

Bioenergia e bioquímicos de segunda geração de cana-de-açúcar

Combustíveis avançados de
baixo carbono para o
transporte e a indústria

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) edita publicações sobre diversas temáticas que impactam a agenda do Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (SNCTI).

As edições são alinhadas à missão institucional do Centro de subsidiar os processos de tomada de decisão em temas relacionados à ciência, tecnologia e inovação, por meio de estudos em prospecção e avaliação estratégica baseados em ampla articulação com especialistas e instituições do SNCTI.

As publicações trazem resultados de alguns dos principais trabalhos desenvolvidos pelo Centro, dentro de abordagens como produção de alimentos, formação de recursos humanos, sustentabilidade e energia. Todas estão disponíveis gratuitamente para *download*.

A instituição também produz, semestralmente, a revista Parcerias Estratégicas, que apresenta contribuições de atores do SNCTI para o fortalecimento da área no País.

Você está recebendo uma dessas publicações, mas pode ter acesso a todo o acervo do Centro pelo nosso site: <http://www.cgee.org.br>.

Boa leitura!

Bioenergia e bioquímicos de segunda geração de cana-de-açúcar

Combustíveis avançados de baixo carbono para o transporte e a indústria

Resumo executivo



Brasília – DF
2017

Presidente em exercício

Marcio de Miranda Santos

Diretores

Antonio Carlos Filgueira Galvão

Gerson Gomes

Edição/*Maisa Cardoso*

Diagramação/*César Felipe Daher*

Projeto gráfico/*Núcleo de design gráfico do CGEE*

Catálogo na fonte

C389b

Bioenergia e bioquímicos de segunda geração de cana-de-açúcar; combustíveis avançados de baixo carbono para o transporte e a indústria. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2017. (Resumo executivo).

36 p.; il, 29,7 cm

ISBN 978-85-5569-140-9 (eletrônico)

1. Bioetanol. 2. Bioenergia. 3. Bioeconomia. 4. Indústria - Biotecnologia. 5. Brasil. I. CGEE. II. Title.

CDU 620.925:664.111(81)

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), SCS Qd. 9, Torre C, 4º andar, Ed. Parque Cidade Corporate, CEP: 70308-200 - Brasília, DF, Telefone: (61) 3424.9600, www.cgee.org.br

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos nesta publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que citada a fonte.

Referência bibliográfica:

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. Bioenergia e bioquímicos de segunda geração de cana-de-açúcar; combustíveis avançados de baixo carbono para o transporte e a indústria. Brasília, DF: 2017. 36 p.

Esta publicação é parte integrante das atividades desenvolvidas pelo CGEE no âmbito do 2º Contrato de Gestão firmado com o MCTIC.

Bioenergia e bioquímicos de segunda geração de cana-de-açúcar

Combustíveis avançados de baixo carbono para o transporte e a indústria

Supervisão

Antonio Carlos Filgueira Galvão

Consultores

Marcelo Khaled Poppe

Equipe técnica do CGEE

Bárbara Bressan Rocha

Laurent Durieux

Consultores

Luiz Augusto Horta Nogueira

Isaias de Carvalho Macedo

Os textos apresentados nesta publicação são de responsabilidade dos autores.

Sumário

1. Apresentação	7
2. A necessidade de combustíveis avançados de baixa emissão de carbono para o transporte e a indústria	11
3. A busca por biotecnologias avançadas de baixo carbono	13
3.1. Processos e produtos inovadores de uma agroindústria tradicional	13
3.2. Cana-energia: um salto na produtividade energética	15
4. Oportunidade para iniciativas público-privadas	17
5. Principais resultados	21
5.1. Cenários de produção	22
5.2. Cenários de consumo de etanol	23
5.3. Resultados essenciais	24
5.3. Viabilidade e perspectivas	25
6. Recomendações	27
5.1. Medidas de incentivo tecnológico	28
5.2. Medidas de incremento da demanda	29
7. Observações finais	31
Referências	33
Lista de gráficos	35
Lista de tabelas	35

Bioenergia e bioquímicos de segunda geração de cana-de-açúcar

Combustíveis avançados de baixo carbono para o transporte e a indústria

Resumo executivo

1. Apresentação

Este resumo executivo refere-se ao estudo conduzido pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) no âmbito do projeto *Agenda Positiva da Mudança do Clima e do Desenvolvimento Sustentável*. O presente trabalho mostra uma importante contribuição brasileira para o aproveitamento das oportunidades advindas de uma economia de baixo carbono. O citado estudo teve como finalidade dar maior visibilidade a iniciativas brasileiras e ao seu impacto no desenvolvimento de uma alternativa energética sustentável e replicável, com potencial de contribuir significativamente para a transição de uma economia com base fóssil para uma bioeconomia moderna. Nas análises que fizeram parte desse processo, foram exploradas as vantagens e implicações das sinergias existentes entre mitigação, adaptação e desenvolvimento sustentável, promovidas ao longo do ciclo de vida da bioenergia de segunda geração da cana-de-açúcar, com identificação dos desafios e das possíveis soluções para acelerar o desenvolvimento e a difusão de tecnologias que proporcionam baixa emissão de carbono. Entre os resultados do estudo, são apresentadas recomendações para a formulação de estratégias e medidas direcionadas a promover a inovação orientada para acelerar o desenvolvimento e a difusão de tecnologias de combustíveis e insumos industriais, com baixo teor de carbono, para o transporte e a indústria, no sentido da implementação do Acordo de Paris.

A versão mais abrangente do estudo foi publicada pelo CGEE, em língua inglesa, no livro *Second-generation sugarcane bioenergy & biochemicals: Advanced low-carbon fuels for transport and industry* (CGEE, 2017). A publicação foi lançada pelo Centro durante a programação da COP 23, em novembro de 2017, em Bonn, na Alemanha.

Ainda no que se refere ao presente resumo executivo, seu conteúdo destaca como a introdução de novas tecnologias avançadas de baixo carbono - com a adição de açúcares convertidos a partir de materiais celulósicos - e o desenvolvimento de variedades de cana de alta biomassa abrirem um novo caminho agroindustrial. A perspectiva de melhorar o rendimento potencial de bioetanol para quase 25 mil litros por hectare (ha) é real (atualmente, esse resultado é de 7 mil).

Considerando um consumo global projetado de gasolina de 1,7 trilhão de litros em 2025, o bioetanol à base de cana-energia poderia substituir 10% da gasolina total consumida no mundo, usando menos de 10 milhões de hectares (Mha) de terra. Além disso, o mundo experimentaria rapidamente uma redução expressiva de emissões de dióxido de carbono (CO₂) no setor de transporte, que é responsável por um quarto do total dessas emissões.

O tripé bioetanol de segunda geração (E2G), cana de alta biomassa (cana-energia) e química renovável (verde) está sendo implementado no Brasil por meio de uma consistente parceria público-privada. Uma das iniciativas mais bem-sucedidas, o PAISS¹, financiou várias atividades de inovação envolvendo empresas bem estabelecidas e iniciantes, bem como importantes instituições de ciência e tecnologia. O CGEE, juntamente com seus associados, tem explorado, analisado e prospectado os impactos relacionados ao desempenho e aos custos da tecnologia agroindustrial, aos ganhos de uso da terra e à redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) desses empreendimentos. O objetivo é prover uma visão consistente dos benefícios de tais iniciativas, sejam estas em nível nacional ou global, fornecendo fundamentos confiáveis para a transição de uma economia baseada em recursos fósseis para uma bioeconomia moderna.

Por conseguinte, durante a 20ª Conferência das Partes (COP 20) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), em dezembro de 2014, foi lançada a Agenda de Ação Lima-Paris [em Inglês, *Lima Paris Action Agenda* (LPAA)], com o objetivo de que fosse demonstrado na COP 21 o envolvimento de países e empresas no desenvolvimento de tecnologias avançadas com baixas emissões de carbono, por meio de parcerias público-privadas. Com sucesso, as presidências peruana e francesa das COP 20 e 21 realizaram, durante todo o ano de 2015, um notório esforço diplomático conjunto, visando ao Acordo de Paris. As representações desses países enfatizaram a importância do aumento dos investimentos em soluções de baixo teor de carbono e de fortalecimento da cooperação internacional.

Empenhados em identificar as oportunidades decorrentes da economia de baixo carbono e em explorar agendas positivas de mudanças climáticas que contemplam inovações focadas no desenvolvimento sustentável, o CGEE, bem como o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) e a Associação Brasileira de Biotecnologia Industrial (ABBI) realizaram estudos sobre o papel que as tecnologias avançadas devem desempenhar na cadeia agroindustrial de biocombustíveis. Com o apoio desses estudos, o CGEE propôs ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), ao Ministério de Relações Exteriores (MRE ou Itamaraty) e à presidência francesa da COP 21 uma apresentação sobre a contribuição singular brasileira para a viabilidade do

¹ Plano conjunto entre o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) de Apoio à Inovação Tecnológica e Industrial dos Setores Sucreenergético e Sucrequímico.

etanol celulósico de segunda geração em escala industrial, exposição esta que seria apresentada na COP 21, em Paris.

As negociações diplomáticas realizadas pelo Itamaraty culminaram em um convite ao BNDES para expor, no Dia da Ação e no Dia da Energia, na programação da COP 21, a excepcional contribuição brasileira para a redução das emissões de GEE no setor de transporte, segmento este até então sem opções concretas para diminuir sua dependência dos combustíveis fósseis. A referida contribuição consistiu no estabelecimento de parcerias público-privadas que resultaram na instalação, no Brasil, de duas unidades industriais pioneiras na produção E2G. Durante as exposições, foi lançada a ideia de criação de uma Aliança Global sobre este tema.

Em 2016, foi formada uma força-tarefa, liderada pelo MRE, com integrantes do BNDES, do CGEE, da empresa GranBio² / ABBi e da Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento [em Inglês, *United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD)*], para elaborar a proposta da citada Aliança. Uma vez formatada e negociada essa iniciativa com as presidências francesa da COP 21 e marroquina da COP 22, o Itamaraty mobilizou o interesse de outros 19 países para lançar a Aliança, chamada Plataforma para o Biofuturo, durante a COP 22, em Marrakesh, no Marrocos (considerada a COP da ação, ou seja, do início da implementação do Acordo de Paris).

A Plataforma para o Biofuturo inclui nações centrais para a expansão dos biocombustíveis e para o desenvolvimento de novas biotecnologias, como Estados Unidos, Canadá, China, Índia, Itália, França e Reino Unido. O conjunto de fundadores compreende, além do Brasil e dos países mencionados, também Argentina, Dinamarca, Egito, Filipinas, Finlândia, Holanda, Indonésia, Marrocos, Moçambique, Paraguai, Suécia e Uruguai. A iniciativa é apoiada por organizações intergovernamentais, como: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO); Agência Internacional de Energia (AIE) [em Inglês, *International Energy Agency (IEA)*]; Agência Internacional de Energia Renovável [em Inglês, *International Renewable Energy Agency (Irena)*]; Energia Sustentável para Todos [*Sustainable Energy for All (SE4ALL)*]; UNCTAD; e Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (Onudi) [em Inglês, *United Nations Industrial Development Organization (Unido)*]. Tem apoio, ainda, de organizações privadas da sociedade civil, a exemplo da ABBi; da below50³; do CGEE; do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável [em Inglês, *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*]; e do Conselho Mundial de Biotecnologia Industrial [em Inglês, *World Council on Industrial Biotechnology (WCIB)*].

Durante esse período, o CGEE também contribuiu com a iniciativa Combustíveis de Baixo Carbono para Transporte [em Inglês, *Low-carbon Transport Fuels (LCTF)*] do WBCSD, que levou ao lançamento, em 2016, da ação global below50, uma colaboração global que tem como objetivo impulsionar o desenvolvimento do mercado global e nacional de combustíveis sustentáveis. O projeto busca criar demanda para combustíveis que, como o etanol e o biodiesel, emitam 50% menos CO₂ que os combustíveis tradicionais.

2 A GranBio é uma empresa brasileira de biotecnologia industrial que cria soluções para transformar biomassa em bioenergia, mais precisamente focada em biocombustível e bioquímicos. Fonte: <<http://www.granbio.com.br/site/conteudos/conheca-a-granbio/>>. Acessado em: 10 nov. 2017.

3 Leia mais sobre o below50 em: <<http://cebds.org/projetos/below50/#.Wmlg3K6nGUK>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

Ainda em conexão com a COP 22, o CGEE organizou, em outubro de 2016, em Brasília, mas de modo integrado ao programa da Conferência, o Seminário franco-brasileiro *Contribuição da bioenergia e dos bioprodutos para a implementação do Acordo de Paris - o potencial da biomassa celulósica para o desenvolvimento da bioeconomia*. O evento foi promovido em parceria com a Embaixada de França, a Agência Francesa de Desenvolvimento (AFD), o BNDES, a ABBI e o Polo Francês de Competitividade Indústria e Agro-Recursos (IAR). O Centro também realizou um evento paralelo à programação da COP 22, em novembro de 2016, no Pavilhão Brasileiro instalado nas dependências da Conferência, no Marrocos, com a participação de alguns dos principais parceiros do Centro, como a ABBI, a Agroicone⁴, o BNDES e o Itamaraty.

Vale ressaltar que, para atender aos objetivos de redução de emissões anunciados pelo Brasil nas Contribuições Nacionalmente Determinadas [em Inglês, *National Determined Contributions* (NDC)] - 37% abaixo dos níveis de 2005, até 2025, e, posteriormente, 43%, até 2030, para a economia como um todo -, serão providenciadas medidas para: "aumentar a participação da bioenergia sustentável na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030, expandir o consumo de biocombustíveis, aumentar o suprimento de etanol, inclusive aumentando a participação de biocombustíveis avançados (segunda geração), e aumentando a participação do biodiesel na mistura diesel", entre outras. Além disso, o Ministério das Minas e Energia (MME) conduz o Programa RenovaBio, com o objetivo de expandir a produção interna e o uso de biocombustíveis, e o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) lidera o Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação para o desenvolvimento da Bioeconomia.

⁴ Leia mais sobre a Agroicone em: <<http://www.agroicone.com.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

2. A necessidade de combustíveis avançados de baixa emissão de carbono para o transporte e a indústria

O desenvolvimento da sociedade moderna e a conquista de um padrão de vida confortável em termos de acesso a serviços e bens de consumo para grande parte da população do planeta dependem essencialmente de um amplo acesso à energia, predominantemente de fontes de energia fóssil. No entanto, a produção e o uso de energia são atualmente reconhecidos como fontes de sérios problemas ambientais, incluindo mudanças climáticas, com grande impacto em nosso planeta e nossa vida.

A consciência progressiva da dimensão desse problema e a proposição e implementação de medidas apropriadas para enfrentar adequadamente essa situação trazem desafios significativos, dentre os quais, a transição necessária para sistemas de energia mais sustentáveis e em escala global. Na verdade, é uma tarefa complexa transformar matrizes nacionais de energia tradicionalmente baseadas em petróleo, carvão e gás natural - fontes primárias com altas emissões de GEE - em novos esquemas de suprimento com base em fontes de energia renováveis, socialmente aceitáveis e ambientalmente corretas. Embora exista um potencial natural suficiente, a construção de novas infraestruturas de energia requer altos investimentos e períodos de maturação relativamente longos, característicos dos sistemas energéticos. Essa transição energética é ainda mais aguda e complexa no setor de transportes, onde as tecnologias de veículos impõem, com poucas exceções, o uso de combustíveis líquidos, devido às suas vantagens logísticas e pronta disponibilidade para uso final. Tornando essa situação ainda mais difícil, a expansão global da frota de veículos e a conseqüente necessidade de energia formam uma tendência clara, principalmente nos países em desenvolvimento.

Para o Conselho Mundial da Energia, a frota mundial de veículos leves, cerca de 773 milhões de veículos registrados em 2012, crescerá fortemente e alcançará, em 2050, um total de 1.750 milhões de veículos em um cenário conservador e, regulamentado ou mesmo além, de 2.080 milhões de veículos, em um mercado mais liberal e favorável para carros individuais (WEC, 2011). É claro que a demanda de combustível crescerá proporcionalmente, basicamente para suprir motores de combustão interna, cenário que deve permanecer nas próximas décadas como principal referência no setor de transporte, antes de, progressivamente, haver substituição por outras tecnologias. A AIE prevê que, por volta do ano de 2050, veículos movidos por eletricidade e hidrogênio representarão menos de 20% da demanda de energia no setor de transporte (FULTON *et al.*, 2015).

Assim, embora seja notável o aumento do uso de tecnologias de energia renovável na produção de eletricidade - com a implantação de sistemas hidrelétricos modernos e uma grande expansão da energia eólica e solar, permitindo atender a uma crescente participação das demandas por energia dos setores industrial, comercial e residencial -, o transporte de pessoas e bens permanece, por todos os modos e em grande parte, dependente de combustíveis à base de petróleo, que são responsáveis

por uma fatia considerável das atuais emissões antrópicas de GEE. No entanto, já existe uma opção para abastecer as necessidades de energia relacionadas ao transporte e reduzir substancialmente as emissões de carbono: os biocombustíveis líquidos modernos, como o etanol e o biodiesel, estão ocupando uma participação crescente no atendimento da demanda de energia no transporte e, em dezenas de países, seu uso já é obrigatório, geralmente combinado com combustíveis convencionais derivados do petróleo. Atualmente, a AIE estima que cerca de 3% do consumo mundial de energia no setor de transportes é atendido por biocombustíveis, correspondendo a uma produção anual de quase 100 bilhões de litros de etanol, com expectativas de que este volume dobre até o ano de 2030, aumentando para 5% do consumo do setor.

Portanto, faz-se necessário destacar que, como resposta aos riscos gerados pelas mudanças climáticas, a expansão da produção e do uso de biocombustíveis deve ser acelerada. De acordo com os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [em Inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*] (IPCC, 2011), para limitar o aumento da temperatura média global a 2°C, considerando os cenários mais prováveis da demanda de energia e o portfólio de alternativas de tecnologia de energia disponíveis, a produção e uso de biocombustíveis deveria chegar a cerca de 11% do mercado de energia no setor de transportes, exigindo uma produção anual de cerca de 400 bilhões de litros de etanol.

3. A busca por biotecnologias avançadas de baixo carbono

Nesse contexto, a adoção de inovações por parte do agronegócio sucroalcooleiro pode oferecer uma alternativa competitiva e sustentável, reforçando as vantagens comparativas já apresentadas pela produção convencional de etanol a partir da cana-de-açúcar, em particular, aquelas que dizem respeito à sua competitividade econômica e sua alta capacidade de mitigação de emissões de GEE. Tais inovações envolvem tanto a introdução de variedades de cana-de-açúcar de alto rendimento (cana-energia) quanto o uso de processos industriais capazes de produzir etanol combustível a partir de materiais lignocelulósicos e bioprodutos avançados (como plásticos biodegradáveis e intermediários químicos). Essas tecnologias disruptivas são capazes de melhorar a produtividade agroindustrial e a sustentabilidade em um sentido amplo, reduzindo os impactos ambientais e permitindo uma melhor competitividade econômica, reforçando os indicadores positivos de uma agroindústria já eficiente e produtiva. Vale ressaltar que, apesar de representar melhorias relevantes, essas inovações têm sido introduzidas progressivamente, como complemento sinérgico ao atual ambiente produtivo da agroindústria convencional de cana-de-açúcar, aproveitando, dessa forma, as plantas e a infraestrutura existentes, reduzindo custos e impactos ambientais.

3.1. Processos e produtos inovadores de uma agroindústria tradicional

Durante as últimas décadas, além do tradicional açúcar e dos derivados da sacarose, a agroindústria da cana-de-açúcar desenvolveu vários processos e produtos, como bioenergia (biocombustíveis e bioeletricidade), compostos químicos e plásticos, em alguns casos, disponibilizando-os no mercado com sucesso. Um grande leque de possibilidades foi aberto por técnicas avançadas de biotecnologia, permitindo a produção de biomateriais especializados para alimentação humana e animal, além de aplicações industriais diversas.

Entre essa diversidade, os biocombustíveis convencionais e de segunda geração correspondem aos mais importantes produtos em termos de consumo potencial de matéria-prima. Entretanto, embora os biocombustíveis de segunda geração representem um avanço para o desenvolvimento da bioenergia, os processos bioquímicos e termoquímicos inovadores têm levado mais tempo, que o estimado há 15 anos, para alcançar o amadurecimento tecnológico.

Na primeira metade da última década, grandes investimentos (públicos e privados), nos Estados Unidos (EUA) e na Europa, motivaram a implementação de muitos projetos. Uma parcela destes encontra-se, na atualidade, em fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e outra foi descontinuada. Há, ainda, aqueles cujas plantas de demonstração estão em fase inicial, além dos que evoluíram para plantas em escala comercial inicial. Até hoje, essas atividades são motivadas

principalmente por políticas governamentais (mandatos e incentivos). Assim, as iniciativas brasileiras de unidades comerciais de produção de etanol celulósico podem ser consideradas oportunas e em linha com esforços semelhantes. E, apesar do referido atraso em relação às expectativas iniciais, observam-se progressos significativos, com reduções de custos, ganhos de rendimento e aumento da competitividade econômica em relação a outras aplicações da matéria-prima lignocelulósica.

Uma análise abrangente apresentada pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis [em Inglês, *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*] dos EUA, em 2013, sobre os objetivos e as realizações em termos de desenvolvimento do E2G naquele país, resultou na construção de uma planta conceitual "padrão", que processa milho para produzir 2 mil toneladas de etanol por dia, adotando o processo Hidrólise Simultânea e Co-fermentação [em Inglês, *Simultaneous Hydrolysis and Co-fermentation (SSCF)*] de açúcares C5 e C6. Acompanhando os progressos (projetados principalmente a partir de resultados em escalas laboratorial e piloto) de 2000 a 2012, o Laboratório chegou a resultados muito interessantes, confirmando avanços em termos de viabilidade (NREL, 2013):

- Custo de produção (projetado): US\$ 2,42 por litro (2001) para US\$ 0,57 por litro (2012);
- Melhorias tecnológicas alcançadas nas cinco etapas do processo: suprimento de biomassa, logística de matérias-primas, pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação;
- Todos os estágios de processamento de biomassa foram validados em escala piloto [1 tonelada por dia (t/dia) contínua e 8 metros cúbicos (m³) para fermentação em batelada].

Na atualidade, muitas plantas de demonstração, e algumas em escala comercial, estão sendo construídas. Em alguns casos, saltar etapas no desenvolvimento parece ter conduzido a problemas. Muitos projetos foram descontinuados, encontram-se em situação de risco ou estão incompletos (BCG, 2014). Algumas plantas estão ainda no início da sua operação em escala comercial: nos EUA (Abengoa, DuPont, Poet-DSM); na Europa (M&G); na China (Shandong); e no Brasil (GranBio, Raizen, CTC) (BNDES, 2015a).

A parceria público-privada (PPP) promovida pelo BNDES e pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), por meio do PAISS, comentada anteriormente, melhorou substantivamente o desenvolvimento da tecnologia E2G no Brasil. Como resultado dessa colaboração, duas plantas comerciais e uma planta de demonstração produzem etanol celulósico no País. Foram feitos grandes progressos relacionados a custos e desempenho e, desse modo, estima-se que, no devido tempo de desenvolvimento necessário, os processos E2G alcancem sucesso em fornecer grandes volumes de etanol para o mercado.

Uma vantagem importante desses novos processos é a maior eficiência na conversão da energia solar armazenada na cana-de-açúcar em formas úteis de energia, o que pode levar a mudanças importantes nessa agroindústria. Nesse contexto, a eficiência energética pode ser assumida como a relação entre a produção total de energia comercial (incluindo etanol, eletricidade e outros biocombustíveis) e a entrada de energia (energia disponível na cana inteira: sacarose e outros açúcares redutores, bagaço e 40% das folhas e palha). Esses processos são representados no Gráfico 1, com base nos desempenhos esperados e considerando uma usina de referência no Brasil (SEABRA e MACEDO, 2011).

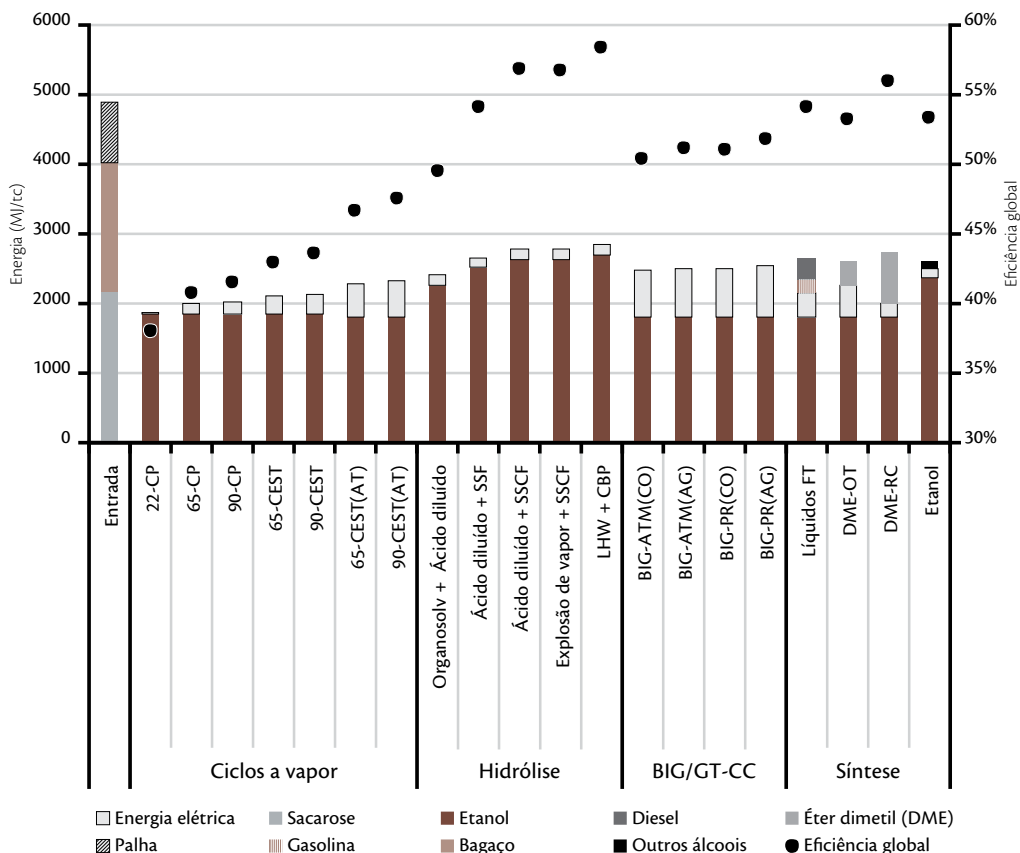


Gráfico 1 – Entrada de energia da cana-de-açúcar, repartição por etapas do processo industrial e saída de energia (em colunas, eixo esquerdo); e eficiência energética global (em pontos, eixo direito) para várias rotas de processamento lignocelulósico em usinas de açúcar

Fonte: SEABRA; MACEDO, 2011.

Para definir a rota de processamento mais interessante para um determinado contexto, além da eficiência energética, devem ser considerados aspectos como o custo e o valor da energia comercial (local), as políticas locais, as emissões resultantes e, claro, a disponibilidade tecnológica. Os mecanismos de financiamento são uma questão importante e podem ser diferentes em cada caso, como no cenário brasileiro atual. Nos últimos anos, quase todas as novas usinas de açúcar no Brasil optaram por caldeiras de alta pressão e turbo-geradores com alguma capacidade de condensação, para permitir mais produção de eletricidade e usar o bagaço de forma eficiente. Os usos de materiais lignocelulósicos, tanto para biocombustíveis líquidos como para produção de eletricidade, podem ser desenvolvidos sinergicamente, permitindo benefícios energéticos como um todo.

3.2. Cana-energia: um salto na produtividade energética

Durante séculos, a cultura da cana-de-açúcar requereu alto teor de sacarose e baixo de fibra no talo da cana, para aumentar a produção de açúcar e facilitar a operação de moagem. Esse paradigma usual impôs-se às variedades híbridas comerciais *Saccharum officinarum*, reduzindo o vigor e limitando a produtividade de espécies ancestrais açucaradas e de baixa fibra.

A produtividade potencial da cana-de-açúcar no campo é estimada em cerca de 400 toneladas de biomassa fresca por hectare (ha) ao ano, em condições ideais (SOUZA *et al.*, 2013), enquanto a produtividade média comercial mundial é inferior a 25% desse valor. Na verdade, apesar do aumento significativo da produtividade e diversificação das variedades observadas nas últimas décadas, o potencial genético da cana ainda permite ganhos significativos adicionais, com implicações claras para o desempenho geral da agroindústria e excelentes perspectivas para o processamento de matérias-primas lignocelulósicas.

Uma revisão pioneira do paradigma usual focado no açúcar foi recomendada por A. G. Alexander, durante a década de 1980, em Porto Rico, indicando que o conteúdo em fibra deveria ser reavaliado, com ganhos globais de produtividade e desempenho. Em sua proposta, visando à recuperação da indústria de cana-de-açúcar porto-riquenha, economicamente deprimida naquela época, o grupo de Alexander sempre enfatizou a possibilidade de usar toda a planta: o suco, a fibra e também o topo e as folhas, das cultivares mais produtivas (MATSUOKA *et al.*, 2014).

As novas variedades de cana-de-açúcar, com aproveitamento ótimo de todos os produtos energéticos da planta, são chamadas de cana-energia. Correspondem essencialmente a espécies com menor teor de sacarose e maior teor de fibra que as variedades de cana-de-açúcar usuais e, o mais importante, apresentam maiores rendimentos em tonelada de material vegetal por hectare. Resultam da hibridação da cana-de-açúcar comercial com espécies selvagens de *Saccharum officinarum* e *Saccharum spontaneum* (ver Foto 1). Estima-se que, entre 2010 e 2030, as cultivares de cana-energia possam aumentar significativamente a produtividade energética anual, que pode passar de 628 gigajoule por hectare (GJ/ha) para mais de 1.200 GJ/ha (LANDELL *et al.*, 2010).

A difusão de variedades comerciais de cana energética encontra-se em vigor, embora o processamento dessa matéria-prima altamente fibrosa imponha o desenvolvimento de novos métodos de colheita, preparação e extração. A mesma situação desafiadora é observada na coleta e no uso de palha de cana-de-açúcar, associados à colheita verde, exigindo novos equipamentos e novas tecnologias. Vale lembrar que o interesse na cana-energia também está associado aos processos inovadores capazes de converter celulose em produtos valiosos, como apresentado no tópico anterior.



Foto 1 – Sistema de raiz da cana-energia (à esquerda) em comparação com a da cana-de-açúcar de tipo comercial (à direita)

Fonte: MATSUOKA *et al.*, 2014.

4. Oportunidade para iniciativas público-privadas

É de conhecimento público que a disponibilidade de recursos naturais e de tecnologia agroindustrial, além da demanda potencial por energia, não são elementos suficientemente impulsionadores de investimentos em produção avançada de biocombustíveis. Há de se considerar o risco inerentemente associado a novos processos de produção e incertezas do mercado. De fato, o papel do governo é decisivo para apoiar empreendimentos adequadamente inovadores em bioenergia e bioprodutos, garantindo condições de mercado atraentes e reduzindo os impactos de incertezas, especialmente durante o ciclo de inovação, após o estágio de bancada e antes da consolidação da produção comercial. Como pode ser observado em muitos casos, na implementação de uma nova tecnologia de bioenergia, após as etapas iniciais em pesquisa e planta piloto, passar para uma unidade de demonstração e seguir a primeira planta comercial trazem consideráveis desafios e riscos, em geral, requerendo suporte externo. Esse apoio exterior pode ser dado por meio do favorecimento da produção, pelo lado da oferta, bem como assegurando a demanda pelos novos produtos, pelo lado do consumo.

Tendo em vista esses conceitos, visando basicamente a fomentar a inovação, pelo lado da produção, e a estimular parcerias público-privadas, o Plano Conjunto BNDES-Finep de Apoio à Inovação Tecnológica e Industrial nos Setores Sucroenergético e Sucroquímico (PAISS), apresentado em 2011, se mostrou uma iniciativa decisiva para a superação de obstáculos iniciais e o avanço na curva de aprendizado. A principal motivação para o Plano foi a conscientização, por parte dessas duas instituições, sobre o grande atraso da agroindústria nacional de cana-de-açúcar na implementação de tecnologias avançadas de bioenergia, em comparação com outros países, apesar da existência, no Brasil, de uma produção madura e competitiva de biocombustíveis, de fornecedores de equipamentos e de instituições de pesquisa ativas em bioenergia. Até o lançamento dessa iniciativa, poucos e pequenos projetos de processos de segunda geração foram implantados no País.

O PAISS foi implementado em duas rodadas: a primeira, orientada essencialmente para processos industriais (PAISS Industrial, lançado em 2011) e a segunda, mais focada na agricultura (PAISS Agrícola, lançado em 2014). A iniciativa foi elaborada com os objetivos de selecionar planos de negócios e promover projetos que incluíssem o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias inovadoras direcionadas à produção e ao processamento de cana-de-açúcar para bioenergia e bioprodutos. O Plano também estabeleceu a análise do potencial e da relevância das propostas como critério para a obtenção de financiamento, além de orientar melhorias na coordenação de ações de desenvolvimento e na integração de instrumentos de suporte disponíveis. Suas diretrizes estimularam projetos conjuntos entre a indústria e as instituições de pesquisa e apontaram uma lista de prioridades, abrangendo: a) etanol de segunda geração; b) novos produtos da cana-de-açúcar e gaseificação de subprodutos lignocelulósicos, no PAISS Industrial; e c) novas variedades de cana-

de-açúcar (para novos ambientes de produção de cana-energia); d) máquinas agrícolas adequadas; e) gerenciamento de sistemas integrados; f) planejamento e controle da produção de cana-de-açúcar; g) técnicas de plantio e adaptação de sistemas para culturas energéticas, no PAISS Agrícola.

Os instrumentos financeiros oferecidos pelo PAISS incluíram: a) crédito em linhas de financiamento especiais; b) participação acionária; c) fundos não reembolsáveis para projetos cooperativos entre empresas e instituições de ciência e tecnologia (ICT) e d) apoio econômico não reembolsável (subvenções) para empresas, definido, dependendo do caso (valor, risco tecnológico, instituições envolvidas, etc.). Após a chamada de propostas e uma sequência de etapas para selecionar os projetos que mereciam financiamento, o PAISS Industrial concedeu cerca de US\$ 625⁵ milhões em linhas de financiamento, alavancando investimentos de US\$ 1,7 bilhão para implantação entre 2011 e 2014 (BNDES, 2011), enquanto o PAISS Agrícola ofereceu US\$ 630 milhões para o período 2014-2018 (BNDES, 2015).

Os projetos do PAISS Industrial contemplaram quatro plantas de etanol 2G (ver Tabela 1), cuja capacidade instalada total atinge 188 milhões de litros por ano, sendo três dessas plantas já inauguradas - GranBio em São Miguel dos Campos (AL) (Foto 2), Raízen e CTC em Piracicaba (SP). Como de costume em processos inovadores, essas plantas estão enfrentando dificuldades e melhorando progressivamente seu funcionamento. Embora as preocupações iniciais tenham sido a estabilidade e o desempenho do processo central - a hidrólise da matéria-prima lignocelulósica -, essa etapa apresentou resultados satisfatórios. Os maiores problemas se concentram na logística de matéria-prima e no pré-tratamento. Particularmente, este último tem sido uma operação desafiadora, devido ao seu custo e efeito direto sobre o tempo e o rendimento subsequentes da hidrólise. Entretanto, mesmo considerando a complexidade dessas questões, espera-se que esses problemas de engenharia sejam progressivamente resolvidos.

Tabela 1 – Plantas de etanol 2G no Brasil

Empresa	Local	Escala	Capacidade (Litros/ano)	Situação atual
GranBio	São Miguel dos Campos, AL	Comercial	80 milhões	Operando
Raízen	Piracicaba, SP	Comercial	40 milhões	Operando
Abengoa	Pirassununga, SP	Comercial	65 milhões	Interrompida
CTC	São Manoel, SP	Demonstração	3 milhões	Operando

Fonte: Milanez, 2015 e Finguerut, 2014.

⁵ Montantes convertidos a partir de valores originais em moeda brasileira, utilizando a taxa de câmbio média anual em 2015 (2,35 BRL = 1,00 USD).



Imagem: Marcus Carmo

Foto 2 – Planta da GranBio em São Miguel dos Campos (AL).

Imagem: Marcus Carmo. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bioflex1.JPG>>.

O resultado positivo do programa PAISS reflete as condições favoráveis existentes no Brasil e em outros países similares para: a) hospedar investimentos direcionados a novas tecnologias voltadas à conversão da biomassa, desde aquelas desenvolvidas em centros de P&D, até instalações de demonstração; e b) favorecer grandes investimentos destinados a plantas comerciais derivadas de novas tecnologias que foram desenvolvidas globalmente. Os principais impulsionadores para essa atratividade são apresentados da seguinte forma (MILANEZ *et al.*, 2012):

- Disponibilidade imediata e a baixo custo de matérias-primas, principalmente bagaço e palha de cana-de-açúcar;
- Processos desenvolvidos localmente e com tecnologia dedicada, devido à complexidade específica das matérias-primas domésticas;
- Grande quantidade de terras disponíveis, geralmente com pastagens de baixa produtividade, que podem ser convertidas em culturas agrícolas para fins energéticos ou químicos;
- Agroindústria bem estabelecida, de açúcar, etanol e bioeletricidade, o que facilita a adoção de novas tecnologias, com baixo investimento e com custos operacionais reduzidos;
- Crescimento do mercado de combustíveis e forte dependência de importações de produtos químicos, o que cria uma excelente oportunidade para o investimento interno;
- Aumento de oportunidades para o desenvolvimento de um comércio global de bio-combustíveis e biomateriais, considerando a menor pegada de carbono dos produtos derivados da cana-de-açúcar.

5. Principais resultados

No presente estudo, foi desenvolvida uma breve avaliação da tecnologia utilizada para produzir etanol a partir de matéria-prima lignocelulósica, bem como para fabricar os demais bioprodutos valiosos da cana-de-açúcar. A análise incluiu a identificação e a caracterização dos processos inovadores, em diferentes níveis de maturidade.

No que diz respeito à bioenergia da cana-de-açúcar, as perspectivas de aumento da produção de etanol, por meio da adoção de processos de segunda geração, em conjunto com as expectativas de promoção do cultivo de cana-energia, podem representar uma contribuição real para atender à crescente demanda por energia no setor de transporte global e, ao mesmo tempo, reduzir significativamente as emissões de GEE para a atmosfera.

Os itens dispostos a seguir, neste resumo executivo, apresentam os principais resultados encontrados no estudo com relação ao impacto da produção e do uso do etanol de cana-de-açúcar nas emissões globais de GEE, bem como aos impactos na superfície necessária para essa cultura.

A referência básica para a avaliação dos cenários de tecnologia é a situação brasileira que, posteriormente, tem a análise estendida para o contexto global, assumindo, dessa forma, duas previsões de demanda de energia para veículos leves, como explicado anteriormente.

É bem reconhecido o potencial atual da cana-de-açúcar como vetor energético, com boas perspectivas de expansão de seu uso como matéria-prima para a produção sustentável de bioenergia, em grandes quantidades e com uso relativamente limitado de terras (LEAL *et al.*, 2012).

Para avaliar o impacto da expansão da produção de etanol em outras regiões, assumiu-se que a agroindústria da cana existente em vários outros países é ou pode ser similar à brasileira e que a produção de etanol pode ser implementada da mesma forma, associada à produção de açúcar e à geração de eletricidade. De fato, essa suposição tem fundamentos consideráveis, tendo em vista que, na atualidade, a agroindústria da cana-de-açúcar desenvolvida em países como a Colômbia e a Guatemala apresenta, em muitos casos, indicadores de desempenho semelhantes ou até melhores que os de usinas brasileiras.

Com base nesse pressuposto, foi possível examinar diferentes cenários tecnológicos, considerando, além dos processos de primeira e segunda geração, as unidades sob condições típicas de fornecimento de matéria-prima, o uso da palha e o advento da cana-energia. Assim, vários cenários foram avaliados para estimar as emissões de GEE e os impactos sobre o uso do solo associados a tecnologias inovadoras para a produção de etanol, inicialmente no Brasil e, em seguida, em termos globais, conforme descrito a seguir.

5.1. Cenários de produção

O potencial para a produção de etanol a partir de cana-de-açúcar, utilizando tecnologias modernas e inovadoras, foi avaliado em dois cenários: a) o *business as usual* (BAU), representando o paradigma de produção e uso considerado para o futuro próximo; e b) o *needed*, que procura considerar os requisitos do IPCC para mitigação de GEE, com maior demanda por etanol e melhor tecnologia de produção, assumindo que processos integrados eficientes devem ser implantados na produção e na conversão de matérias-primas. Portanto, o cenário necessário significa também que políticas e regulamentos públicos adequados estarão em vigor para fomentar a produção de etanol (incluindo medidas específicas para promover o E2G) e que seu uso será estimulado para ajudar a estabilizar a concentração de GEE em até 450 partes por milhão (ppm) (IPCC, 2011), nível esperado para limitar o aumento médio da temperatura global em até 2°C, como estabelecido no Acordo de Paris.

Com o objetivo de aumentar o rendimento da produção de biocombustíveis, foram consideradas duas inovações: (i) os processos E2G, permitindo produzir etanol não só a partir do açúcar da cana-de-açúcar, mas também a partir de suas fibras e folhas; e (ii) a introdução da cana-energia, aumentando significativamente a produção de biomassa por hectare. Os valores de produtividade assumidos nos estudos do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) que modelam diferentes configurações de usinas de cana são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Produção agroindustrial de etanol com diferentes tecnologias

Cenário tecnológico	Produtividade agroindustrial (m ³ /ha)
1G média atual (2015)	6,49
1G novos (otimizados para eletricidade)	6,48
1G+2G atual	8,28
1G+2G novos (tecnologia avançada)	8,70
1G+2G novos (cana-de-açúcar + cana-energia)	13,25
1G+2G novos (cana-energia)	18,61

Fonte: CTBE, 2015.

Para avaliar os impactos médios da adoção dessas tecnologias em um parque de usinas típico, a produção total de etanol foi compartilhada entre as configurações de usinas existentes e projetadas na agroindústria de cana-de-açúcar (CTBE, 2015). Nessas condições, nos cenários avaliados para a próxima década, a produtividade agroindustrial média atual de etanol, 6,49 m³/ha, pode elevar-se para 7,26 m³/ha (+ 12%), devido a ganhos no processo E1G convencional e à introdução de cana-energia (fornecendo parte da matéria-prima processada). A produção deve alcançar, ainda, 8,66 m³/ha (+ 33%) quando o processo E2G for implementado. Em ambos os casos, esses seriam valores médios para toda a agroindústria da cana-de-açúcar (ver Gráfico 2). Esse aumento de produtividade depende, evidentemente, da realização de intensos esforços para alcançar o desempenho esperado da cana-energia e dos processos E2G, bem como de que os investimentos necessários nas unidades existentes e novas sejam feitos.

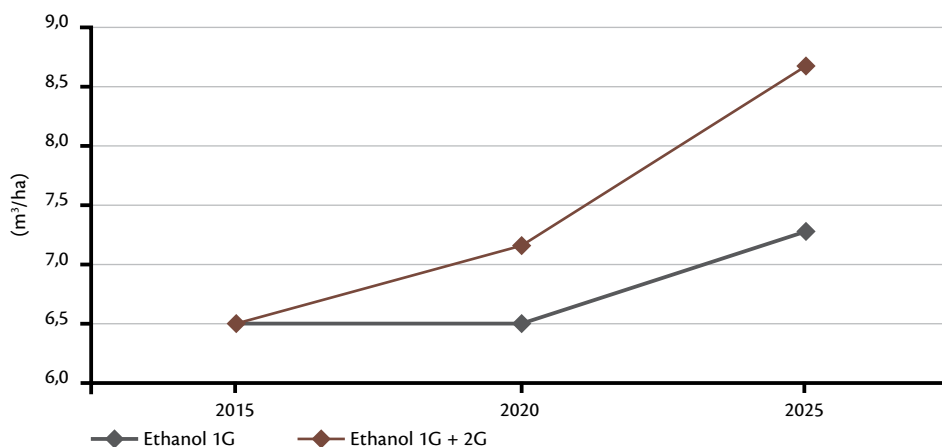


Gráfico 2 – Produtividade agroindustrial média estimada para usinas brasileiras.

Fonte: Elaborado com base em dados do CTBE de 2015.

5.2. Cenários de consumo de etanol

Em relação às perspectivas globais da demanda de etanol, duas condições foram assumidas, representando: a) o cenário *business as usual*, geralmente incluindo o uso de etanol em misturas, de acordo com *BP Energy Outlook* (2015) e *WEC Global Transport Scenarios 2050* (2011); e b) o cenário *needed*, que exige uma expansão mais intensa do uso de etanol, de acordo com a previsão do IPCC (2011). A Tabela 3 resume esses pressupostos e a Tabela 4 apresenta, para cada cenário, a demanda de etanol, o fator de mitigação estimado pela análise do ciclo de vida [em Inglês, *Life Cycle Assessment* (LCA)] nas tecnologias consideradas (CTBE, 2015) e o impacto resultante sobre a mitigação de GEE. Em comparação com a produção observada em 2013 (83 milhões de m³), essas previsões de demanda exigem aumentar o fornecimento global de etanol em 94%, para o cenário BAU, e em 387%, para o cenário necessário.

Tabela 3 – Cenários de demanda de etanol em 2030 e redução de emissão de GEE

Cenário	Referências	Demanda de etanol	Comentário
BAU	<i>BP Energy Outlook 2035</i>	4.77 EJ	Biocombustíveis representam cerca de 5% da energia consumida no setor de transporte em 2030.
	<i>WEC Global Transport Scenarios 2050</i>		
<i>Needed</i>	IPCC/SRREN, 2011	12.00 EJ	Biocombustíveis representam cerca de 11% da energia consumida no setor de transporte.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 4 – Demanda global de etanol em 2030 e mitigação de emissões de GEE

Cenário	BAU	Needed
Demanda de etanol	161 milhões m ³	404 milhões m ³
Fator de mitigação	1,53 tCO _{2eq} /m ³ etanol	1,65 tCO _{2eq} /m ³ etanol
Emissões evitadas	246 MtCO _{2eq} /ano	667 MtCO _{2eq} /ano

Fonte: Elaborada pelos autores.

Notas: Tonelada de dióxido de carbono (CO₂) equivalente por metro cúbico (tCO_{2eq}/m³). Milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO_{2eq}/ano).

5.3. Resultados essenciais

Para o horizonte de tempo considerado, 2030, a emissão total de GEE mitigada no cenário mais elevado de demanda de etanol (necessário) - cobrindo 11% da demanda de energia no setor de transporte mundial - representa, aproximadamente, 1,4% das emissões antropogênicas globais de GEE estimadas para 2010 (49 GtCO_{2eq}) e 9,5% das emissões globais de GEE de transporte estimadas para o mesmo ano (7 GtCO_{2eq}) (IPCC, 2014), conforme indicado na Tabela 5 e no Gráfico 3.

Tabela 5 – Demanda global de etanol em 2030 e mitigação de emissões de GEE

Indicador	2030 BAU	2030 Needed	Needed/BAU
Produção de biocombustível líquido (M m ³)	161	404	+250%
Mitigação de emissões (MtCO _{2eq} /ano)	246	667	+271%
Uso da terra (Mha)	22.1	46.7	+211%

Fonte: Elaborada pelos autores.

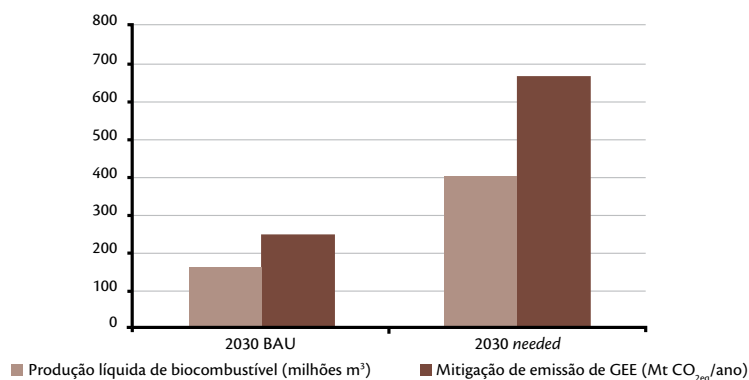


Gráfico 3 – Cenários até 2030 para produção de etanol e mitigação de GEE

Fonte: Elaborado pelos autores.

A área estimada ocupada com a cana-de-açúcar no cenário *needed*, cerca de 47 milhões de ha, deve ser comparada com a terra potencialmente disponível para a produção de bioenergia. De acordo com a FAO (2012), a área disponível para a agricultura de chuvas é estimada em 1.400 (Mha) de terras "superiores e boas" e mais 1.500 Mha de terra marginal, que é "de reposição e usável". Cerca de 960 Mha dessas áreas estão em países em desenvolvimento: na África subsaariana (450 Mha) e na América Latina (360 Mha), com muito, se não tudo, atualmente em pastagem/campo (SOUZA *et al.*, 2015). Assim, aquela área representa 1,6% da terra disponível para a agricultura de chuvas.

A evolução da tecnologia do etanol da cana-de-açúcar, tanto no aspecto agrícola quanto dos processos industriais, melhorando a eficiência na conversão de energia solar, reforça essa cultura como opção conveniente para produzir grandes volumes de biocombustíveis, proporcionando uma mitigação de GEE relevante e um uso aceitável da terra, conforme mostrado neste estudo. Na verdade, desde que corretamente aproveitada, há terra suficiente em nosso planeta para todas as necessidades humanas, incluindo a produção sustentável de biocombustíveis e bioprodutos. A Figura 1 sintetiza a questão de uso da terra, indicando que a área necessária para a produção de etanol no cenário necessário representa uma parcela muito limitada do total de terras disponíveis para fins econômicos.

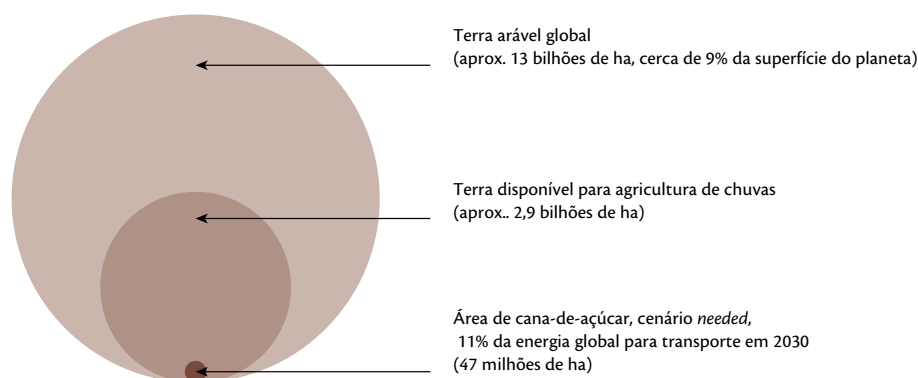


Figura 1 – Terra necessária para a produção de etanol no cenário de necessidades

Fonte: Elaborada pelos autores.

5.4. Viabilidade e perspectivas

É importante observar que os cenários explorados neste estudo correspondem a volumes razoáveis de etanol. A demanda indicada para 2030, em comparação com a atual produção global, significa taxas de crescimento acumulado anual de 4,7% (cenário BAU) e 11,4% (cenário *needed*). São taxas de crescimento significativas, mas, considerando o período de tempo (15 anos) e a experiência histórica brasileira e americana, demonstram ser factíveis, uma vez que esses países vivenciaram a ampliação bem sucedida em seus programas de etanol, com ritmos de expansão similar. No entanto, implantar essa expansão da produção representa um desafio evidente, por isso a inovação tem papel de destaque nesse contexto: aumentar o rendimento de bioenergia (combustível e eletricidade) e melhorar a redução de emissões de GEE.

Outra maneira de considerar a viabilidade de tal expansão é observar que, na atualidade, uma enorme quantidade de palha de cana ainda é deixada no campo após a colheita e o bagaço é queimado principalmente em caldeiras de baixa eficiência. Admitindo coletar 50% da palha disponível e aumentar em 20% o aproveitamento do excedente de bagaço nas usinas de cana-de-açúcar, cerca de 95 kg de material lignocelulósico (base seca) por tonelada de cana-de-açúcar poderia ser desviado para a produção de etanol de segunda geração. Dessa maneira, admitindo um rendimento de 217 litros de etanol por tonelada de celulose (tecnologia atual) e considerando a produção global de cana-de-açúcar (cerca de 2 bilhões de toneladas por ano), poder-se-ia obter mais de 41 milhões de m³ de etanol. Tal quantidade seria alcançada apenas usando "resíduos", sem plantar nenhum hectare adicional. Considerando as potenciais melhorias de processo, esse número poderia ser ainda maior. De fato, a probabilidade de expansão do uso de cana-de-açúcar para a produção de etanol é grande e também está muito mais próxima de se realizar do que parece à primeira vista.

Embora os biomateriais atuais e inovadores produzidos no âmbito da agroindústria da cana-de-açúcar, com base em processos termoquímicos ou bioquímicos, tenham um mercado global em expansão, seja como produtos intermediários ou finais, seu impacto em relação à mitigação de gases de efeito estufa e ao uso da terra ainda é pequeno, se comparado aos biocombustíveis, devido ao fato de também ser ainda limitado o volume utilizado para processos industriais. Esses produtos, no entanto, têm diversificado a produção das usinas nos anos recentes, agregando valor a alguns subprodutos de baixo custo e podem desempenhar um papel importante, como acontece com a cogeração de eletricidade, na melhoria da atratividade da agroindústria da cana-de-açúcar.

6. Recomendações

A agroindústria da cana-de-açúcar iniciou uma evolução importante, agregando tecnologias avançadas e tornando-se cada vez mais fornecedora de combustíveis líquidos e de eletricidade renováveis, além de abrir um amplo campo de oportunidades para a produção de bioprodutos inovadores, como bioplásticos e intermediários químicos. As novas oportunidades que se apresentam, de implementação de processos para converter matéria-prima lignocelulósica em etanol e eletricidade, além do alto potencial de aumento expressivo da produção de biomassa, com o advento da cana-energia, oferecem um novo cenário, com múltiplos ganhos: energéticos, sem dúvida, mas, também, benefícios econômicos, sociais e ambientais.

Devido à sua grande e pioneira experiência em biocombustíveis líquidos modernos (desde a produção de matéria-prima até as modernas rotas de processamento), além de dispor de instituições científicas bem desenvolvidas e que atuam na bioenergia, o Brasil tem uma posição privilegiada para promover essas tecnologias, de interesse global e, em particular, de outros países com clima adequado e terras disponíveis.

Apesar de uma melhor compreensão desse potencial, considerando os cenários mais viáveis, o desenvolvimento dessas tecnologias depende de políticas públicas adequadas, de redução da percepção de risco e de estímulo à eficiência. Nessa direção, o caso brasileiro é um bom exemplo. O País dispõe de recursos naturais; uma agroindústria de cana-de-açúcar bem estabelecida; uma legislação adequada, que determina um mercado atrativo de bioenergia; e, além disso, um programa de financiamento favorável à promoção da inovação, do investimento e de parcerias tecnológicas e empresariais. Em conjunto, esses elementos proporcionaram importantes avanços para consolidar uma realidade desejável, cujos primeiros resultados estão aparecendo. Essa transformação está, de fato, começando, com diferentes rotas sendo avaliadas e as curvas de aprendizado registrando evoluções. O contorno do modelo de produção está se definindo, sendo implementado e começando a funcionar. Em poucas palavras, está sendo demonstrado que é possível produzir bioenergia competitiva e sustentável, bem como biomateriais customizados, nas quantidades necessárias e com a qualidade especificada.

Para acelerar a maturidade tecnológica e a adoção da inovação na agroindústria da energia da cana-de-açúcar, o papel do governo é crucial, no reconhecimento das externalidades evidentes desta via e na garantia de um ambiente estável para novos empreendimentos, com base em marcos regulatórios e esquemas de financiamento capazes de reduzir a percepção de risco e estimular iniciativas com retorno socioeconômico e ambiental relevante. Nesse sentido, as medidas de apoio precisam ser tomadas em duas direções: no fortalecimento da atratividade para a introdução da inovação na produção, impulsionando o desenvolvimento tecnológico ("*technology push measures*"); e na promoção do mercado para estimular o uso desses novos produtos ("*demand pull measures*"), como comentado a seguir.

6.1. Medidas de incentivo tecnológico

O Plano Conjunto BNDES-Finep de Apoio à Inovação Tecnológica e Industrial nos Setores Sucroenergético e Sucroquímico (PAISS), lançado em 2011, constitui um marco recente para promover a inovação na agroindústria brasileira de cana-de-açúcar, considerada de interesse estratégico, e está alinhado com políticas de ciência, tecnologia e inovação do governo federal. O Plano induziu investimentos importantes no País, em bioenergia de segunda geração e na cana-energia. Um bom indicador de seus resultados positivos é a sua replicação em outros setores, estimulando a adoção de modelo similar para induzir outras parcerias público-privadas, envolvendo instituições de pesquisa e empresas comerciais. A iniciativa tem como finalidade reforçar, ao mesmo tempo, a experiência em fazer negócios e a base de conhecimento. Com base nessa experiência, desde já pode-se fazer as seguintes recomendações:

- Melhorias podem ser consideradas com vistas a simplificar os procedimentos e a aumentar a interação com políticas complementares, envolvendo outras agências de P&D e de inovação, federais e estaduais, cujos objetivos incluem, em muitos casos, a promoção de bioenergia sustentável; e
- Merece ser dada continuidade ao plano, com uma terceira rodada do PAISS, que possivelmente abranja aspectos industriais e agrícolas, com abertura para superar os obstáculos encontrados nas fases anteriores e para atender às condições observadas nas novas fronteiras do desenvolvimento da agroindústria da cana-de-açúcar, onde questões relacionadas a solo e clima têm colocado desafios para obter rendimentos bons e estáveis.

Também na categoria de ações de incentivo tecnológico, deve ser considerada a intensificação da cooperação internacional com países desenvolvidos e emergentes, que possuem instituições iniciando métodos avançados de processamento de matérias-primas lignocelulósicas para bio-combustíveis e biomateriais. Essa cooperação poderia ser fomentada no âmbito de programas bilaterais e multilaterais existentes e no desenvolvimento e treinamento de recursos humanos. O objetivo dessa cooperação deve ser o reforço da capacidade local nessas tecnologias.

Complementarmente, deve ser analisado o contexto observado em vários países em desenvolvimento, principalmente da América Latina e África, que apresentam um bom potencial para a implantação de uma agroindústria de cana-de-açúcar moderna. Com efeito, faltam iniciativas nesse campo. Nesse caso, esforços de cooperação, suporte técnico e demonstração poderiam levar a agroindústria a prosseguir na curva de aprendizado, reforçando a maneira como alguns países já estão atuando, tais como Peru, Equador e Angola. A experiência relativamente longa do Brasil com a bioenergia da cana-de-açúcar demonstra o quão vantajoso pode ser, e na verdade é, em sentido amplo, apostar em "energia verde".

6.2. Medidas de incremento da demanda

Promover e, em alguns casos, garantir o mercado de novos produtos têm sido medidas amplamente adotadas para reforçar a competitividade das tecnologias inovadoras, como é o caso dos biocombustíveis avançados. Algumas medidas nessa direção devem ser consideradas no Brasil para incentivar o consumo de etanol 2G, como, por exemplo, um regime tributário específico e/ou uma quota obrigatória. Considerando o tamanho do mercado brasileiro de biocombustíveis e a capacidade atual das unidades de produção 2G, o suporte necessário seria comparativamente pequeno (NYKO *et al.*, 2013). Atualmente, nos EUA e na União Europeia (UE), os biocombustíveis avançados recebem apoio claro e proeminente, inclusive por meio de movimentos de *marketing*, em ambas as localidades, associado a políticas ambientais e visando a mitigar as emissões de GEE. Vale a pena revisar essas experiências, como comentado a seguir.

O programa *Renewable Fuel Standard* [Padrão de Combustível Renovável (RFS)] foi criado nos Estados Unidos no âmbito do *Energy Policy Act* [Lei de Política Energética] de 2005 e, posteriormente, alterado e ampliado. Esse programa é implementado pela Agência de Proteção Ambiental [em Inglês, *Environmental Protection Agency* (EPA)], em conjunto com o Departamento de Agricultura e o Departamento de Energia. O programa RFS é uma política nacional que impõe um certo volume de combustível renovável para substituir ou reduzir o consumo de combustível líquido baseado em petróleo no setor de transporte, de óleo combustível para aquecimento e de querosene de aviação. As categorias de combustível renovável submetidas às regras do programa são: a) diesel à base de biomassa; b) biocombustível celulósico; c) biocombustível avançado (capaz de alcançar uma redução de 50% de GEE); e d) combustível totalmente renovável.

O RFS estabeleceu objetivos de consumo a longo prazo e implementou um sistema de conformidade, obrigando refinadores ou importadores de gasolina ou diesel combustível a misturar combustíveis renováveis nos combustíveis para transporte. O programa também proporcionou obtenção de créditos, denominados *Renewable Identification Numbers* (RIN), para atender a uma obrigação de volume renovável especificada pela EPA, ou seja, a *Renewable Volume Obligation* (RVO). Nesse sistema, os biocombustíveis celulósicos têm regime e cotas especiais e devem mitigar 60% da emissão de GEE em relação aos combustíveis fósseis (EPA, 2015). O RFS é certamente o principal formador de mercado de biocombustíveis avançados nos EUA.

A União Europeia implementou, em 2009, um quadro regulamentar e jurídico mais complexo, incluindo a Diretiva de Energia Renovável, criando uma quota de 10% para as energias renováveis nos transportes, a ser alcançada até 2020, e exigindo indicadores de sustentabilidade: i) a Diretiva de Qualidade do Combustível; e ii) a Diretiva para reduzir a Mudança Indireta do Uso do Solo [em Inglês, *Indirect Land Use Change* (ILUC) para biocombustíveis e bioprodutos, questão aliás bastante controversa.

Após um longo debate, em abril de 2015, o Parlamento Europeu rejeitou a ILUC, devido à sua insuficiente base científica, e aprovou uma revisão da legislação, criando um limite de 7% de contribuição

dos biocombustíveis produzidos a partir de culturas "alimentares"⁶, dando ênfase, ainda, à produção de biocombustíveis avançados a partir de resíduos de matérias-primas. Os Estados-Membros deveriam, em seguida, incluir essas disposições na legislação nacional até 2017 e mostrar como tais orientações deveriam alcançar os sub-objetivos para os biocombustíveis avançados. Os 3% restantes ("biocombustíveis não alimentares") provêm de uma variedade de múltiplas alternativas consideradas: biocombustíveis de óleo de cozinha e gorduras animais (dupla contagem), transporte ferroviário eletrificado (contado 2,5 vezes), eletricidade renovável em veículos elétricos (contada 5 vezes) e biocombustíveis avançados (dupla contagem, com um sub-alvo indicativo de 0,5%) (EC, 2015). Embora a implementação dessas diretivas demande tempo e a legislação subsidiária ainda esteja sendo estabelecida, é visível o seu papel na promoção e no desenvolvimento, ainda que restrito, do mercado europeu de biocombustíveis avançados.

As legislações que estimulam a demanda por biocombustíveis avançados nos EUA e na UE oferecem referências importantes sobre a oportunidade de medidas nessa direção em outros países. Uma linha de base para essas medidas diz respeito aos mecanismos para promover os biocombustíveis em geral, que podem "pavimentar a estrada" para fomentar os biocombustíveis avançados, criando um sistema logístico e de distribuição adequado, capaz de ser usado para biocombustíveis convencionais ou avançados, além de reduzir possíveis obstáculos culturais contra a introdução de biocombustíveis. Em qualquer caso, devem ser considerados mandatos ou quotas específicos para biocombustíveis avançados, uma vez que já provaram ser eficazes no caso dos convencionais, como ocorreu no Brasil. No entanto, tais metas devem ser realistas, com base na percepção local da potencialidade de crescimento do mercado de biocombustíveis avançados e, fundamentalmente, projetadas para promover uma contribuição durável e incremental dos biocombustíveis para o fornecimento de energia, de forma sustentável.

6 A competição real alimento versus bioenergia não ocorre no nível de matéria-prima, mas em insumos básicos para a produção, como dinheiro, trabalho, terra, água, etc. A bioenergia sustentável está necessariamente associada a processos eficientes de produção e conversão, utilizando racionalmente recursos naturais, humanos e financeiros.

7. Observações finais

Concluindo essas observações sobre mecanismos para promover os biocombustíveis avançados, vale a pena observar que, embora tanto as medidas *technology push* quanto *demand pull* sejam importantes impulsionadoras da inovação para sua produção e uso, sua eficácia depende de alguns aspectos que precisam de atenção:

- A coordenação entre políticas tecnológica e ambiental é crucial e pode promover sinergias interessantes, particularmente relevantes após as diretrizes da COP 21 e as comunicações das pretendidas contribuições nacionalmente determinadas [em Inglês, *intended National Determined Contributions (iNDC)*];
- A continuidade e a estabilidade dos programas, a criação de grupos de pesquisa estáveis e o estabelecimento de objetivos a médio prazo, bem como a imposição de atividades intermediárias de acompanhamento e avaliação, empregando revisores externos, são altamente recomendadas;
- O equilíbrio e o ajuste das medidas para impulsionar a inovação devem considerar adequadamente a existência e as necessidades de suporte tecnológico endógeno, capaz de absorver e processar, de forma racional, a informação disponível.

Como observação final, deve-se ressaltar que, com base em estudos independentes (SOUZA *et al.*, 2015), quando implementados e gerenciados adequadamente, produção e uso de biocombustíveis líquidos não são uma ameaça para a segurança alimentar, a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. De fato, a evolução dessa agroindústria tem sido realizada principalmente com benefícios ambientais, econômicos e sociais, como recuperação e melhoria de solos, integração de cadeias produtivas, valorização de coprodutos e subprodutos, gerando renda e empregos distribuídos regionalmente. A introdução de matérias-primas e processos inovadores, como aproveitamento do material lignocelulósico e a produção de etanol 2G, pode reforçar esse registro positivo, permitindo a mitigação da mudança do clima de forma muito mais efetiva, ao mesmo tempo em que melhora o desempenho econômico para atender a necessidades mais amplas da sociedade.

Referências

- BOSTON CONSULTING GROUP, The – BCG. Comments on low carbon fuel standard re-adoption. In: FUEL AVAILABILITY WORKSHOP, Oct. 2014. **Proceedings...** Western States Petroleum Association, 2014.
- BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO – BNDES. **Estimativa de produção de Etanol 2G no Brasil até 2025**, preliminary note. Rio de Janeiro, RJ: National Social and Economic Development Bank, 2015.
- _____. **Plano conjunto BNDES-FINEP de apoio à inovação tecnológica industrial dos setores sucroenergético e sucroquímico – PAISS**. Introduction and basic information in portuguese, 2011. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Areas_de_Atualizacao/Inovacao/paiss/>. Acesso em: Sept. 2015.
- _____. **Second-generation ethanol as an opportunity for sustainable development**, by Milanez, A. Y. Rio de Janeiro, RJ: BNDES Biofuels Department. Jul. 2015a.
- BP. **Energy outlook 2035**, London. 2015. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf>>.
- CENTER FOR STRATEGIC STUDIES AND MANAGEMENT - CGEE. **Second-generation sugarcane bioenergy & biochemicals: Advanced low-carbon fuels for transport and industry**. Brasília, DF: 2017. 124 p.
- EUROPEAN COMMISSION – EC. **Biofuels**. 2015. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/biofuels>>. Acesso em: nov. 2015
- FINGUERUT, J. Technology overview and perspectives on next generation technologies. In: BRAZILIAN BIOENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY CONFERENCE, 2nd. 2014. **J. BMC Proc** v. 8, Suppl. 4, p. O37, 2014.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS – FAO. **World agriculture towards 2030/2050**. ESA Working Paper No. 12-03, by Alexandratos, N; Bruinsma, J., Rome. 2012.
- FULTON, L.M.; LYND, L.R.; KÖRNER, A.; GREENE, N.; TONACHEL, R.L. The need for biofuels as part of a low carbon energy future. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, Wiley Online Library, 2015.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2014: synthesis report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC [Core Writing Team, Pachauri, R.K.; Meyer, L.A. (eds.)]. Geneva: 2014.
- _____. **IPCC Special report on renewable energy sources and climate change mitigation**. Prepared by Working Group III of the IPCC. [Edenhofer, O.; Pichs-Madruga, R.; Sokona, Y.; Seyboth, K.; Matschoss, P.; Kadner, S.; Zwickel, T.; Eickemeier, P.; Hansen, G.; Schlömer, S.; von Stechow, C. (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- _____. **Special report on renewable energy sources and climate change mitigation(SRREN)**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012 Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/srren/>>.

- LABORATÓRIO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO BIOETANOL – CTBE. **2G ethanol life cycle assessment**. Final presentation of project results to the members of the board of ABBI, São Paulo, Nov. 12th, 2015, and executive summary “The contribution of cellulosic ethanol for reducing carbon emissions and fossil energy use in the transportation sector” by Bonomi, A.; Cavalett, O.; Junqueira, T.L.; Chagas, M.F. Campinas, SP: 2015.
- LANDELL, G.A.; PINTO, L.R.; CRESTE, S.; CHABREGAS, S.M.; BURNQUIST, W.L. Technical road map for ethanol: genetic improvement and biotechnology. In: CORTEZ, L.A.B. ed. **Sugarcane bioethanol: R&D for productivity and sustainability**. São Paulo, SP: Ed Blucher, 2010.
- LEAL, M.R.L.; NOGUEIRA, L.A.H.; CORTEZ, L.A.B. Land demand for ethanol production. **Applied Energy**. Elsevier. v. 102, 2012.
- MATSUOKA, S.; KENNEDY, A.J.; SANTOS, E.G.D.; TOMAZELA, A.L.; RUBIO, L.C.S. Energy cane: its concept, development, characteristics, and prospects. **Advances in Botany**. 2014.
- MILANEZ, A.Y. **Second generation ethanol as an opportunity for sustainable development**. Rio de Janeiro, RJ: BNDES, 2015.
- MILANEZ, A.Y.; NYKO, D.; CAVALCANTI, C.E. Brazil's race towards second-generation biofuels. **Biofuels International**. Is. 5, v. 56, jun. 2012.
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY - NREL. **Biomass 2013: Cellulosic technology advances**, by Foust, T.; Bratis, A. Jul. 31, 2013.
- NYKO, D.; VALENTE, M.S.; DUNHAM, F.B.; MILANEZ, A.Y.; COSTA, L.M.; PEREIRA, F.S.; TANAKA, A.K.R.; RODRIGUES, A.V.P. Planos de fomento estruturado podem ser mecanismos mais eficientes de política industrial? Uma discussão à luz da experiência do PAISS e seus resultados. **BNDES Setorial, Inovação**, n. 38. 2013.
- SEABRA, J.E.A.; MACEDO, I.C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil, **Energy Policy**, v. 39, 2011.
- SOUZA, A.P.; GRANDIS, A.; LEITE, D.C.C.; BUCKERIDGE, M.S. Sugarcane as a bioenergy source: history, performance, and perspectives for second-generation bioethanol. **Bioenergy Research**, v. 7, n. 1. 2013.
- SOUZA, G.M.; VICTORIA, R.; JOLY, C.; VERDADE, L. eds. **Bioenergy & sustainability: bridging the gaps**. São Paulo: Scientific Committee on Problems of the Environment SCOPE, 2015. v. 72, p. 779. Disponível em: <http://bioenfapesp.org/scopebioenergy/images/chapters/bioenergy_sustainability_scope.pdf>.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Renewable fuel standard program**, 2015. Disponível em: <<http://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/>>. Acesso em: Nov. 2015.
- WORLD ENERGY COUNCIL – WEC. **Global transport scenarios 2015**. London: 2011.

Lista de fotos

- Foto 1** – Sistema de raiz da cana-energia (à esquerda) em comparação com a da cana-de-açúcar de tipo comercial (à direita) 16
- Foto 2** – Planta da GranBio em São Miguel dos Campos (AL). 19

Lista de gráficos

- Gráfico 1** – Entrada de energia da cana-de-açúcar, repartição por etapas do processo industrial e saída de energia (em colunas, eixo esquerdo); e eficiência energética global (em pontos, eixo direito) para várias rotas de processamento lignocelulósico em usinas de açúcar 15
- Gráfico 2** – Produtividade agroindustrial média estimada para usinas brasileiras. 23
- Gráfico 3** – Cenários até 2030 para produção de etanol e mitigação de GEE 24

Lista de tabelas

- Tabela 1** – Plantas de etanol 2G no Brasil 18
- Tabela 2** – Produção agroindustrial de etanol com diferentes tecnologias 22
- Tabela 3** – Cenários de demanda de etanol em 2030 e redução de emissão de GEE 23
- Tabela 4** – Demanda global de etanol em 2030 e mitigação de emissões de GEE 24
- Tabela 5** – Demanda global de etanol em 2030 e mitigação de emissões de GEE 24



Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

Partnership:



MINISTÉRIO DA
**CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES**

