diesel verde no Brasil, atrelado a maior redução de GEE e maior estabilidade nos motores em comparação com o biodiesel (EPE, 2020c), no horizonte decenal não está prevista a produção significativa deste combustível (EPE, 2020a).

4.3 Bicomcombustíveis de aviação

O crescente interesse em descarbonização das atividades antrópicas recentemente “atingiu os céus”, quando a Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO) determinou metas ambiciosas de redução das emissões de gases de efeito estufa em voos internacionais (ICAO, 2010). Entre as ações sugeridas para alcançar tais metas, a substituição do querosene fóssil por biocombustíveis de aviação é encarada como uma medida estratégica pois, além de possibilitar uma redução efetiva nas emissões, poderia garantir a diminuição da dependência do setor aos combustíveis fósseis.

Por outro lado, o rigoroso (e justificado) controle de qualidade sob as principais operações no setor aéreo deve ser, consequentemente, estendido aos eventuais combustíveis alternativos. Neste contexto, apenas combustíveis *drop-in* – ou seja, funcionalmente equivalentes aos combustíveis fósseis, e sem a necessidade de ajustes adicionais na cadeia de distribuição ou no motor da aeronave (CAAFI, 2019) – podem ser certificados para uso. Atualmente, sete rotas produtivas de biocombustíveis de aviação estão devidamente aprovadas pela norma D7566 (ASTM, 2020) com limites máximos de mistura com o querosene fóssil que variam de 10 a 50% (em volume).

Entre as rotas aprovadas encontra-se: i) o hidrotratamento de óleos vegetais ou residuais (tecnologia HEFA) (PEARLSON et al., 2013); ii) a desidratação com posterior isomerização/oligomerização de etanol ou isobutanol (tecnologia ATJ) (ATSONIOS et al., 2015); e iii) o processo *Fisher-Tropsch* (FT) de gás de síntese obtido da gaseificação da biomassa (KLERK, 2011). Todas estas rotas, que já vem sendo desenvolvidas por várias empresas (EPE, 2020b; WANG and TAO, 2016), produziram biocombustíveis de aviação cujas características permitem a mistura em até 50% com o querosene fóssil.

Aqui vale ressaltar que, no âmbito das metas da ICAO, o combustível alternativo também deve ser certificado como sustentável (SAF, *Sustainable Aviation Fuel*). Isso se dá quando o biocombustível ao promover uma redução de, ao menos, 10% das emissões de GEE em comparação com o querosene fóssil ao longo do ciclo de vida, além de ser obtido de terras não desmatadas depois de 2008 (ICAO, 2019a).

De maneira geral, tais iniciativas inauguraram um novo mercado de biocombustíveis, onde o Brasil pode exercer um considerável protagonismo. Embora o setor aéreo brasileiro represente cerca de 2% das operações aéreas globais, incluindo voos domésticos (ANAC, 2020; ICAO, 2019b), o reconhecido potencial bioenergético do país poderia abastecer parte desta nova demanda numa base sustentável.

Este potencial foi recentemente avaliado através de um detalhado *roadmap* que envolveu vários colaboradores e representantes dos setores público e privado, academia e organizações não-governamentais (CORTEZ et al., 2014). De acordo com este estudo, a produção de bioquerosene através de etanol de cana-de-açúcar e etanol lignocelulósico apresentaram a melhor combinação de baixo risco técnico/comercial e alto potencial estratégico. Por sua vez, a utilização de matéria-prima oleaginosa através da tecnologia HEFA apresentaria riscos técnicos ainda menores, uma vez que já são baseadas em tecnologias já maduras, embora o potencial estratégico varie razoavelmente considerando à possível competição com alimentos, teor de óleo, e estabelecimento de culturas pouco conhecidas no Brasil, como macaúba.

Os altos riscos comerciais à produção de bioquerosene a partir de óleos residuais estariam relacionados à disponibilidade efetiva da matéria-prima e à possível competição com o uso atual.

O potencial total de produção de biocombustíveis de aviação a partir das rotas produtivas mencionadas acima superariam consideravelmente o consumo de querosene fóssil no Brasil (cerca de 7.0 milhões de m³ em 2019, ou cerca de 240 PJ), do qual 15-20% é importado (vide Figura 6). O potencial produtivo de biocombustível a partir os resíduos lignocelulósicos provenientes da colheita florestal e do setor canavieiro, conforme assumido acima, já equivaleria ao valor total de querosene consumida, enquanto o cultivo dedicado de palma e cana – sem a competição com o uso atual, em áreas adequadas e viáveis – garantiriam a produção e seis vezes mais do montante consumido hoje (CAPAZ et al., 2021a). Embora produção de biocombustível de aviação a partir do óleo de soja seja apontado como a opção mais viável no curto prazo (CANTARELLA et al., 2015), o potencial da rota baseada na cana de açúcar, incluindo a performance ambiental de toda a cadeia de suprimento, agrega muitas vantagens (CAPAZ, 2021). Da mesma forma, uma eventual rota baseada em palma poderia oferecer oportunidades para o desenvolvimento do setor. No entanto, o grande potencial de expansão de palma em áreas degradadas (EMBRAPA, 2010) deve sempre considerar os riscos de desmatamento em função da localização de tais áreas, que encontram-se consideravelmente próximas de regiões com florestas nativas, e da falta de infraestrutura de escoamento dos produtos (BRANFORD and TORRES, 2018).

A despeito do reconhecido potencial nacional de produção de biocombustível de aviação, do crescente interesse em tal mercado, e do esperado aumento nas importações de querosene, estima-se que em 2030 tais combustíveis corresponderiam a apenas 1% do que seria consumido de querosene fóssil (9.0 milhões de m³ ou 310 PJ) (EPE, 2020a).

De maneira geral, na maior parte dos cenários investigados na literatura, a produção de biocombustíveis de aviação ainda não é competitiva com o querosene convencional. O hidrotreatamento de óleos residuais ou gorduras animais chega a apresentar menores custos, mas ainda, pelo menos, 50% maiores que os do querosene fóssil (CAPAZ et al., 2021a). Porém, o potencial de produção e o volume disponível pode ser considerado um entrave para a consolidação de uma cadeia de suprimentos. Por sua vez, rotas produtivas integradas podem ser atrativas economicamente, mas desafios tecnológicos na implantação de plantas comerciais tornam-se obstáculos relevantes (KLEIN et al., 2018).

4.4 Biocombustíveis marítimos

Similarmente aos setores de transporte mencionados acima, os interesses de descarbonização também estão presentes no setor marítimo internacional. Metas e estratégias para a redução de gases de efeito estufa (IMO, 2021a) e emissões de óxidos de enxofre (IMO, 2021b) já estão vigentes, sendo que, em ambos os cenários, o uso de biocombustíveis ocupa uma posição estratégica.

Existem várias rotas de biocombustíveis alternativos ao óleo combustível marítimo (*bunker fuels*) – utilizado em grandes e lentas embarcações, como em navegação internacional – e diesel marítimo (*marine gasoil*), utilizados em embarcações mais leves e rápidas. De maneira geral, as rotas baseiam-se em: i) extração ou tratamento de óleos vegetais ou residuais, como hidrotratamento ou transesterificação; ii) processos termoquímicos como *Fisher-Tropsch* e pirólise; e iii) combustíveis gasosos ou álcoois, como o biometano e biometanol, respectivamente (MÜLLER-CASSERES et al., 2021).

De recentes estudos conduzidos no contexto brasileiro (MÜLLER-CASSERES et al., 2021; SCHAEFFER et al., 2020), ao menos quatro rotas produtivas de biocombustíveis marítimos apresentaram potencial técnico, maturidade tecnológica, disponibilidade, boa performance econômica, e bons indicadores em termos de sustentabilidade local e global. Todas elas reportaram potencial produtivo de, pelo menos, o dobro do que foi consumido de *bunker fuels* (5.6 milhões de m³ ou 220 PJ) em 2018, ressaltando o relevante potencial brasileiro (vide Figure 6). Mesmo assim, o planejamento decenal de expansão da oferta de energia ainda não contempla a produção e uso de biocombustíveis marítimos (EPE, 2020a).

A utilização de óleo vegetal *in natura* (SVO, *Straight Vegetable Oil*) destinado à substituição do óleo combustível apresentou o maior potencial produtivo com possibilidade de expansão em áreas de pastagem degradadas, ou seja, com baixo risco de desmatamento. Em termos comparativos, o volume de óleo de soja produzido no Brasil e ofertado ao mercado interno (7.2 milhões de m³ (ABIOVE, 2020)) seria o próximo ao volume de óleo combustível demandado nos portos brasileiros. Por sua vez, o óleo vegetal hidratado (HVO), também usado para a substituir a demanda de diesel marítimo, apresentou considerável potencial produtivo com custos relativamente competitivos.

Ambas as rotas são apontadas como as preferidas em cenários de descarbonização em 2050 (MÜLLER-CASSERES et al., 2021). Em cenários mais agressivos de descarbonização, a rota termoquímica avançada, especialmente a partir de biomassa residual, é apontada como a mais adequada, porém os custos ainda podem ser considerados um gargalo (SCHAEFFER et al., 2020).

4.5 Hidrogênio

A produção e uso do hidrogênio como vetor energético tem ganhado grandes incentivos nas últimas décadas e é considerado como uma das tecnologias estratégicas para a descarbonização da economia global até 2070, visando os cenários de redução de temperatura Terra (IEA, 2021). No entanto, o potencial de descarbonização do hidrogênio, e conseqüentemente, o interesse em produzi-lo neste contexto, estão intimamente ligados à tecnologia e matéria-prima utilizadas, sendo o uso da biomassa considerado fortemente promissor (MORENO and DUFOUR, 2013; SUSMOZAS et al., 2013).

Supondo a disponibilidade de resíduos agroflorestais assumidos anteriormente e típicos rendimentos de plantas de gaseificação da biomassa, estima-se um potencial de produção de 45,7 bilhões de m³ de hidrogênio ou (495 PJ).

A gaseificação da biomassa, que é considerada uma das rotas da obtenção do hidrogênio verde (DINCER, 2012), já apresenta-se mais competitiva (2,0 - 4,0 USD/kg H₂) que a produção de hidrogênio a partir da eletrólise (3,5 - 6,5 USD/kg H₂), embora ainda a custos maiores que a rota convencional a partir da reforma do gás natural (1,0 - 2,0 USD/kg H₂) (U.S.DRIVE, 2017). Os elevados custos de capital associados ao processo de gaseificação, bem como os custos da matéria-prima, sugerindo que a localização das plantas frente à disponibilidade de biomassa e logística de coleta são aspectos relevantes que devem ser considerados para eventuais tomadas de decisão (SALKUYEH et al., 2018; U.S.DRIVE, 2017).

Aproveitando o potencial eólico e solar do litoral nordestino, recentemente foi inaugurado um *hub* de produção de hidrogênio no complexo portuário Pecém no Ceará com fins de exportação para Europa, Estados Unidos e África (DIÁRIO DO NORDESTE, 2021). Os investimentos da ordem de 5 bilhões de dólares garantiriam a produção de 10 milhões de m³ de hidrogênio verde a partir da eletrólise da água.

4.6 Biogás

Considerando o processamento de diversas biomassas residuais, e enfocando o potencial da produção de biogás no Brasil, em bases regionais, tem sido estimado anualmente desde 2015 pela Abiogás (Associação Brasileira de Biogás e do Biometano), a partir do levantamento dos volumes de biomassa passíveis de biodigestão anaeróbia e cenários de aproveitamento e produtividade de efluentes líquidos e resíduos sólidos. O potencial técnico total estimado com dados de 2019, indicado na Tabela 2 (ABIÓGÁS, 2020) alcançou 81,8 bilhões

de m³ de biogás por ano, que permitiria gerar 173 TWh (ABIÓGÁS, 2020), quase um terço do consumo de eletricidade no Brasil nesse ano.

Tabela 2 - Potencial para produção de biogás no Brasil

Sector	Biomassas utilizadas	Potencial (bilhões de m ³ /ano)
Sucroalcooleiro	Palha, bagaço, vinhaça e torta de filtro	39,8
Abatedouros e outras agroindústrias	Resíduos orgânicos diversos	21,6
Pecuária, suinocultura e avicultura	Dejetos animais	16,8
Resíduos urbanos	Resíduos sólidos e esgoto volume atualmente tratado)	3,6

Nesse contexto, as agroindústrias se destacam, significando 75% do potencial estimado. Além dos resíduos estarem disponíveis em escalas mais viáveis, seu processamento traz ainda benefícios ambientais, como ocorre com a biodigestão da vinhaça, que vem sendo progressivamente adotada nas usinas sucroalcooleiras. Considerando apenas o processamento da vinhaça e da torta de filtro, pelos valores da Abiogás o potencial brasileiro significa aproximadamente 10,8 milhões de m³ de biometano por dia, 15% do consumo nacional de gás natural em 2019 (EPE, 2020a).

No horizonte decenal, estima-se que, em 2030, aproximadamente 6,9 bilhões de m³ de biogás seria produzido, majoritariamente a partir da vinhaça de torta de filtro (EPE, 2020a).

4.7 Bioeletricidade

A geração elétrica a partir da biomassa, ou bioeletricidade, além de contribuir com a oferta total de eletricidade pela rede, apresenta importante complementaridade com a geração de hidroeletricidade, em função da sinergia entre os meses de escassez hídrica e a safra da cana-de-açúcar. Estima-se para os próximos dez anos a expansão de 8.6% na capacidade instalada de termelétricas a biomassa, alcançando 15.1 GW em 2030, sendo o menor incremento entre as fontes renováveis como pequenas centrais hidrelétricas (35%), eólica (102%), ou solar (171%) (EPE, 2020a).

Mais de 60% da bioeletricidade injetada na rede tem sido proveniente de termelétricas abastecidas por bagaço de cana. Prevê-se que este perfil ainda seja mantido no horizonte decenal através da instalação de 635 MW e 127 MW de usinas à bagaço de cana e biomassa

florestal, respectivamente, majoritariamente localizadas na região centro-sul (EPE, 2020a).

Apesar da clara percepção de evolução da geração de bioeletricidade, o potencial a ser explorado é consideravelmente superior à atual geração. Atualmente, cerca de 22.5 mil GWh (2.7 GW médio) são exportados para a rede a partir do bagaço de cana, com o potencial técnico sendo estimado em aproximadamente 200 mil GWh (22.8 GW médio), incluindo o recolhimento de palha (SOUZA, 2021).

Valores na mesma ordem de grandeza são encontrados a partir dos cenários descritos por (BONOMI et al., 2016), onde usinas padrão – semelhantes à configuração média do parque industrial atual – são comparadas com usinas otimizadas, percebe-se ganhos relevantes na maior geração de eletricidade excedente. Naqueles cenários, as usinas otimizadas foram modeladas para uma moagem anual de 4.0 milhões de toneladas de cana e seriam abastecidas com parte da palha recolhida do campo. A redução do consumo específicos de vapor, eletrificação das moendas, secagem do etanol através de pe-neiras moleculares, e melhor design no sistema de cogeração, poderia garantir a geração de 185.0 kWh/t_{cana}. Apenas para efeitos comparativos, considerando o montante total de cana processada na safra 2019-2020 (590 milhões de toneladas), este potencial equivaleria a 20% da oferta total de eletricidade pela rede no mesmo ano, ou seja, 110 mil GWh.

Vale salientar que a modernização do setor da cana pode encontrar forte suporte na atual política nacional de biocombustíveis RenovaBio (ANP, 2018), uma vez que produtores uma maior geração de eletricidade excedente implica na geração de mais créditos de descarbonização (CBIOs), trazendo potenciais recursos adicionais para unidade produtora (ESTEVES, 2021) Essa avaliação está consoante às expectativas da Associação da Indústria de Cogeração de Energia, segundo a qual os estímulos à maior eficiência e expansão da capacidade de moagem associados ao Renovabio, poderão incrementar em 57% a capacidade instalada nas usinas sucroalcooleiras até 2030 (COGEN, 2018).

Visto o considerável potencial da geração de bioeletricidade a partir dos resíduos da cana, vale observar que os protocolos ambientais coibindo a queima dos canaviais prévia à colheita e a rápida expansão do emprego da colheita mecanizada estimularam de forma relevante a valorização energética da palha da cana e justificaram estudos sobre o potencial e os condicionantes do uso desse recurso. Como principal iniciativa nessa direção, o Projeto SUCRE (*Sugarcane Renewable Electricity*), desenvolvido no Laboratório Nacional de Bio-renováveis, LNBR entre 2015 e 2020, proporcionou uma abrangente e densa base de informações (LNBR, 2021). Foram estudadas, com

apoio de experimentos e testes em campo, as tecnologias para coleta, processamento e queima da palha, os impactos ambientais e agrônômicos do recolhimento da palha, bem como a viabilidade econômica da geração de eletricidade nas usinas e o marco legal e regulatório do setor elétrico, desenvolvendo uma avaliação integrada dos impactos técnico-econômicos, ambientais e sociais do aumento do uso da palha para produção de eletricidade. A partir dos potenciais estimados por este estudo, a adequada utilização da palha disponível na cana processada em 2019, cerca de 44 Mton (base seca), permitiria à essa agroindústria cobrir todo o consumo de eletricidade do setor residencial brasileiro em 2019 (WATANABE, 2020).

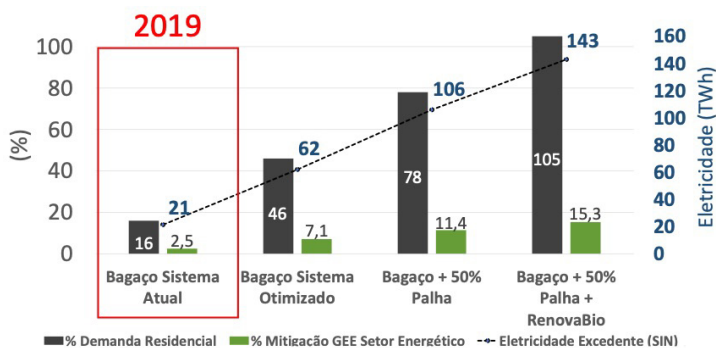


Figura 7 - Incremento potencial na oferta de energia elétrica pelo uso da palha na agroindústria canieira (WATANABE, 2019)

5. COMENTÁRIOS FINAIS

A amplitude enciclopédica dos recursos bioenergéticos disponíveis e potenciais no Brasil, a diversificada gama de alternativas de produção e utilização de vetores bioenergéticos, mediante rotas bem conhecidas e em desenvolvimento, torna desafiadora e sempre incompleta a tarefa de apresentar nos limites de um artigo acadêmico o cenário da bioenergia no Brasil em seus múltiplos aspectos. Um país que, nas belas palavras do poeta Thiago de Mello, é a “terra do Sol e a pátria das águas”, tem na bioenergia moderna uma opção natural e inescapável, um caminho certo, que vem sendo percorrido e acumula sólidas experiências desde há quase um século, alcançando um protagonismo global, não apenas pelo montante de energia processada, mas principalmente pela base de conhecimento agregado a partir de estudos e competências locais. Em um quadro global de transição para

cenários energéticos mais sustentáveis, como atualmente vivido, a bioenergia proporciona ao Brasil uma condição privilegiada, apresentando hoje indicadores no uso de energia renovável que ainda estão nos planos de outros países.

Promover o desenvolvimento da bioenergia sustentável no Brasil significa, a um só tempo, atender a demanda energética de combustíveis e eletricidade com uma fonte primária renovável e despachável, de relevante impacto na geração de empregos e renda, bem como reduzir a dependência de tecnologias energéticas importadas, como solar e eólica, que atualmente alcançaram um patamar de elevado desenvolvimento com altos níveis de desempenho e em escalas de produção, que constituem barreiras dificilmente passíveis de serem superadas pelos produtores brasileiros (GRADIN E NOGUEIRA, 2019). Nesse contorno estratégico, é oportuno observar que além de potencial supridor de energia com baixa emissão de carbono fóssil para outros mercados, especialmente no setor de transporte, onde a decarbonização se apresenta mais difícil, o Brasil é um potencial fornecedor de bens e serviços a montante e jusante das cadeias bioenergéticas para os diversos países com perfil de recursos naturais similar ao brasileiro, especialmente na América Latina e África, onde a bioenergia poderá cumprir um papel relevante para promover o desenvolvimento sustentável (TRINDADE et al., 2019).

No presente artigo procurou-se revisar e trazer elementos do estado atual dos sistemas bioenergéticos, dos recursos e as perspectivas tecnológicas, sem explorar a ampla temática social e ambiental envolvida, que por si só caberia em um artigo. Assim, temas relevantes como os oportunos nexos entre o desenvolvimento de sistemas bioenergéticos e a consecução de objetivos sociais desejáveis, a redução das desigualdades regionais, a geração de empregos e a melhoria dos índices de qualidade de vida, devem ficar para outros trabalhos de revisão. Não obstante, é possível afirmar de modo seguro que na dicotomia entre riscos e benefícios, a bioenergia apresenta possibilidades amplamente favoráveis e que merecem ser valorizadas e promovidas, em um marco de atenção aos indicadores de sustentabilidade.

Um bom exemplo de oportunidades insuspeitas em bioenergia que podem ser desenvolvidas e implementadas com resultados importantes é a produção de etanol de milho no centro-oeste brasileiro. Essa cultura anual apresentava reduzido interesse para a produção de bioenergia quando comparada à cana-de-açúcar, cuja elevada produtividade e ciclo semi-perene lhe conferem relevantes vantagens. Entretanto, o incremento da oferta de milho nessa região, conjugado a limitações logísticas para comercialização, estimularam em anos recentes seu emprego nas destilarias ociosas durante a entressafra da cana, gerando ainda volumes relevantes de concentrado proteico (DDG), coprodu-

to com boa demanda na pecuária bovina, tradicional atividade econômica no centro-oeste. Nesse contexto, se mostrou especialmente eficiente e competitiva a produção do milho “safrinha” ou segunda safra, cultivado tardiamente em comparação à safra tradicional desse cereal, geralmente em áreas de soja recém colhidas, com baixa demanda de fertilizantes, e a utilização de biomassa florestal (lenha de eucalipto) como fonte de energia na agroindústria. Em tais condições, o etanol de milho mostra-se bastante competitivo e com excelentes indicadores de sustentabilidade (Moreira et al., 2020), uma evolução notável em uma região que algumas décadas atrás era considerada de baixo potencial para agricultura. Atualmente, há 17 unidades produzindo etanol de milho no Brasil, entre plantas “*flex*” (que também produzem o biocombustível a partir da cana-de-açúcar) e “*full*” (que trabalham apenas com o cereal), processando 6,4 Mton de grãos (cerca de 6% da produção nacional) em 2020 e produzindo 2,75 bilhões de litros de etanol e 2,32 Mton de concentrado proteico (Unem, 2021). Perspectivas igualmente promissoras se observa na implementação de sistemas de biodigestão anaeróbia no processamento de resíduos agroindustriais (com destaque para a vinhaça das usinas sucroalcooleiras) e na utilização de resíduos sólidos urbanos como combustível em termelétricas.

O desejável desenvolvimento dos amplos recursos de bioenergia no Brasil, articulando a produção de energia renovável com objetivos sociais e ambientais, como em outras cadeias energéticas inovadoras, depende de um adequado marco institucional, com políticas públicas claras e estáveis, que reconheçam seus diferenciais e proporcionem previsibilidade, aspecto importante para reduzir riscos e estimular investimentos. Nesse sentido, metas e mandatos de produção estáveis têm se mostrado eficientes e necessários, na medida em que os biocombustíveis e a bioeletricidade devem acessar e compartilhar sistemas de distribuição e comercialização já existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGÁS. Associação Brasileira do Biogás. Disponível em: <https://abioogas.org.br/>. (acesso em 10.12.2020). 2020.

ABIOVE. Database of Oil Brazilian Industry [WWW Document]. Brazilian Association of Vegetable Oil Industries. 2020. Disponível em: <http://abiove.org.br/en/statistics/>. Acesso em: 8 fev. 2020.

AMF&IEA BIOENERGY. The Role of Renewable Transport Fuels in Decarbonizing Road Transport: Deployment Barriers and Policy Recommendations, Advanced Motor Fuels and IEA Bioenergy Technology Cooperation Programs, Paris. 2020.

ANAC. Air Transport Statistical Database [WWW Document]. National Civil Aviation Agency. 2020. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/dados-estatisticos/dados-estatisticos> (acesso em 7.30.20).

ANP. Renovabio - National Policy of Biofuels [WWW Document]. National Agency of Petroleum Natural Gas and Biofuels. 2018. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio>. Acesso em: 12 jun. 18.

ANP. Painéis dinâmicos do Renovabio, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-do-renovabio>.

ANP. Resolução nº 842, de 14 de maio de 2021 [WWW Document]. Estabelece a especificação do diesel verde, bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que o comercializem em território nacional. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-anp-n-842-de-14-de-maio-de-2021-320059616>. Acesso em: 6 mai. 2021.

ANTONIL, A. J. Cultura e Opulência do Brasil, Editora Itatiaia, Belo Horizonte. 1982.

ASTM. ASTM D7566-20 Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. West Conshohocken, Pennsylvania, USA. 2020.

ATHENAGRO. A evolução da área de pastagens no Brasil (com base no Censo e na Pesquisa Pecuária Municipal (IBGE, 2019) e Projeto MacBiomass). 2019. Disponível em: <http://www.rallydapecuaria.com.br/index.php/node/1366>.

ATSONIOS, K.; KOUGIOUMTZIS, M.; PANOPOULOS, K. D.; KAKARAS, E. Alternative thermochemical routes for aviation biofuels via alcohols synthesis: Process modeling, techno-economic assessment and comparison. *Applied Energy* 138, 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.056>. 2015.

BARBER, C. P.; COCHRANE, M. A.; SOUZA, C. M.; LAURANCE, W. F. Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. *Biological Conservation* 177, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.07.004>. 2014.

BIODIESELBR. Audiência pública da ANP expõem tensões no setor de biodiesel, 18 set. 2020a. 2020. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/regulacao/audiencia-publica-da-anp-expoem-tensoes-no-setor-de-biodiesel-180920>. Acesso em: 6 abr. 2021.

BIODIESELBR. Abiove considera “inaceitável” investida da Petrobras sobre mercado de biodiesel, 16 nov. 2020b. 2020. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/biocombustivel/cana/abiove-considera-inaceitavel-investida-da-petrobras-sobre-mercado-de-biodiesel-161120>. Acesso em: 6 mai. 2021.

BONOMI, A.; CAVALETT, O.; PEREIRA DA CUNHA, M.; LIMA, M. A. P. (Eds.). *Virtual Biorefinery*, 1st ed, Green Energy and Technology. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26045-7>. 2016.

BRANFORD, S.; TORRES, M. Brazilian Amazon oil palm deforestation under control, for now [WWW Document]. Mongabay Series: Amazon Agribusiness. 2018. Disponível em: <https://news.mongabay.com/2018/05/brazilian-amazon-oil-palm-deforestation-under-control-for-now/>. Acesso em: 9 jul. 2020.

CAAFI. Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative – Glossary. 2019. Disponível em: <http://www.caafi.org/resources/glossary.html#D>. Acesso em: 31 out. 2019.

CANTARELLA, H.; NASSAR, A. M.; CORTEZ, L. A. B.; BALDASSIN, R. Potential feedstock for renewable aviation fuel in Brazil. *Environmental Development* 15, 52–63. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.05.004>.

CAPAZ, R. S. Alternative aviation fuels in Brazil: Environmental performance and economic feasibility. Delft University of Technology. 2021.

CAPAZ, R. S.; GUIDA, E.; SEABRA, J. E. A., OSSEWEIJER, P.; POSADA, J. A. Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 15, 502–524. 2021a. <https://doi.org/10.1002/bbb.2168>

CAPAZ, R. S.; POSADA, J. A.; OSSEWEIJER, P.; SEABRA, J. E. A. The carbon footprint of alternative jet fuels produced in Brazil: exploring different approaches. *Resources, Conservation and Recycling* 166, 105260. 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105260>

CARDOSO, T. F. Avaliação Socioeconômica E Ambiental De Sistemas De Recolhimento E Uso Da Palha De Cana-De-Açúcar. University of Campinas. 2014.

CARDOSO, A.; LAVIOLA, B. G.; SANTOS, G. S.; DE SOUSA, H. U.; DE OLIVEIRA, H. B.; VERAS, L. C.; CIANNELLA, R.; FAVARO, S. P. Opportunities and challenges for sustainable production of *A. aculeata* through agroforestry systems. *Industrial Crops and Products* 107, 573–580. 2017 <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.023>

CARDOSO, T. F.; WATANABE, M. D. B.; SOUZA, A.; CHAGAS, M. F.; CAVALETT, O.; MORAIS, E. R.; NOGUEIRA, L. A. H.; LEAL, M. R. L. V.; BRAUNBECK, O. A.; CORTEZ, L. A. B.; BONOMI, A. Economic, environmental, and social impacts of different sugarcane production systems. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 12, 68–82. 2018. <https://doi.org/10.1002/bbb.1829>

COELHO, M. Personal Communication of a Brazilian Company of paper and cellulose. 2018.

COELHO, S. T.; MONTEIRO, M. B.; KARNIOL, M. R. Atlas da bioenergia no Brasil. São Paulo. 2012. Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/livro/atlas-de-biomassa>

COGEN. Associação das Indústrias de Cogeração de Energia. 2018. Disponível em: <https://www.cogen.com.br/>. Acesso em: 10 dez. 2018.

CORTEZ, L. A. B.; NIGRO, F. E. B.; NASSAR, A. M.; CANTARELLA, H.; NOGUEIRA, L. A. H.; MORAES, M. A. F. D.; LEAL, R. L. V.; FRANCO, T. T.; SCHUCHARDT, U. Roadmap for sustainable aviation biofuels for Brazil — A Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil. Edgard Blücher, São Paulo. 2014. <https://doi.org/10.5151/BlucherOA-Roadmap>

DE MEDEIROS, E. M.; POSADA, J. A.; NOORMAN, H.; OSSEWEIJER, P.; FILHO, R. M. Hydrous bioethanol production from sugarcane bagasse via energy self-sufficient gasification-fermentation hybrid route: Simulation and financial analysis. *Journal of Cleaner Production* 168, 1625–1635. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.165>

DEAN, W. A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira, Companhia das Letras, São Paulo. 1996.

DIÁRIO DO NORDESTE. Ceará está pronto para ter o seu HUB de Hidrogênio Verde. 23 de Fevereiro de 2021. 2021. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/opiniaocolumnistas/ricardo-mota/ceara-esta-pronto-para-ter-o-seu-hub-de-hidrogenio-verde-1.3051027>. Acesso em: 6 jul. 2021.

DINCER, I. Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 1954–1971. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>

EMBRAPA. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar. Embrapa Solos, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília. 2009

EMBRAPA. Zoneamento Agroecológico do Dendzeiro para as áreas desmatadas da Amazônia Legal. Embrapa Solos, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rio de Janeiro. 2010.

EPE. PDE 2030 – The Ten-Year Energy Expansion Plan 2030. Brasília. 2020a.

EPE. Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis (ano 2019), Ministério de Minas e Energia, Brasília. 2020b.

EPE. Combustíveis renováveis para uso em motores do ciclo Diesel. Rio de Janeiro. 2020c.

EPE. Balanço Energético Nacional 2021 (Dados de 2020), Ministério de Minas e Energia, Brasília. 2021.

ESTEVEZ, H. B. B. A produção da bioeletricidade a partir do bagaço de cana. Opiniões. 2021.

FAO. UWET Unified Wood Energy Terminology, Forestry Dept., Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome. 2003

FAO. FAOSTAT [WWW Document]. Food and Agriculture Organization. DISPONÍVEL EM: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> (acesso em 1.10.18). 2018

GRADIN, B.; Nogueira, L. A. H. Innovation in advanced energy: towards a mission-oriented agenda for second-generation ethanol in Brazil, in Reynolds, E., Schneider, B.R., Ezequiel Zylberberg, E. (eds), Innovation in Brazil: Advancing Development in the 21st Century, Routledge, London. 2019.

GRANBIO. BioFlex I Disponível em: <http://www.granbio.com.br/conteudos/bioflex-biocombustiveis/> (acesso em 5.27.21). 2021.

HANDLER, R. M.; SHONNARD, D. R.; GRIFFING, E. M.; LAI, A.; PALOU-RIVERA, I. Life Cycle Assessments of Ethanol Production via Gas Fermentation: Anticipated Greenhouse Gas Emissions for Cellulosic and Waste Gas Feedstocks. Industrial & Engineering Chemistry Research 55, 3253–3261. 2016 <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03215>.

IBA. Annual Report - Brazilian Tree Industry. 2019. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf Acesso em: 14 jul. 2020.

IBGE. Brazilian Institute of Geography and Statistics. Municipal Agricultural Production. 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em 22 ago. 2019.

ICAO. Resolutions 37th Assembly. 2010. Disponível em: http://www.icao.int/Meetings/AMC/Assembly37/Documents/ProvisionalEdition/a37_res_prov_en.pdf.

ICAO. CORSIA - Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels. Montreal. 2019a. <https://doi.org/10.18356/fc81178c-en>.

ICAO. Annual Report of the Council - 2018. Annual Reports of the Council. 2019b. Disponível em: <https://www.icao.int/publications/pages/annual-reports.aspx>. Acesso em: 8 jul. 2020.

IEA. Transport Biofuels -Analysis, Tracking Report, International Energy Agency. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/transport-biofuels/>

IEA. Energy Technology Perspectives 2020. Paris. 2021. <https://doi.org/10.1787/ab43a9a5-en>

IMO. Initial IMO GHG Strategy. 2021a. Disponível em: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx> (acesso em 5.28.21).

IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions. 2021b. Disponível em: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx> (acesso em 5.28.21).

IRENA. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition). International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2019.

KLEIN, B. C.; CHAGAS, M. F.; JUNQUEIRA, T. L.; REZENDE, M. C. A. F.; CARDOSO, T. F.; CAVALETT, O.; BONOMI, A. Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. *Applied Energy* 209, 290–305. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.079>

KLERK, A. Fischer–Tropsch fuels refinery design. *Energy & Environmental Science* 4, 1177. 2011. <https://doi.org/10.1039/c0ee00692k>

LA PICIRELLI DE SOUZA, L.; RAJABI HAMEDANI, S.; SILVA LORA, E. E.; ESCOBAR PALACIO, J. C.; COMODI, G.; VILLARINI, M.; COLANTONI, A. Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in Brazil towards 2050. *Energy Reports* 7, 2574–2587. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.026>

LANZATECH. World's First Commercial Waste Gas to Ethanol Plant Starts Up. 2018. Disponível em: <https://www.lanzatech.com/2018/06/08/worlds-first-commercial-waste-gas-ethanol-plant-starts/>. Acesso em: 31 jul. 2019.

LEAL, M. R. L. V.; HERNANDES, T. A. D. Bra/10/G31 SUCRE Sugarcane Renewable Electricity. Campinas. 2020.

LNBR. Projeto SUCRE - Sugarcane Renewable Electricity, Laboratório Nacional de Bioenergias, relatórios. 2021. Disponível em: <https://lnbr.cnpem.br/pt-br/sucres/>.

MACHADO, N. ANP aprova especificação para o diesel verde. epbr - Política Energética. 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/anp-aprova-especificacao-para-o-diesel-verde/> (acesso em 6.6.21).

MILESSI, T. S.; TABUCHI, S. C. T.; ESTEVES, T. D.; HIRATA, D. B.; CAPAZ, R.; MENDES, A. A. Biodiesel production in oil biorefinery and byproducts utilization, in: Chandel, A., Segato, F. (Eds.), Production of Top 12 Biochemicals Selected by USDOE from Renewable Resources. Elsevier, p. 462. 2021.

MME. Renovabio, Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Ministério de Minas e Energia. 2021. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/renovabio>

MOREIRA, M. M. R.; SEABRA, J. E. A.; LYND, L. R.; ARANTES, S. M.; CUNHA, M. P.; GUILHOTO, J. J. M. Socio-environmental and land-use impacts of double-cropped maize ethanol in Brazil, Nature Sustainability, 3. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0456-2>

MORENO, J.; DUFOUR, J. Life cycle assessment of hydrogen production from biomass gasification. Evaluation of different Spanish feedstocks. International Journal of Hydrogen Energy 38, 7616–7622. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.076>

MÜLLER-CASSERES, E.; CARVALHO, F.; NOGUEIRA, T.; FONTE, C.; IMPÉRIO, M.; POGGIO, M.; WEI, H. K.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Production of alternative marine fuels in Brazil: An integrated assessment perspective. Energy 219, 119444. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119444>

NASSAR, A. M.; HARFUCH, L.; MOREIRA, M. M. R.; BACHION, L. C.; ANTONIAZZI, L. B.; LIMA, R. C. A. Simulating Land Use and Agriculture Expansion in Brazil: Food, Energy, Agroindustrial and Environmental Impacts, BIOEN-FAPESP Program. 2011. Disponível em: <http://www.iconebrasil.org.br/arquivos/noticia/2256.pdf>.

NASTARI, P. RenovaBio, Plano Nacional de Biocombustíveis: Uma Visão Estratégica Integrada para Políticas de Energia, Meio Ambiente, Econômica e Industrial, Apresentação no Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília. 2018

NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; Cortez, L. A. B.; BRITO-CRUZ, C. H. Biofuels for transport, in Letcher, T.M. (editor). Future energy: improved, sustainable, clean options for our planet. 3rd ed. Elsevier, Oxford. 2020.

NOVACANA. Raízen irá investir em nova planta de etanol de segunda geração. 2021a. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/raizen-investir-nova-planta-etanol-segunda-geracao-250621>. Acesso em: 30 jun. 2021.

NOVACANA. Número de CBios emitidos em 2021 chega a 10 milhões; preço segue estável. 2021b. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/industria/usinas/numero-cbios-emitidos-2021-10-milhoes-preco-estavel-050521>. Acesso: 26 mai. 2021.

OU, X.; ZHANG, X. X.; ZHANG, Q.; ZHANG, X. X. Life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions of gas-to-liquid fuel pathway from steel mill off-gas in China by the LanzaTech process. *Frontiers in Energy* 7, 263–270. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11708-013-0263-9>

PEARLSON, M.; WOLLERSHEIM, C.; HILEMAN, J. A techno-economic review of hydroprocessed renewable esters and fatty acids for jet fuel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 7, 89–96. 2013. <https://doi.org/10.1002/bbb.1378>

PETROBRÁS. Diesel renovável traz mais qualidade, competição e sustentabilidade para o segmento de biocombustíveis no Brasil. *Fatos e Dados*. 2021. Disponível em: <https://bityli.com/yqt5e>. Acesso em: 5 jun, 2021.

PIRKER, J.; MOSNIER, A.; KRAXNER, F.; HAVLÍK, P.; OBERS-TEINER, M. What are the limits to oil palm expansion? *Global Environmental Change* 40, 73–81. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.007>

PLATH, M.; MOSER, C.; BAILIS, R.; BRANDT, P.; HIRSCH, H.; KLEIN, A.; WALMSLEY, D.; VON WEHRDEN, H. A novel bioenergy feedstock in Latin America? Cultivation potential of *Acrocomia aculeata* under current and future climate conditions. *Biomass and Bioenergy* 91, 186–195. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.04.009>

PORTUGAL-PEREIRA, J.; SORIA, R.; RATHMANN, R.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. *Biomass and Bioenergy* 81, 521–533. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.010>

RAÍZEN. Raízen webpage. 2021. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/>. Acesso em: 27 ma. 2021.

REN21. *Renewables 2020 - Global Status Report*. Paris. 2020

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; PEREIRA, J. P.; ROCHEDO, P. 2020. Prospects for Carbon-Neutral Maritime Fuel Production in Brazil. Rio de Janeiro. 2020.

RSPO. Reflecting on a decade of growth - Impact Report 2019. 2019.

SALKUYEH, Y. K.; SAVILLE, B. A.; MACLEAN, H. L. Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from different biomass gasification processes. *International Journal of Hydrogen Energy* 43, 9514–9528. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.024>

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. *Energy Policy* 39, 421–428. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.019>

SIGA. Sistema de Informações de Geração da ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília. 2021.

SOUZA, G. M.; VICTORIA, R. L.; JOLY, C. A.; VERDADE, L. M. Bio-energy & sustainability: bridging the gaps. Vol. 72. Scientific Committee of Problems of the Environment SCOPE. 2015. Disponível em: http://bioenfapesp.org/scopebioenergy/images/chapters/bioen-scope_chapter17.pdf

SOUZA, Z. J. As tendências da bioeletricidade. *Opiniões* 78. 2021.

SUSMOZAS, A.; IRIBARREN, D.; DUFOUR, J. Life-cycle performance of indirect biomass gasification as a green alternative to steam methane reforming for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* 38, 9961–9972. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.06.012>

TRINDADE, S. C.; NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M. Relevance of LACAf biofuels for global sustainability, *Biofuels*. 2019. doi: 10.1080/17597269.2019.1679566.

U.S.DRIVE. Hydrogen Production Tech Team Roadmap. Washington. 2017.

Unem. Produção de etanol de milho se firma no país e deve dobrar este ano, União Nacional do Etanol de Milho. 201. Disponível em: <http://www.etanoldemilho.com.br/2020/12/15/producao-de-etanol-de-milho-se-firma-no-pais-e-deve-dobrar-este-ano/>

UNICADATA. Histórico de Produção e Moagem, Associação Brasileira da Indústria da Cana-de-Açúcar. 201. Disponível em: <https://observatoriodacana.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php/>

VÁSQUEZ, M. C.; SILVA, E. E.; CASTILLO, E. F. Hydrotreatment of vegetable oils: A review of the technologies and its developments for jet biofuel production. *Biomass and Bioenergy* 105, 197–206. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.07.008>

WANG, W.; TAO, L. Bio-jet fuel conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, 801–822. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.016>

WATANABE, M. O potencial da palha na geração de energia, Projeto SUCRE, Laboratório Nacional de Biorenováveis. 2019. Apresentação Power Point.

WWF. Potential Sustainable Biofuel Production in Brazil – 2030, World Wide Fund For Nature, São Paulo. 2021.

ZHONG, L.; FENG, Y.; WANG, G.; WANG, Z.; BILAL, M.; LV, H., JIA, S., CUI, J. Production and use of immobilized lipases in/on nanomaterials: A review from the waste to biodiesel production. *International Journal of Biological Macromolecules* 152, 207–222. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.258>