

## **De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar – uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública**

Artur Yabe Milanez  
Diego Nyko  
Marcelo Soares Valente  
Luciano Cunha de Sousa  
Antonio Bonomi  
Charles Dayan Farias de Jesus  
Marcos Djun Barbosa Watanabe  
Mateus Ferreira Chagas  
Mylene Cristina Alves Ferreira Rezende  
Otávio Cavalett  
Tássia Lopes Junqueira  
Vera Lúcia Reis de Gouvêia\*

### **Resumo**

Após um longo período de desenvolvimento tecnológico em nível mundial, o etanol celulósico ou de segunda geração (E2G) atingiu o estágio de plantas comerciais. O Brasil, por conta dos projetos fomentados pelo Plano Conjunto BNDES-Finep de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico (PAISS), tem atualmente uma capacidade instalada de produção de E2G de cerca de 140 milhões de litros

---

\* Respectivamente, gerente setorial, economista e engenheiro do Departamento de Biocombustíveis do BNDES; analista do Departamento de Competitividade Industrial do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC); coordenador e pesquisadores da Divisão de Avaliação Integrada de Biorrefinarias do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM).

por ano. Contudo, tal volume ainda pode ser considerado pequeno quando comparado à demanda interna de combustíveis, hoje suprida com volumes relevantes de gasolina importada. Assim, com o objetivo de fomentar a implementação de mecanismos de política pública que acelerem os investimentos em novas plantas de E2G, este artigo apresenta, baseado em premissas discutidas com diversas empresas e especialistas, estimativas sobre o potencial de melhoria de eficiência e redução de custos de produção do E2G em diferentes cenários tecnológicos. Se bem-sucedidas, tais políticas ajudariam a alterar o atual paradigma tecnoeconômico da indústria da cana-de-açúcar, resgatando sua competitividade.

## Introdução

O setor de combustíveis líquidos no Brasil experimentou mudanças significativas na última década. O aumento da frota de veículos leves ocasionou crescimento significativo do consumo de combustíveis, cujo atendimento, até 2008-2009, foi feito majoritariamente por meio do aumento da produção interna de etanol.

Entretanto, a redução da competitividade do produto resultou em estagnação do investimento em novas usinas. Nesse cenário, a frota crescente de veículos passou a consumir mais gasolina, o que implicou o incremento do volume de importações, haja vista a capacidade limitada de refino no Brasil [Milanez *et al.* (2012)].

Ademais, como as novas refinarias em construção no Brasil concentram-se mais na produção de diesel e de outros derivados de maior valor agregado, a manutenção do atual patamar de venda de veículos leves implicará a importação de volumes crescentes de gasolina. Tais volumes poderão alcançar níveis superiores a dez bilhões de litros já no início da próxima década.

Desse modo, é indispensável que se busquem formas de resgatar a atratividade econômica do etanol, cuja competitividade se reduziu nos últimos anos, entre outros motivos, pelo amadurecimento de seu atual paradigma tecnológico agrícola e industrial [Nyko *et al.* (2010; 2013a)].

Dentre as opções tecnológicas que vêm sendo desenvolvidas no Brasil, destacam-se as iniciativas dedicadas ao E2G, cujo impacto na produtividade em etanol pode significar um aumento de até 50% em relação ao nível atual. Com esse novo paradigma tecnológico, abre-se a possibilidade também para

uma nova geração de biomassas mais produtivas, com maior conteúdo de fibras, como é o caso da cana-energia.

A iniciativa conjunta de BNDES e Finep – Inovação e Pesquisa por meio do PAISS, em 2011, viabilizou a implementação das três primeiras plantas de E2G no Brasil, das quais duas em escala comercial e outra demonstrativa, o que significou um passo importante na trajetória evolutiva do E2G, até então limitado a iniciativas em escalas laboratorial e piloto. Contudo, a capacidade dessas plantas, em conjunto, chega a pouco mais de 140 milhões de litros por safra, volume ainda pequeno quando comparado aos níveis de importação de gasolina, que a produção interna de E2G poderia reduzir. O ápice da importação ocorreu em 2012, quando o país importou 3,8 bilhões de litros. Em 2014, foram importados 2,2 bilhões de litros de gasolina.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a importância da implementação de mecanismos de políticas públicas que apoiem continuamente as atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D), bem como acelerem os investimentos em novas plantas de E2G no Brasil. Além desta Introdução, o artigo está dividido em mais três seções e a conclusão. Na segunda seção, são comparados os principais mecanismos de políticas públicas existentes nos Estados Unidos da América (EUA) e no Brasil.

A seção seguinte é reservada para avaliar técnico e economicamente a produção atual de E2G comparado à de etanol de primeira geração (E1G), bem como o potencial de melhoria de eficiência e redução de custo do E2G no Brasil. Na quarta seção, sugere-se um conjunto de políticas públicas que podem contribuir para acelerar os ganhos de eficiência do E2G. Na última seção, são expostas as principais conclusões.

## **Políticas tecnológicas para o E2G**

A corrida tecnológica mundial pelos biocombustíveis de segunda geração vem sendo direta ou indiretamente analisada em diversos trabalhos e em diferentes perspectivas [Bastos (2012); Dias *et al.* (2012; 2013); Nyko *et al.* (2010); Pereira (2013); Pugatch Consilium (2014); Raele *et al.* (2014)].

O E2G é produzido a partir de material lignocelulósico (MLC) proveniente da biomassa. Nas últimas décadas, diversas fontes lignocelulósicas vêm sendo estudadas para a produção de E2G, tais como, palha de milho, de trigo e de arroz, resíduos de cana-de-açúcar, bagaço de sorgo sacarino,

gramíneas, resíduos florestais. No Brasil, pelo fato de ser a matéria-prima predominante na produção de E1G, a cana-de-açúcar tem sido o foco dos principais estudos para a produção de E2G.

O E2G recebe atenção especial em muitos países, como os da União Europeia (UE), os EUA, a China e o Brasil. Nesses países, governos e empresas estão engajados em viabilizar comercialmente o E2G, que representa importante passo na direção da sustentabilidade ambiental e, em alguns casos, segurança/independência energética nacional. Nesse contexto, a inovação no segmento recebe amplo apoio público. Entre os principais instrumentos de política pública, figuram mandatos de mistura obrigatória, incentivos fiscais e subvenções (*grants*) para P&D.

Como argumentado em Nyko *et al.* (2010), os EUA oferecem o melhor exemplo de portfólio de políticas públicas que, de modo sinérgico, fomentam a inovação tecnológica em biocombustíveis celulósicos em suas diferentes dimensões. São diversos programas e planos de ação que apoiam a pesquisa, o desenvolvimento e a adoção crescente de novas tecnologias pelo país. Cada instrumento de política tecnológica tem suas próprias características e objetivos específicos que visam à superação de obstáculos de diferentes naturezas.<sup>1</sup>

Gretz *et al.* (2010) [*apud* Pereira (2013)] enxergam papéis distintos e complementares das políticas de incentivos tributários e de subvenção no fomento à inovação. Segundo os autores, enquanto o primeiro tipo de política deve ser usado para aumentar os investimentos em P&D, os *grants* devem ser usados para diversificar a composição de pesquisa e o desenvolvimento realizado pelas empresas.

Para melhor entender a lógica que fundamenta essas distintas, porém integradas, políticas tecnológicas, Steinmueller (2010) apresenta diversos modelos possíveis de políticas para inovação. Esses modelos são organizados em quatro categorias: (1) políticas voltadas à oferta de novas tecnologias; (2) políticas voltadas à demanda por novas tecnologias; (3) política para a oferta de fatores complementares; e (4) mecanismos de mudança institucional.

---

<sup>1</sup> Ressalta-se que, ao longo deste texto, os exemplos de política pública nos EUA se restringem ao apoio federal. Procura-se oferecer exemplos recentes, mas não necessariamente disponíveis na data de publicação deste estudo. De modo não exaustivo, o objetivo é ilustrar o vasto conjunto de instrumentos mais importantes utilizados pelos EUA.

Deve-se ressaltar que tais políticas e categorias não são exaustivas. Para o objetivo do estudo aqui elaborado, serão abordadas apenas algumas políticas voltadas à demanda e à oferta de novas tecnologias, já que essas duas categorias permitem classificar as principais políticas estadunidenses de apoio aos biocombustíveis celulósicos, que aqui são tomadas como exemplo bem-sucedido de fomento. Além disso, a classificação também permite identificar os elos e as complementaridades entre essas políticas, que concorrem para o pleno desenvolvimento tecnológico do E2G naquele país. Assim, as discussões que seguem sumarizam as principais categorias (de demanda e oferta) propostas por Steinmueller (2010), associando-lhes as principais políticas tecnológicas para o E2G nos EUA.

### As políticas voltadas à demanda por novas tecnologias

Como argumentado por Steinmuller (2010), o processo da difusão tecnológica não é necessariamente automático. Pelo contrário, é comum haver alguma resistência por parte de possíveis usuários no processo de adoção da tecnologia. Como resultado, torna-se lento o ritmo da difusão da inovação. Além disso, a aceitação da inovação pelo mercado pode não ser imediata em muitos casos, visto que o custo e/ou o preço do produto ou serviço podem ser temporariamente superiores ao custo/preço de tecnologias substitutas que já existem. Mesmo havendo aumento correspondente na qualidade do produto ou serviço, este pode não ser adotado por distorções na percepção e/ou por diferenças de valorização individual pelos eventuais usuários. Essa situação pode ocorrer com o E2G, que tem maior potencial para redução dos impactos ambientais em comparação com os combustíveis tradicionais existentes [Dias *et al.* (2012); Luo *et al.* (2009a; 2009b)].<sup>2</sup>

Além disso, o setor energético tem uma série de características que necessitam ser levadas em consideração. Em primeiro lugar, no mercado de energia, o cliente não tem escolha, o que torna esse mercado bastante regulado. Mesmo em países com tradição econômica de pouca interferência de mercado, como os EUA, existem regras rígidas sobre as características do produto, quem pode produzir, em quais circunstâncias, quem pode distribuir etc. Em segundo lugar, novas tecnologias no setor energético normalmente

---

<sup>2</sup> A difusão tecnológica do E2G terá que ocorrer em dois níveis indissociáveis. No primeiro, as empresas produtoras de etanol deverão incorporar as novas tecnologias em seus processos produtivos. Em um segundo nível, é necessário que os usuários finais de combustíveis consumam o E2G.

competem com tecnologias já bem-estabelecidas, com custos baixos e ampla base instalada, de maneira que o maior problema a ser enfrentado pelas inovações no setor é o de atingir a escala necessária. No setor de energia, é necessário que se leve em conta o suprimento de tecnologia, mas também a criação de demanda para esse tipo de tecnologia e elementos organizacionais que sejam propriamente alinhados para ligar os dois [Peters *et al.* (2012); Weiss e Bonvillian (2009); Ye, Paulson e Khanna (2014)].

No caso do E2G, pode-se considerar que o processo de difusão das tecnologias de produção ainda nem começou. De propriedade de empresas que também desenvolvem as tecnologias de produção de E2G, as plantas pioneiras começaram a produzir seus primeiros litros de etanol em 2014. Ainda que conhecidas, as etapas físicas, químicas e biológicas da produção de E2G devem sofrer alterações e evoluções com o processo de escalonamento industrial. Há um longo processo de aprendizagem a ser percorrido, durante o qual deverão ser superados substanciais riscos e incertezas para que a difusão ocorra satisfatoriamente.

Se, por um lado, há problemas observados no processo de difusão tecnológica, por outro, há razões para acreditar que o aumento do ritmo da difusão tecnológica deverá ser benéfico socialmente. Entre elas, destacam-se: (1) a própria aprendizagem, que tende a levar a reduções consistentes de custos e, portanto, com potencial de gerar aumentos do bem-estar social; e (2) o aumento da produtividade para seus usuários ou para outras partes da economia, o que poderia acelerar o crescimento econômico e também o bem-estar social. No caso do E2G, é importante considerar também a dimensão ambiental. O produto gera impactos ambientais expressivamente menores, principalmente quando comparado a seus substitutos de origem fóssil ou mesmo a outros biocombustíveis [Dias *et al.* (2012); Luo *et al.* (2009a; 2009b)]. Assim, a difusão da produção e do uso do E2G representaria passo importante na luta contra as mudanças climáticas e outras categorias de impacto ambiental relevantes, como o uso da terra e de recursos fósseis.

### *Subsídios à adoção de novas tecnologias*

A oferta de subsídios aos eventuais usuários de uma nova tecnologia é um dos instrumentos mais conhecidos e utilizados pelos formuladores de políticas públicas. Segundo Steinmueller (2010), a oferta de subsídios à adoção de tecnologia é equivalente à redução do preço do bem ou do serviço a ser adotado, o que levaria ao aumento do consumo.

Nos EUA, há exemplos de ofertas de subsídios à adoção de biocombustíveis alternativos. Até dezembro de 2013, a Receita Federal dos EUA ofereceu crédito tributário no valor de US\$ 0,50 por galão (R\$ 0,30 por litro)<sup>3</sup> de certos combustíveis alternativos usados (ou misturados na gasolina, diesel ou querosene) para veículos terrestres, marítimos ou aéreos. Etanol, biodiesel e metanol não foram elegíveis para receber esse apoio, que se destinou, entre outros, ao gás liquefeito de petróleo (GLP), gás natural e hidrocarbonetos liquefeitos derivados de biomassa.<sup>4</sup> O crédito foi concedido aos distribuidores (ou misturadores) de combustíveis [Cunningham *et al.* (2013)].

Até o fim de 2011, a Receita Federal americana também ofereceu subsídio aos distribuidores de combustíveis que misturassem etanol com gasolina. O crédito tributário oferecido era de US\$ 0,45 por galão (R\$ 0,27 por litro)<sup>5</sup> de etanol misturado. Todavia, essa legislação não fazia diferenciação entre o E1G e o E2G.

### *Mandatos de uso/mistura obrigatória*

No que tange especificamente aos biocombustíveis, os mandatos que obrigam seu uso são um tipo de instrumento empregado por diversos países do mundo. Esse instrumento estimula a demanda ao mesmo tempo em que busca reduzir as incertezas de mercado. De fato, a lógica nesse tipo de medida é a formação de um mercado que, com o tempo, tende a se consolidar e se expandir, o que acelera a curva de aprendizado das empresas e contribui para a difusão mais rápida dessas novas tecnologias.

Nos EUA, foi criado o Renewable Fuel Standard (RFS), um dos principais programas federais de apoio aos biocombustíveis celulósicos. Gerido pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA, o RFS tem como objetivo garantir um consumo mínimo de combustíveis renováveis. O programa originou-se no Energy Policy Act de 2005 e foi expandido pelo Energy Independence and Security Act (EISA) de 2007, dando origem ao RFS2.

Segundo o RFS2, os combustíveis renováveis devem ser misturados em quantidades crescentes a cada ano, chegando a 36 bilhões de galões (ou volume próximo a 136 bilhões de litros) em 2022 (Gráfico 1). Como ilustração,

---

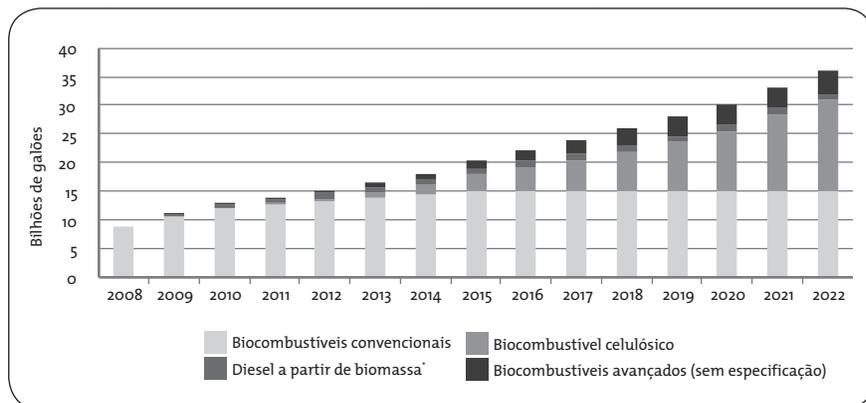
<sup>3</sup> Dólar a R\$ 2,30 (jul. 2014).

<sup>4</sup> Atualmente, o foco do governo dos EUA recai sobre os combustíveis *drop-in*, ou seja, aqueles que podem ser usados sem restrições nos atuais motores veiculares, substituindo integralmente os combustíveis fósseis.

<sup>5</sup> Dólar a R\$ 2,30 (jul. 2014).

esse valor representaria cerca de 25% do consumo americano de gasolina, que vem girando em torno de quinhentos bilhões de litros por ano.

**Gráfico 1** | Metas de consumo da RFS2 segundo EISA 2007



Fonte: Elaboração própria, com base em EPA.

\*A partir de 2013, não há valores definidos para o diesel a partir de biomassa. Determinou-se apenas que seu consumo não pode ser inferior a um bilhão de galões por ano.

O RFS2 determinou que deveriam ser consumidos não apenas biocombustíveis convencionais, como o etanol de milho, mas também biocombustíveis avançados, como os celulósicos e o diesel de biomassa. Essa classificação de biocombustíveis é definida por meio de critérios de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). O RFS2 considera que biocombustíveis celulósicos são aqueles derivados de qualquer material celulósico, hemicelulósico ou de lignina que, por sua vez, sejam derivados de biomassa renovável, e que reduzam as emissões de GEE em, pelo menos, 60% quando comparados aos substitutos fósseis. Em 2022, deverão ser consumidos 16 bilhões de galões (ou cerca de sessenta bilhões de litros) de biocombustíveis celulósicos nos EUA (ver Gráfico 1), pouco mais de 10% do total de gasolina consumida atualmente.

### Políticas voltadas à oferta de novas tecnologias

As políticas que incentivam a oferta de novas tecnologias baseiam-se, em grande medida, na concepção de fluxo linear da inovação, ou seja, partem da constatação de que estímulos contínuos à pesquisa e ao desenvolvimento científico tendem a aumentar as inovações do sistema (*technology push*). Desse modo, ao incentivar o aumento das atividades científicas, essas

políticas pretendem aumentar o ritmo e a direção da mudança tecnológica [Steinmueller (2010)].

### *Políticas tecnológicas horizontais*

Nesse conjunto, as políticas tecnológicas horizontais são de implementação relativamente simples e têm potencial para atingir grande número de atores. Normalmente, o objetivo dessas políticas é incentivar o aumento de gastos em P&D das empresas e, dessa forma, aumentar a produtividade global da economia. Nesse sentido, incentivos fiscais são importantes mecanismos de políticas tecnológicas horizontais. Todavia, Steinmueller (2010) chama a atenção para o escopo dessas políticas. O principal alerta recai sobre a possibilidade de comportamentos oportunistas de muitas empresas em políticas com grande abrangência. O benefício da redução de alíquotas de imposto sobre gastos com inovação, por exemplo, poderia ser obtido por empresas cujas atividades correntes já sejam consideradas atividades de P&D, sem aumento, portanto, daqueles gastos. Logo, políticas tecnológicas mais focadas poderiam obter maior sucesso.

Para buscar exemplos dessas políticas nos EUA, é preciso ampliar o foco analítico de modo a abarcar, além das atividades tradicionais de P&D das empresas, também a construção de plantas pioneiras de E2G nas atividades de inovação.<sup>6</sup> Sem ter abrangência horizontal, os dois exemplos oferecidos aqui são de subsídios voltados à produção dos biocombustíveis celulósicos. Em uma primeira etapa, a Receita Federal Americana concedeu crédito tributário para a produção de biocombustíveis celulósicos. Os produtores poderiam reivindicar crédito de até US\$ 1,01 por galão (R\$ 0,61 por litro)<sup>7</sup> de biocombustível celulósico produzido nos EUA depois de 31 de dezembro de 2008.<sup>8</sup> Em uma segunda etapa, a mesma Receita Federal concedeu subsídio especial de 50% para as deduções com depreciação das plantas de biocombustíveis celulósicos que utilizassem a hidrólise enzimática em seu processo produtivo. Esse subsídio foi válido somente para o primeiro ano de operação dessas plantas. Ambos os créditos tarifários, previstos

<sup>6</sup> Se o foco analítico se restringisse às atividades tradicionais de P&D, as políticas públicas que apoiam a produção dos biocombustíveis celulósicos, que são apresentadas adiante, seriam consideradas políticas voltadas à demanda.

<sup>7</sup> Dólar a R\$ 2,30 (jul. 2014).

<sup>8</sup> Esse crédito para o E2G varia com outros créditos disponíveis para esse biocombustível, de tal forma que o valor total de todos os créditos seja de US\$ 1,01 por galão [Yacobucci (2012)].

originalmente para se encerrarem no fim de 2012, foram renovados até o fim de 2013 [Amarasekara (2013); Miller *et al.* (2010); Yacobucci (2012)].

### *Estratégias de sinalização*

Como apresentado em Steinmueller (2010), as estratégias de sinalização objetivam influenciar as expectativas tecnológicas dos tomadores de decisão privados, diminuindo as assimetrias de informação que eventualmente existem no ambiente de negócios. Segundo o autor, em um contexto no qual a informação é assimétrica e a incerteza é significativa, deve ser considerado o apoio a projetos de demonstração. Assim, ao gerar parâmetros técnicos e econômicos em escala que represente confiabilidade, uma planta de demonstração de E2G operacionalmente ativa poderia ter efeito de sinalização para os atores reticentes em investir nessa nova tecnologia.

De fato, a maior parte das políticas públicas para a inovação acaba gerando algum tipo de sinalização. Programas com recortes temáticos bem definidos e que estimulem a competição, por exemplo, podem funcionar como mecanismo de sinalização, visto que deixam claro quais são as prioridades e as visões de longo prazo de determinado país.

### *Financiamento temático*

Outro tipo de política tecnológica importante e amplamente usada pelos EUA é o financiamento temático. Como definido por Steinmueller (2010), esse termo é abrangente e pode contemplar diversos programas, sendo o modelo dominante entre as políticas tecnológicas voltadas à oferta. A característica principal desse tipo de política é a predefinição de temas, para os quais os candidatos elegíveis são convidados a submeter propostas de programas de P&D. Segundo o autor, a principal vantagem desse tipo de política tecnológica é o foco, que pode levar em conta aspectos setoriais, regionais, sociais e tecnológicos.

Nos EUA, vários departamentos são responsáveis por elaborar e conduzir programas de financiamento temático. Entre eles, destacam-se o Departamento de Energia (DOE) e o Departamento de Agricultura (USDA). Apesar de existir alguma redundância entre os programas desses departamentos, a complementaridade é o aspecto que melhor define a relação entre eles.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Para detalhamento dos papéis das agências e departamentos federais dos EUA na cadeia produtiva da bioenergia, ver DOE-EERE (2014). Importante ressaltar a existência da Biomass R&D Board, interagência presidida conjuntamente por DOE e USDA cujo objetivo é discutir, de modo coordenado com as demais agências federais envolvidas no tema, a evolução tecnológica setorial e as estratégias de implementação de políticas tecnológicas na área de biocombustíveis, bioprodutos e bioenergia.

Sob a responsabilidade do USDA, destaca-se o Biorefinery, Renewable Chemical and Biobased Product Manufacturing Assistance Program. O programa surgiu pela primeira vez na Farm Bill de 2008. Na época, denominava-se apenas Biorefinery Assistance e oferecia tanto subvenções econômicas<sup>10</sup> (*grants*) quanto garantias a empréstimos<sup>11</sup> para a construção de biorrefinarias de escala comercial e/ou modernização de biorrefinarias demonstrativas para biorrefinarias comerciais. O objetivo do programa era demonstrar a viabilidade comercial dos processos de conversão de biomassa em biocombustíveis avançados.

Renovado pela Farm Bill de 2014, o programa incorporou os produtos da química renovável ao escopo do apoio. Além disso, o programa deixou de oferecer subvenções, mas manteve as garantias de empréstimos [Schnepf (2014)]. Segundo Panoutsou *et al.* (2013), até 2013, haviam sido investidos mais de US\$ 1 bilhão em 29 projetos de biorrefinarias integradas e US\$ 1,7 bilhão havia sido a contrapartida do setor privado.

O USDA, em parceria com o DOE, também é responsável pelo Biomass Research and Development Initiative, programa que oferece subvenções para projetos de pesquisa, desenvolvimento e demonstração de biocombustíveis. São três os principais focos de apoio desse programa: (1) desenvolvimento de matérias-primas; (2) desenvolvimento de biocombustíveis e bioprodutos; e (3) análise do desenvolvimento dos biocombustíveis. Para ter acesso ao apoio, há um processo competitivo, e a participação máxima do governo é de 80% do custo total do projeto.

No que concerne às responsabilidades do DOE, o Bioenergy Technologies Office (BETO) é o órgão responsável por fomentar tecnologias comercialmente viáveis para biocombustíveis e bioprodutos. Para tanto, o BETO segue planejamento plurianual consubstanciado em seu Multi-Year Program Plan (MYPP), documento que estabelece os objetivos e identifica as atividades de pesquisa, desenvolvimento e demonstração que deverão ser foco do órgão durante cinco anos.<sup>12</sup>

<sup>10</sup> Limitada a até 30% dos custos totais do projeto.

<sup>11</sup> As garantias de empréstimo são limitadas em até US\$ 250 milhões ou 80% dos custos totais do projeto.

<sup>12</sup> A formulação do MYPP envolve o estabelecimento de metas arrojadas e indicadores de desempenho para as tecnologias que serão fomentadas. Por exemplo, no MYPP de 2014 [DOE-EERE (2014)], fica estabelecido que, em 2017, deverá ser validada, em escala-piloto, pelo menos uma rota tecnológica para a produção de um biocombustível composto de hidrocarbonetos, precificado a US\$ 3 por galão de gasolina equivalente e com redução de, no mínimo, 50% de GHG quando comparado aos substitutos fósseis.

A partir da formulação e validação do MYPP, são construídos alguns *design cases*, a partir dos quais são simulados modelos de rotas de conversão de biomassa em biocombustível. Como ressaltado em Pereira (2013), as simulações contam com o auxílio de laboratórios nacionais, como o National Renewable Energy Laboratory (NREL). As simulações permitem identificar os desafios tecnológicos a serem enfrentados para a consecução dos objetivos traçados. Além disso, o autor ainda destaca que o produto final mais importante dessas simulações é a estimativa do preço mínimo de venda do etanol celulósico,<sup>13</sup> que se converte em meta a ser alcançada pelo BETO.

Em seguida, o BETO elabora diversas oportunidades de financiamento, finalizando assim a formulação de instrumentos de apoio financeiro. Nas palavras de Pereira (2013, p. 64):

Com base no planejamento estratégico, nos *design cases*, e nas contribuições de *stakeholders* [...], a equipe do BETO elege tópicos tecnológicos-chave, que configuram gargalos para a viabilidade econômica de processos de conversão de biomassa em biocombustíveis, bioprodutos ou bioenergia, e redige uma oportunidade de financiamento.

Cada oportunidade de financiamento funciona como um edital, no qual estão disponíveis todas as informações necessárias para os eventuais interessados em pleitear as subvenções econômicas relacionadas às tecnologias e à superação de gargalos identificados como prioridades no MYPP.

### Políticas de apoio ao E2G no Brasil

Como argumentado em Nyko *et al.* (2010), até o fim da última década, as tentativas de apoio ao E2G no Brasil eram difusas, descoordenadas e sem fôlego. Para superar tais problemas, o BNDES e a Finep lançaram, em 2011, o PAISS. Com a oferta de financiamento a baixo custo e de recursos não reembolsáveis, o plano buscou fomentar novas e coordenadas iniciativas empresariais de P&D em temas específicos relacionados à conversão da biomassa da cana-de-açúcar em E2G e outros produtos.

Outra iniciativa que busca organizar o apoio técnico e financeiro à atividade de P&D é o Programa de Pesquisa em Bioenergia (Bioen) da Fundação

<sup>13</sup> Esse preço é aquele que “remuneraria o investimento, considerando todos os custos de produção estimados e as condições operacionais atingidas” para determinada opção tecnológica [Pereira (2013, p. 61)].

de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp). Segundo a instituição, o Bioen objetiva estimular e articular atividades de P&D para promover o avanço do conhecimento e sua aplicação em áreas relacionadas à produção de bioenergia no Brasil.

No caso do PAISS, as atividades de inovação fomentadas foram prioritariamente aquelas com foco comercial, desenvolvidas por empresas. Já no caso do Bioen, as atividades apoiadas têm viés majoritariamente acadêmico, apesar de haver a possibilidade de pesquisa cooperativa entre a academia e o setor privado.

Em ambos os casos, trata-se de políticas de inovação voltadas à oferta. De acordo com a terminologia aqui empregada, são políticas de financiamento temático. O PAISS, por meio de edital, e o Bioen, por meio de suas chamadas de propostas, apresentam os focos temáticos que devem ser objeto de planos de negócio e projetos de pesquisa encaminhados pelos interessados.

Apesar de bem-sucedidos no financiamento a essas atividades [Nyko *et al.* (2013b)]<sup>14</sup> esses planos carecem de complementação de outras políticas de apoio à inovação, tal como ocorre com as políticas voltadas à demanda nos EUA. O PAISS, por exemplo, fomentou a construção de três plantas de E2G no Brasil, das quais duas entraram em comissionamento no segundo semestre de 2014. Todavia, ainda não há, por exemplo, políticas que favoreçam o consumo de E2G pelos usuários finais, o que facilitaria a difusão dessas novas rotas de conversão para outras empresas do setor. Sem tais políticas, a tendência é que a difusão tecnológica ocorra em ritmo inferior ao desejado e que a produção brasileira de E2G seja exportada para mercados cujos incentivos sejam revertidos em preços mais elevados para esse produto.

Desse modo, a fim de justificar a implementação de mecanismos de políticas públicas que venham a complementar o atual cenário brasileiro, o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) realizou, com base em premissas discutidas com diversas empresas e especialistas, simulações sobre o potencial de melhoria de eficiência do E2G em diferentes cenários tecnológicos, cujos resultados são apresentados na próxima seção.

---

<sup>14</sup> Para uma avaliação dos resultados do Bioen, ver: <<http://www.bv.fapesp.br/pt/16/pesquisa-em-bioenergia-bioen/>>. Acesso em: 8 dez. 2014.

## Estimativa do potencial de melhoria de eficiência da produção de E2G

### Metodologia e premissas

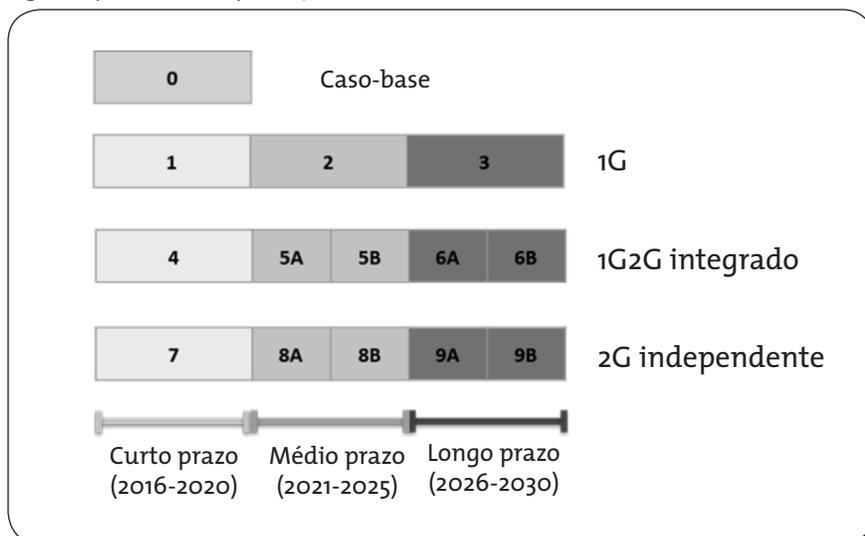
#### *Aspectos gerais*

Para a realização deste estudo, utilizou-se a ferramenta Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar (BVC) desenvolvida pela Divisão de Avaliação Integrada de Biorrefinarias do CTBE, integrado ao Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM). A BVC é uma plataforma de simulação computacional que possibilita avaliar tecnicamente, e nos três eixos da sustentabilidade (econômico, ambiental e social), diferentes rotas e tecnologias integradas na cadeia produtiva da cana-de-açúcar e de outras biomassas. Neste trabalho, a BVC foi usada para estimar o custo da produção do E2G ao longo do tempo. É fundamental enfatizar que as premissas agrícolas, industriais e econômicas utilizadas foram discutidas e definidas com a ativa participação das principais empresas do setor.

O processamento de sorgo sacarino, milho e cana-energia para a produção de E1G (a partir da fermentação do caldo rico em açúcares) e energia elétrica excedente já vem sendo implementado em algumas unidades industriais, utilizando parte da infraestrutura que ficaria ociosa na entressafra de cana-de-açúcar. Entende-se que há espaço para maior utilização dessas culturas à medida que novas variedades de plantas e aprimoramentos nos processos agrícolas e industriais estejam disponíveis. Entretanto, neste estudo, optou-se por considerar apenas a cana-energia (CE) para complementar, ou, até mesmo, substituir a cana-de-açúcar convencional (CC), em virtude de seu grande potencial produtivo.

Foram definidos 14 cenários para essa avaliação, conforme mostrado na Figura 1. Os cenários foram divididos contemplando os horizontes temporais de curto, médio e longo prazo e a respectiva rota tecnológica empregada. Os custos de produção da CC e da CE para os diferentes cenários foram estimados por meio do CanaSoft,<sup>15</sup> modelo integrante da BVC. Na fase industrial, foram definidos e simulados cenários de plantas de E1G, E1G2G (etanol de 1ª e 2ª geração) integradas e E2G independentes.

<sup>15</sup> O modelo CanaSoft é um conjunto de planilhas eletrônicas contendo informações agrônômicas e de engenharia agrícola para o cálculo do custo total de produção de uma determinada biomassa considerando o custo das operações agrícolas, insumos químicos, fertilizantes, pesticidas, mão de obra, entre outros itens importantes na composição do custo total da biomassa [Bonomi *et al.* (2012)].

**Figura 1** | Cenários de produção de E2G avaliados

Fonte: Elaboração própria.

O caso-base (Cenário 0) representa a média atual do setor, isto é, uma planta 1G anexa com capacidade de processamento na faixa de dois milhões de toneladas na safra, com tecnologia básica e sem integração energética. Esse cenário tem a função de mostrar o custo do E1G próximo do atual na maior parte das usinas na Região Centro-Sul do Brasil e de validar as metodologias e premissas utilizadas. Pela metodologia empregada, é necessário que seja conhecido o custo do E1G para o cálculo do custo do E2G, conforme descrito neste artigo. Nos cenários de E2G, foram introduzidas no médio e no longo prazo duas rotas tecnológicas (rotas A e B). A Rota A refere-se a um processo de produção de E2G com fermentação separada de C5 (açúcares com cinco carbonos, xilose). A Rota B refere-se a um processo com cofermentação dos açúcares C5 e C6 (açúcares com seis carbonos, glicose). Assim, por exemplo, o Cenário 9B refere-se a um cenário 2G independente de longo prazo usando a rota tecnológica B para produção de E2G.

### *Sistemas de produção de biomassa*

A cana-de-açúcar é, atualmente, a única biomassa usada em grande escala para a produção de E1G e açúcar no Brasil. Entretanto, para os cenários de médio e longo prazos, foi considerada a introdução gradual da CE como biomassa adicional à CC, sendo a CE composta por palha e colmos

integrados. O Quadro 1 apresenta a quantidade de biomassa processada nos diferentes cenários desenhados para essa avaliação.

A composição de cada uma das biomassas consideradas neste estudo é apresentada na Tabela 1. As principais premissas adotadas para a produção de CC e CE nos diferentes horizontes temporais são apresentadas na Tabela 2. Para a CC, considera-se que a produtividade, o nível de utilização de agricultura de precisão e de mecanização no plantio e colheita, bem como a quantidade de palha recolhida, aumentem conforme o horizonte temporal, seguindo uma expectativa relativamente otimista para o setor sucroenergético. São aplicados valores típicos de consumo de insumos para correção do solo (calagem e gessagem), para fertilização (aplicação de fertilizantes minerais, vinhaça, torta de filtro e cinzas) e para controle químico de pragas da produção de CC na Região Centro-Sul do Brasil. Para a CE, também é considerado um aumento de produtividade conforme essa cultura se estabelece e novas variedades estejam disponíveis no futuro. Para cenários, a partir do médio prazo, foi considerada a substituição parcial do diesel, utilizado pelos caminhões e maquinário agrícola, pelo biogás produzido a partir da biodigestão da vinhaça. Para o longo prazo, considerou-se que um maquinário mais avançado e eficiente (Estrutura de Tráfego Controlado – ETC) [Braunbeck (2014); Cardoso (2014)], atualmente em desenvolvimento, estará disponível e será empregado no plantio e na colheita.

**Quadro 1** | Biomassa processada por ano nos diferentes cenários avaliados

Cenário	Safra (200 dias)	Entressafra (130 dias)	Comentários
0	2 Mt de CC	-	Usina anexa representando a média da capacidade de processamento de CC das usinas na Região Centro-Sul do Brasil. Considerando a produtividade média (Tabela 2) e a capacidade de moagem, são necessários 25 mil hectares de colheita de CC para moagem. <sup>a</sup>
1, 4	4 Mt de CC  0,25 Mt (base seca) de palha de CC	-	Usina autônoma representando a capacidade média de processamento de CC das usinas mais novas. É considerado também o recolhimento de 50% da palha <sup>b</sup> para a geração de excedente de energia elétrica (Cenário 1) ou E2G (Cenário 4). A área agrícola necessária para moagem é de cinquenta mil hectares.

(*Continua*)

(Continuação)

Cenário	Safra (200 dias)	Entressafra (130 dias)	Comentários
2, 5A, 5B	4 Mt de CC  0,34 Mt (base seca) de palha de CC	1,72 Mt de CE	Com o aumento de produtividade de CC considerado para o médio prazo, mantendo a mesma capacidade anual de processamento de CC na safra, há um excedente de área agrícola (dez mil hectares, dos quais 8,62 mil são utilizados para a produção de CE). Nessa área é considerada a produção de CE para processamento durante a entressafra da CC. A quantidade de CE processada na entressafra foi determinada mantendo-se o mesmo processamento horário de fibras da safra, uma vez que são usadas as mesmas moendas que operam com CC. Foi considerado que a CE pode ser colhida durante a entressafra de CC, pois não há a preocupação com a perda da qualidade do açúcar, e também que haverá maquinário apropriado para essa operação durante a época de chuvas na Região Centro-Sul. <sup>c</sup>
3, 6A, 6B	4 Mt de CC  0,39 Mt de palha (base seca) de CC  1,50 Mt de CE	2,67 Mt de CE	Com o aumento ainda maior na produtividade de CC considerado para o longo prazo, há um excedente maior de área agrícola (16,7 mil hectares, em relação à área do curto prazo). No total desse excedente de área, é considerada a produção de CE para processamento durante o ano todo. Nesse caso, é considerada a aquisição de dois termos de moenda adicionais para processar a CE o ano todo. O conjunto de moendas que processa CC durante a safra também será usado para processar CE durante a entressafra de CC.
7	0,42 Mt (base seca) de material lignocelulósico		A capacidade é definida pela quantidade de MLC <sup>d</sup> excedente de um cenário equivalente ao Cenário 1, só que projetado para gerar excedentes de MLC em vez de usá-lo para gerar excedentes de energia elétrica.
8A, 8B	4,38 Mt de CE		A capacidade de processamento desses cenários de produção de E2G independentes é definida como a mesma capacidade de processamento de fibras dos cenários integrados equivalentes (nesse caso, o Cenário 5).
9A, 9B	6,78 Mt de CE		A capacidade de processamento desses cenários de produção de E2G independentes é definida como a mesma capacidade de processamento de fibras dos cenários integrados equivalentes (nesse caso, o Cenário 6).

Fonte: Elaboração própria.

<sup>a</sup> Assumiu-se a hipótese de que toda a cana seria plantada entre os meses de maio e novembro (cana de ano e cana de inverno), após a colheita da última soca, de forma que toda a área agrícola sempre estará disponível para colheita em todas as safras.

<sup>b</sup> A produtividade agrícola da palha de CC considerada neste estudo foi de 140 kg (base seca) por tonelada de colmo de cana-de-açúcar.

<sup>c</sup> Equipamentos de colheita, que percorrem apenas caminhos preferenciais e compactados, e práticas de manejo adequadas tornarão possível, já no médio prazo, o início da colheita da cana energia no período de chuvas.

<sup>d</sup> MLC = Material lignocelulósico.

**Tabela 1** | Composição das biomassas utilizadas neste estudo (% mássica)

Componente	Biomassa <sup>a</sup>		
	Colmos de cana-de-açúcar	Palha de cana-de-açúcar <sup>b</sup>	Cana-energia <sup>c</sup>
Água	70,3	15,0	66,8
Sacarose	14,0	4,3	8,1
Açúcares redutores	0,6	0,2	2,5
Fibras	12,7	77,9	21,3
Celulose	6,0	32,4	10,0
Hemicelulose	3,5	24,8	5,9
Lignina	3,2	20,6	5,4
Outros	2,4	2,6	1,3

Fonte: Elaboração própria.

<sup>a</sup> Não inclui as impurezas minerais.

<sup>b</sup> Composição para a palha enfardada. A umidade da palha integral varia conforme a quantidade recolhida: 33,6 % para 50% de recolhimento; 31,3% para 60% de recolhimento; e 29,6% para 70% de recolhimento.

<sup>c</sup> Considerada composição integral (colmo + palha).

Uma vez que o sistema de produção de CE não está consolidado no Brasil, foi considerado neste estudo um sistema de produção com as mesmas operações realizadas para a CC, com utilização dos mesmos equipamentos ajustados para uma biomassa com maior produtividade. O plantio e a colheita da CE são totalmente mecanizados, porém foi considerada uma redução na velocidade operacional da colhedora (em função da maior quantidade de biomassa por unidade de área para CE) visando manter sua produtividade diária equivalente àquela obtida colhendo CC. Toda a palha produzida é recolhida junto com os colmos utilizando o sistema de colheita integral. A reposição dos nutrientes extraídos é feita com aplicação de fertilizantes minerais (nitrogênio, fósforo e potássio).

**Tabela 2** | Principais premissas adotadas para a produção de CC e CE nos diferentes horizontes temporais considerados

Cenários		0	1/4/7	2/5A/5B	3/6A/6B	8A/8B	9A/9B		
Cana (CC ou CE) <sup>a</sup>	Unidades	CC	CC	CC	CE	CC	CE	CE	
Produtividade agrícola	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	80	80	100	200	120	250	200	250
Distância de transporte	km	25	35	35	35	35	35	22,7	25,2
Longevidade	Cortes ciclo <sup>-1</sup>	5	5	5	10	5	10	10	10
Cultivo reduzido e agricultura de precisão <sup>b</sup>	% da área total	20	20	80	80	100	100	80	100
Plantio	% manual	40	20	-	-	-	-	-	-
	% mecanizado	60	80	100	100	-	-	100	-
	% ETC	-	-	-	-	100	100	-	100
Colheita	% manual com queima	30	10	-	-	-	-	-	-
	% mecanizada sem queima	70	90	100	100	-	-	100	-
	% ETC	-	-	-	-	100	100	-	100
Recolhimento de palha <sup>c</sup>	% da palha disponível	-	50	60	100	70	100	100	100
Substituição de diesel (biogás) <sup>d</sup>	% da energia utilizada nos maquinários e caminhões	-	-	70	70	70	70	70	70

Fonte: Elaboração própria.

<sup>a</sup> CC: cana-de-açúcar; CE: cana-energia.

<sup>b</sup> Considera-se agricultura de precisão não somente o uso de GPS, mas também a aplicação de insumos em taxas variáveis.

<sup>c</sup> Fardos para distâncias maiores (50% da área total) e colheita integral para distâncias menores (50% da área total).

<sup>d</sup> Percentagem máxima de substituição de diesel em motores *dual-fuel* (ciclo diesel adaptado para queima da mistura diesel-biogás). O biogás excedente é queimado em motores de combustão para produção de eletricidade.

### Sistemas industriais de conversão da biomassa

Um resumo dos principais parâmetros industriais dos cenários avaliados encontra-se na Tabela 3 e no Anexo 1. Considera-se uma redução no consumo de vapor nos horizontes temporais em razão da otimização energética. Para os cenários de médio e longo prazo, é considerado um aumento no teor

alcoólico do vinho, assim como a introdução da biodigestão da vinhaça. Na moagem da CE, considerou-se uma queda na eficiência de extração de açúcares pelo maior conteúdo de fibras. Nos cenários 2, 5A e 5B, a CE é processada na entressafra com a mesma moenda de cinco ternos que opera com CC na safra, mas com eficiência de extração menor (90%). Já nos cenários 3, 6A e 6B, a CE também é processada paralelamente à CC na safra, mas com moendas de dois ternos e eficiência de extração de 80%. As plantas 2G independentes (8A, 8B, 9A e 9B) dispõem apenas das moendas de dois ternos processando CE o ano todo, contando ainda com uma pequena planta de E1G para processar o caldo da CE, que, apesar de conter menos açúcares do que a CC, apresenta uma quantidade que não pode ser desconsiderada. O Cenário 7 compra MLC, sendo esse cenário o único com produção 2G realmente independente. Não foram considerados, na produção de E2G, os efeitos de inibidores gerados por açúcares não extraídos no bagaço da CE.

**Tabela 3 |** Parâmetros industriais dos cenários

Cenários	0	1/4/7	2/5A/5B/8A/8B	3/6A/6B/9A/9B
Produtos	Etanol e açúcar	Etanol e eletricidade	Etanol e eletricidade	Etanol e eletricidade
Tecnologia	Básica	Otimização intermediária	Otimizada	Otimizada
Pressão da caldeira	22 bar	65 bar	65 bar	65 bar
Consumo de vapor para 1G (vapor de baixa pressão)	~500 kg/TC <sup>a</sup>	~380 kg/TC	~360 kg/TC	~360 kg/TC
Teor alcoólico do vinho C6/C12 (g/l)	70	70	85	85
Processo de desidratação	Destilação azeotrópica	Peneira molecular	Peneira molecular	Peneira molecular
Biodigestão da vinhaça	-	-	DQO <sup>b</sup> : 21 kg/m <sup>3</sup> vinhaça 72% eficiência	DQO <sup>b</sup> : 21 kg/m <sup>3</sup> vinhaça 80% eficiência
Eficiência de extração da cana-energia <sup>c</sup>	-	-	5 ternos: 90% <sup>d</sup> 2 ternos: 80%	5 ternos: 90% <sup>d</sup> 2 ternos: 80%

Fonte: Elaboração própria.

<sup>a</sup> TC: Tonelada de cana-de-açúcar.

<sup>b</sup> DQO: Demanda química de oxigênio.

<sup>c</sup> Para referência, eficiência de extração de açúcar em moenda de cinco ternos de 96%.

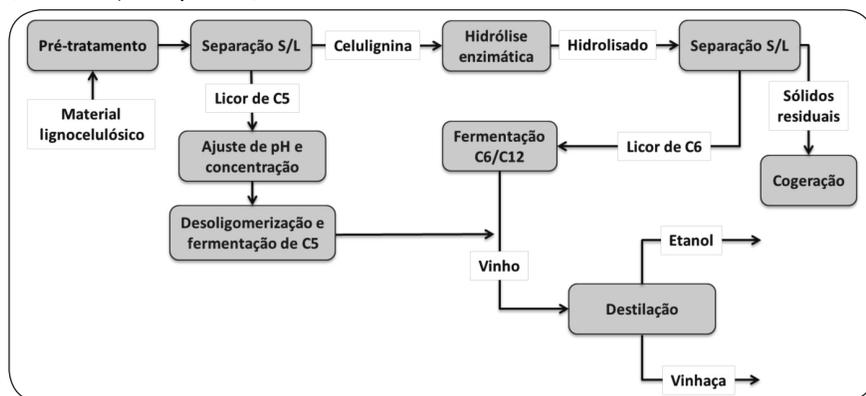
<sup>d</sup> Apenas nos cenários 2, 5, 3 e 6.

Para a produção de E2G, duas rotas tecnológicas foram analisadas: fermentação separada de C5 (xilose) e cofermentação de C5 e C6 (glicose). Na Rota A, apresentada na Figura 2, o MLC (bagaço e palha) é primeiramente pré-tratado em um processo de explosão a vapor, cujo objetivo é aumentar a acessibilidade à celulose e, dessa forma, permitir a atuação de enzimas específicas na próxima etapa. O Anexo 2 contém os principais parâmetros utilizados no pré-tratamento.

Após um processo de separação (parâmetros no Anexo 5), originam-se duas correntes: celulignina e licor de C5. A celulignina é submetida a um processo de hidrólise enzimática para liberação de açúcares (parâmetros no Anexo 2). O hidrolisado produzido é separado em duas correntes: sólidos residuais (em grande parte lignina) e licor de C6. Os sólidos residuais seguem para a cogeração para serem queimados e o licor de C6 segue para os tanques de fermentação do E1G. O licor de C5, proveniente do pré-tratamento, tem seu pH ajustado, é concentrado e enviado para a fermentação dos açúcares C5, na qual também ocorre a desoligomerização (quebra dos oligômeros) na forma de açúcares fermentescíveis (xilose e glicose). O Anexo 3 contém alguns parâmetros dessa etapa. Nesse processo, são utilizados microrganismos geneticamente modificados (OGM), que são parcialmente reciclados para compensar a diminuição por morte e a perda de eficiência.

Por fim, o vinho produzido é enviado às colunas de destilação juntamente com o vinho produzido pela fermentação do licor de C6 e do caldo da cana-de-açúcar.

**Figura 2 |** Fluxograma da rota tecnológica A para produção de etanol 2G (fermentação separada)

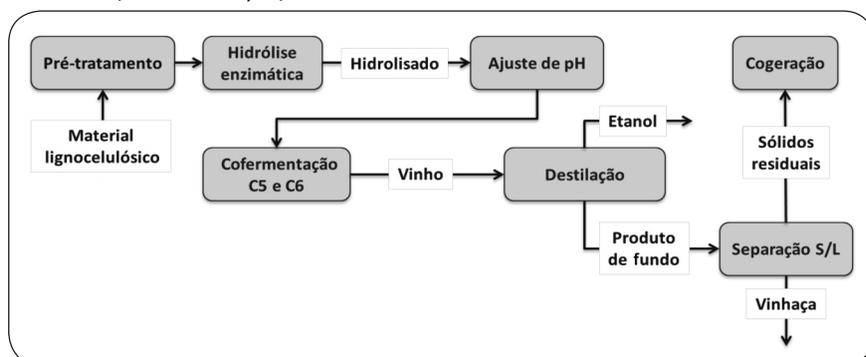


Fonte: Elaboração própria.

O fluxograma da rota tecnológica B para produção de E2G é apresentado na Figura 3. Nesse processo, os licores de C5 e C6 são fermentados conjuntamente (cofermentação). Todo MLC é pré-tratado como na rota A, mas sem a separação do licor de C5. O MLC tratado é diretamente enviado para a hidrólise enzimática. O hidrolisado resultante sofre um ajuste de pH e é fermentado com OGM, mas sem reciclo deste, em função da presença de sólidos. O Anexo 4 mostra os principais parâmetros da cofermentação.

O vinho resultante é enviado à primeira coluna de destilação. O produto do fundo é separado em vinhaça e sólidos residuais que são enviados à central de cogeração para queima.

**Figura 3** | Fluxograma da rota tecnológica B para produção de etanol 2G (cofermentação)



Fonte: Elaboração própria.

### *Metodologia para cálculo do investimento industrial*

Existem diversas metodologias que permitem estimar o custo do investimento para a implantação de uma instalação industrial [Peters *et al.* (2002); Turton *et al.* (2009)]. No entanto, sua aplicação direta e extensiva na indústria sucroenergética é limitada, dado que há poucos dados disponíveis na literatura aberta. Neste trabalho, as estimativas foram elaboradas baseadas no banco de dados de investimento contido na BVC. As informações que formam esse banco de dados foram catalogadas a partir de diferentes cotações de equipamentos, dados de custo de áreas de processo fornecidas por empresas de engenharia ou ainda de dados de especialistas do setor, da literatura e de outras fontes públicas. As tecnologias 2G, por estarem ainda em desenvolvimento, apresentam maior incerteza na estimativa de investimento.

Nesses casos, a abordagem utilizada foi gerar as estimativas baseando-se nos valores de aquisição dos principais equipamentos das áreas de processo e, com a aplicação de fatores e percentagens, foi estimado o valor total de investimento da área.

Pelas diferenças temporais e tecnológicas dos cenários, foi sempre considerado que as plantas industriais seriam executadas como projetos do tipo *greenfield*, isto é, seriam construídas sem que houvesse infraestrutura ou planta anterior. Com essa abordagem, foi possível padronizar a comparação entre os cenários, principalmente para os casos integrados, dado que não havia a necessidade de se definirem as modificações em uma planta preexistente (*brownfield*) de modo a comportar as tecnologias 2G de cada cenário.

A metodologia utilizada para gerar as estimativas de investimento foi desenvolvida de maneira modular e flexível, visando ser sensível às características tecnológicas que diferenciam os diversos cenários industriais descritos. Considerou-se a divisão da planta em dois setores: 1G+interface e 2G. O setor 1G+interface engloba as áreas de produção tradicionalmente encontradas nas plantas atuais de processamento de cana-de-açúcar, tais como recepção de cana, extração, tratamento e concentração do caldo, fermentação, destilação, geração e distribuição de vapor e energia elétrica. Sendo assim, as áreas nas quais a infraestrutura pode ser compartilhada são estimadas considerando as diferentes capacidades calculadas para cada cenário. Vale informar que o investimento em biodigestão e os custos com seguro, engenharia, urbanização, estrutura civil auxiliar, entre outros, também foram alocados nesse setor.

No setor 2G, estão as áreas de produção voltadas ao processamento do bagaço, como as áreas de pré-tratamento, separação de licor C5 e C6, propagação de OGM e fermentação de C5 ou cofermentação dos açúcares de segunda geração (C5/C6). As capacidades das áreas foram definidas de modo a suprir as necessidades da planta durante a safra e entressafra em função do processamento das diferentes biomassas em cada cenário.

De modo a acomodar a evolução temporal das tecnologias 2G e também da biodigestão, foi aplicado um desconto de 10% no investimento nessas áreas para os cenários de médio prazo e de 20% para os de longo prazo. Com isso, espera-se representar o avanço tecnológico dos fabricantes com o estabelecimento de um mercado para essas plantas e novas soluções de engenharia resultantes da curva de aprendizado. Tal abordagem

não foi estendida para as áreas 1G e de interface, dada a maturidade das operações envolvidas.

### *Análise financeira para estimativa do custo do E2G*

A análise financeira foi realizada tendo como base as premissas econômicas mostradas na Tabela 4. Considerando a projeção do estudo para os horizontes de curto, médio e longo prazos, os preços considerados são de séries históricas de uma década para o etanol anidro e açúcar. No caso da eletricidade a partir da biomassa, foram considerados os preços de leilões de energia entre os anos de 2005 a 2013. Todos os preços utilizados no cálculo das médias foram corrigidos de acordo com Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), sendo julho de 2014 a data de referência para a atualização. Para a avaliação financeira, foram assumidos cenários de produção verticalizados, nos quais os custos totais de produção das diferentes biomassas (calculadas utilizando o CanaSoft) refletem os custos de aquisição da biomassa para o processamento industrial.

**Tabela 4** | Premissas econômicas utilizadas na avaliação financeira

Preços	Valor	Referência
Etanol anidro (R\$/l)	1,34	Cepea, média móvel (2004-2014)
Eleticidade (R\$/MWh)	132,43	MME, média de leilões (2005-2013)
Açúcar (R\$/kg)	1,00	Cepea, média móvel (2004-2014)
Principais parâmetros	Valor	
Taxa mínima de atratividade (% a.a.)	12	
Horizonte de tempo do projeto (anos)	25	
Taxa de depreciação contábil (% a.a.)	10	
Manutenção anual (% Capex <sup>a</sup> )	3	
Custo da enzima – curto prazo (US\$/l etanol 2G)	0,13	
Custo da enzima – médio prazo (US\$/l etanol 2G)	0,08	
Custo da enzima – longo prazo (US\$/l etanol 2G)	0,06	
Impostos sobre a renda (IRPJ+CSLL) <sup>b</sup> (%)	34	
Data de referência (preços)	Julho de 2014	
Taxa de câmbio (R\$/US\$)	2,30	

Fonte: Elaboração própria.

<sup>a</sup>Capex: Investimento em bens de capital.

<sup>b</sup>IRPJ: Imposto de Renda – Pessoa Jurídica; CSLL: Contribuição Social sobre o Lucro Líquido.

O custo do etanol é calculado como o somatório dos custos operacionais com o custo do capital investido. Os custos operacionais estão associados ao custeio da biomassa, da manutenção, da mão de obra, das enzimas e da utilização de outros insumos (como produtos químicos diversos, leveduras, entre outros) no processo produtivo. O custo com o capital é calculado considerando o desembolso anual que seria necessário para remunerar o investimento a uma taxa mínima de atratividade de 12% ao ano por um período de 25 anos.

O custo do E2G (Custo 2G) é obtido por meio de um critério de alocação dos custos de produção. Esse cálculo é dividido em três etapas, conforme mostrado na Figura 4. Primeiramente, os custos de produção na planta de primeira geração são distribuídos entre eletricidade e E1G (Custo 1G), utilizando o critério de participação nas receitas (isto é, caso a eletricidade contribua em 20% nas receitas totais, 80% dos custos de produção serão alocados para o etanol). O custo por litro é obtido dividindo-se o custo anual alocado pelo volume de etanol produzido naquele ano.

Na segunda etapa de cálculo, o custo de produção em uma planta integrada (Custo 1G2G) é obtido utilizando-se o mesmo critério de alocação dos custos entre etanol e eletricidade. Na terceira etapa, esse custo combinado 1G2G pode ser separado entre E1G e E2G, de acordo com a participação percentual de cada um deles na receita, ou, nesse caso, por ser o mesmo produto, no volume total produzido de etanol (isto é, caso 70% da produção anual de etanol seja de primeira geração, 30% dos custos 1G2G serão atribuídos ao E2G). Sendo o custo do E1G já conhecido desde a primeira etapa de cálculo, esse valor é fixado para que seja possível a obtenção do custo somente do etanol 2G, de acordo com a equação a seguir:

$$P_{1G} \cdot C_{1G} + P_{2G} \cdot C_{2G} = C_{1G2G}$$

Em que:

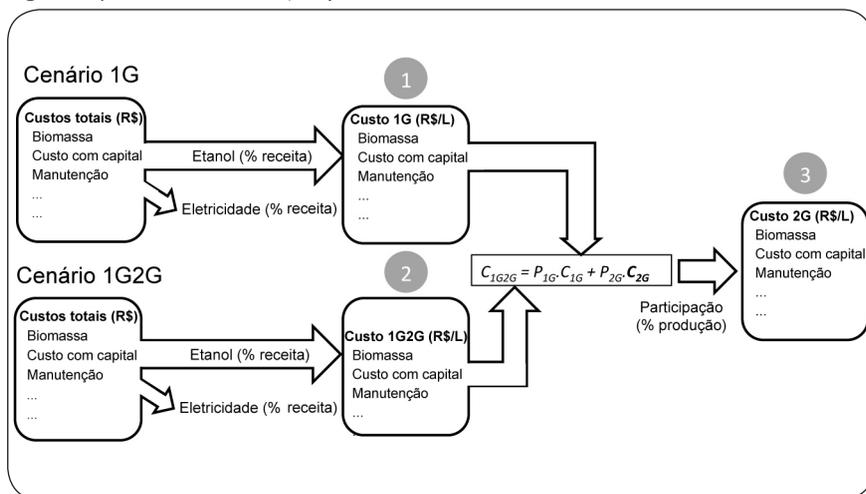
$P_{1G}$  = participação do etanol 1G na produção total de etanol (%);

$C_{1G}$  = custo de produção do etanol 1G (R\$/l);

$P_{2G}$  = participação do etanol 2G na produção total de etanol (%);

$C_{2G}$  = custo de produção do etanol 2G (R\$/l); e

$C_{1G2G}$  = custo de produção do etanol 1G2G (R\$/l).

**Figura 4** | Método de alocação para cálculo do custo do etanol

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Para os cenários 1, 2 e 3 utilizou-se apenas a etapa 1. No Cenário 7, foi usada uma abordagem semelhante à etapa 1. Para os demais cenários, são usadas as três etapas. Para o Cenário 0, foi realizada a alocação entre açúcar e etanol.

Como é possível observar na Figura 4, o preço da eletricidade interfere na alocação dos custos para o etanol. Em casos nos quais o preço da eletricidade seja consideravelmente maior que aquele considerado neste estudo, a tendência é de obtenção de menores valores para o custo do E1G, por sua menor participação no rateio dos custos. Considerando que o custo do E1G2G é menos afetado por mudanças no preço da eletricidade (em razão de seu menor excedente de energia elétrica), essa redução no custo do E1G faria com que uma parcela maior de custos fosse alocada para o E2G, aumentando seu custo.

## Estimativa dos custos do E2G nos diferentes cenários avaliados

### *Estimativa dos custos de produção da biomassa*

As premissas apresentadas na Tabela 2 foram introduzidas no modelo CanaSoft para o cálculo do custo das diferentes biomassas em cada cenário. A Tabela 5 exibe os resultados para o custo dos colmos de CC, da palha de CC e da CE (colmo e palha) para os diferentes cenários considerados neste estudo (maior detalhamento dos custos de produção pode ser encontrado no Anexo 6). É mostrada também a proporção do uso anual de cada uma dessas biomassas com base na definição dos cenários. Com o custo de cada

biomassa e a proporção de uso anual, foi calculado também o custo ponderado da biomassa, que serve como um índice relativo para comparação dos custos por cenário. Destaca-se que, pela dificuldade de se estabelecer uma base comum para a comparação dos custos para as diferentes biomassas, a proporção de uso anual e o custo ponderado são apresentados em base seca.

O custo da CE é notadamente menor que o da CC em virtude, principalmente, de sua maior produtividade e longevidade (número de cortes) em comparação com a CC. Os principais fatores que contribuem para a diminuição dos custos das diferentes biomassas com o aumento do horizonte temporal são o aumento de produtividade, a substituição parcial do diesel por biogás gerado com a vinhaça (a partir do médio prazo) e o uso da ETC para o plantio e colheita nos cenários de longo prazo.

**Tabela 5** | Custo dos colmos de CC, palha de CC e CE (colmo e palha juntos) para os diferentes cenários considerados

Cenários	Colmos de cana-de-açúcar (CC)	Palha de cana-de-açúcar <sup>a</sup> (PC)	Cana-energia (CE)	Proporção (% base seca)	Custo ponderado
	RS/t	RS/t	RS/t	CC : PC : CE	RS/t
	base úmida	base seca	base úmida		base seca
0	64,10	-	-	100 : 00 : 00	215,75
1	66,95	62,31	-	83 : 17 : 00	196,84
2	46,71	47,08	32,55	57 : 16 : 27	123,45
3	37,15	47,52	27,82	40 : 13 : 47	95,56
4	67,38	62,31	-	83 : 17 : 00	198,01
5A	47,68	47,08	32,95	57 : 16 : 27	125,63
5B	47,76	47,08	33,08	57 : 16 : 27	125,88
6A	38,37	47,52	29,05	40 : 13 : 47	98,93
6B	38,48	47,52	29,15	40 : 13 : 47	99,21
7	-	-	-	-	103,29 <sup>b</sup>
8A	-	-	29,52	00 : 00 : 100	88,87
8B	-	-	29,62	00 : 00 : 100	89,17
9A	-	-	26,36	00 : 00 : 100	79,37
9B	-	-	26,45	00 : 00 : 100	79,62

Fonte: Elaboração própria.

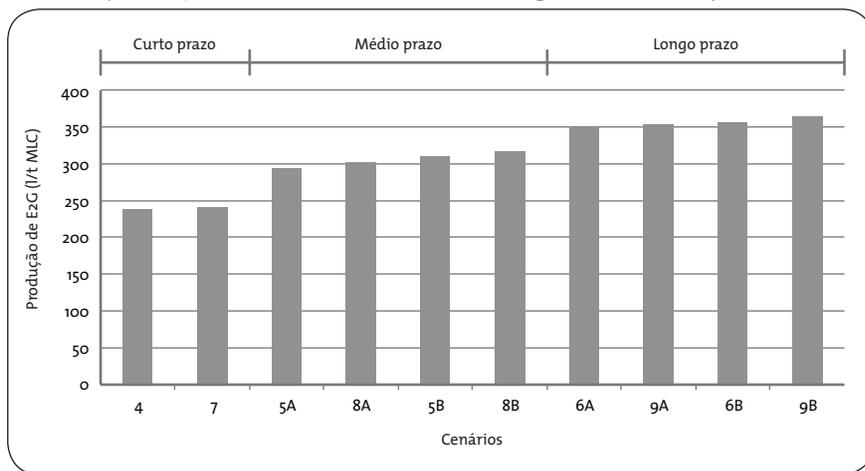
<sup>a</sup> O custo da palha é calculado como o custo adicional do recolhimento da palha em relação a um cenário idêntico, porém sem o recolhimento da palha. Mais informações em Cardoso *et al.* (2013).

<sup>b</sup> Custo de oportunidade do MLC (bagaço + palha) é considerado 60% das receitas potenciais com a eletricidade que poderia ser gerada. Avaliou-se que essa remuneração parcial reflete o investimento que seria necessário para ampliação da cogeração e da exportação de eletricidade. Essa remuneração parcial foi definida com base em critério usado para determinar o preço da cana-de-açúcar pago pelas usinas (Consecana).

### Resultados técnicos dos diferentes cenários industriais avaliados

A produção de E2G obtida utilizando como base de referência a quantidade de MLC seco enviada ao pré-tratamento é apresentada no Gráfico 2.

**Gráfico 2** | Produção de E2G nos cenários 1G2G integrados e 2G independentes



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 6, é possível observar três patamares de produção de E2G (em l/t MLC seco) coincidentes com os horizontes temporais definidos: para o curto prazo, em torno de 240; para o médio, cerca de 300; e, para o longo prazo, próximo a 350. Esses valores refletem os avanços tecnológicos considerados para o processo 2G, tais como aumento de rendimentos nas etapas de conversão e maior recuperação dos produtos nas etapas de separação sólido-líquido.

Complementarmente, na Tabela 6, é apresentada a produção global de etanol e eletricidade resultante do balanço de massa e energia do processo para os cenários avaliados.

**Tabela 6** | Produção de etanol e eletricidade para os cenários avaliados

Cenários	Etanol	Etanol	Eletricidade	Eletricidade
	(l/t cana <sup>a</sup> )	(l/t biomassa seca <sup>b</sup> )	(kWh/t cana)	(kWh/t biomassa seca)
0 <sup>c</sup>	53,6	180,4	11,5	38,7
1	84,9	235,8	174,3	484,1

(*Continua*)

(Continuação)

Cenários	Etanol	Etanol	Eletricidade	Eletricidade
	(l/t cana <sup>a</sup> )	(l/t biomassa seca <sup>b</sup> )	(kWh/t cana)	(kWh/t biomassa seca)
2	76,6	209,4	201,5	551,1
3	68,8	190,0	216,7	598,9
4	108,4	301,2	68,6	190,4
5A	116,6	318,8	70,4	192,6
5B	121,9	333,4	66,6	182,0
6A	121,1	334,7	68,0	187,9
6B	124,6	344,3	69,6	192,2
7	22,9 <sup>d</sup>	216,9	36,8 <sup>d</sup>	348,9
8A	94,0	284,9	69,6	210,9
8B	100,3	304,1	61,1	185,3
9A	99,1	300,2	70,3	213,0
9B	102,5	310,6	65,1	197,2

Fonte: Elaboração própria.

<sup>a</sup> Cana inclui CC e CE.

<sup>b</sup> Biomassa seca inclui os sólidos totais da CC, da palha e da CE.

<sup>c</sup> No Cenário 0, por ser uma usina anexa, são produzidas adicionalmente 51,4 kg de açúcar por tonelada de CC. Pela baixa produção de eletricidade, não foi considerada a exportação.

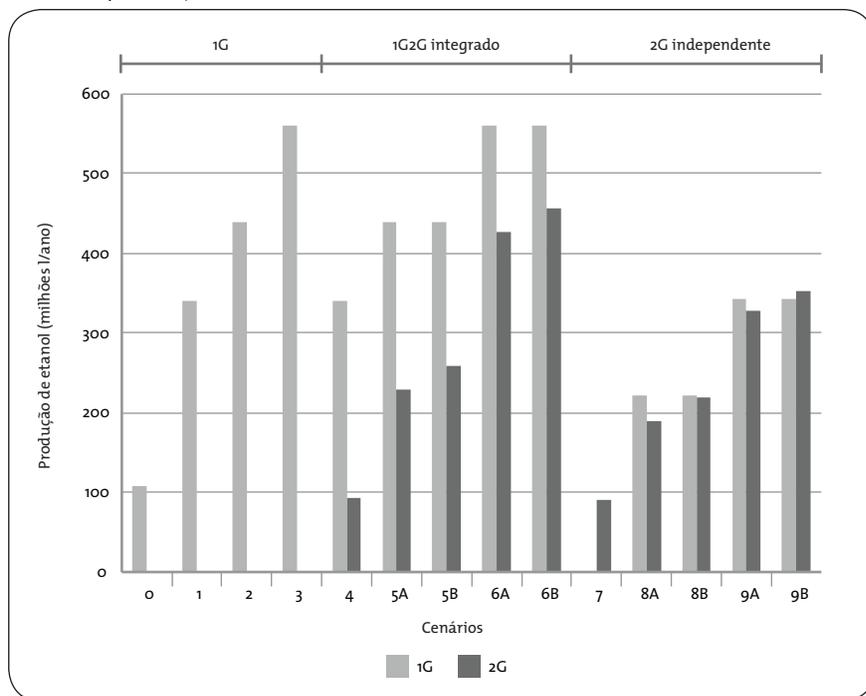
<sup>d</sup> Considerou-se a quantidade de cana processada no cenário que disponibiliza o MLC para o Cenário 7.

Na Tabela 6, observa-se grande variação na produção de etanol, em função das diferenças nas capacidades de processamento de biomassa entre os cenários e dos diferentes rendimentos do processo 2G. A inclusão de CE nos cenários 1G (2 e 3) reduziu a produção de etanol por tonelada de cana e de biomassa seca, uma vez que essa matéria-prima apresenta menor quantidade de açúcares totais. A produção de eletricidade aumenta consideravelmente com a inclusão de palha e a otimização energética da planta, o que pode ser verificado na comparação entre os cenários 1, 2 e 3 com o Cenário 0. No entanto, com a integração do processo 2G, a produção de eletricidade é reduzida expressivamente, pois todo o material disponível (aquele que excede o necessário para suprir o vapor de todo o processo) é destinado ao processo 2G, em vez de ser utilizado como combustível na etapa de cogeração de vapor e eletricidade.

Observa-se também que os cenários de cofermentação apresentam produção de etanol um pouco superior aos cenários de fermentação separada. Isso se deve principalmente às menores perdas de açúcares por não existirem etapas de separação sólido-líquido no processo 2G com cofermentação.

O Gráfico 3 exibe a produção anual de E1G e E2G para cada cenário. O Cenário 0 apresenta a menor produção de E1G, uma vez que é uma planta com menor processamento de biomassa e, além disso, destina parte do caldo à produção de açúcar. O Cenário 7 tem uma capacidade de produção anual de aproximadamente noventa milhões de litros, compatível com a planta 2G inaugurada em 2014 no Brasil [Novacana (2014)]. Nos cenários 6A e 6B, haveria maximização da produção de etanol, que poderia chegar ao patamar de um bilhão de litros em cada planta. Para os cenários 8 e 9, vale ressaltar que há produção de E1G, proveniente do caldo extraído da CE, similar à de E2G.

**Gráfico 3** | Produção anual de E1G e E2G nos cenários avaliados



Fonte: Elaboração própria.

### *Investimentos industriais para os diferentes cenários avaliados*

As estimativas de investimento para a implantação de cada um dos diversos cenários são mostradas na Tabela 7, bem como a relação do investimento com a produção total de etanol.

**Tabela 7** | Estimativas de investimentos dos cenários (valores em R\$ milhões)

Cenários	Investimento (R\$ milhões)			Produção de etanol (milhões de l/ano)			Investimento (R\$/l)
	1G + interface	2G	Total	1G	2G	Total	
0	366	-	366	107	-	107	- <sup>a</sup>
1	1.004	-	1.004	340	-	340	2,96
2	1.088	-	1.088	438	-	438	2,48
3	1.443	-	1.443	562	-	562	2,57
4	944	425	1.369	340	94	434	3,16
5A	1.048	376	1.424	438	229	667	2,13
5B	1.032	436	1.468	438	260	698	2,10
6A	1.349	437	1.786	562	427	989	1,81
6B	1.313	459	1.772	562	456	1.017	1,74
7	169	281	450	-	92	92	4,91
8A	633	289	922	221	190	411	2,24
8B	612	303	915	221	218	439	2,08
9A	899	299	1.198	343	329	672	1,78
9B	886	338	1.224	343	352	695	1,76

Fonte: Elaboração própria.

<sup>a</sup> Não foi calculada a relação (R\$/l) para o caso-base por este não ser comparável aos demais em razão da produção de açúcar.

A dispersão das estimativas de investimento reflete principalmente, além das tecnologias empregadas, as diversas capacidades de processamento dos diferentes cenários. A análise desses valores de investimento deve sempre levar em conta a descrição dos cenários, uma vez que alguns deles não são diretamente comparáveis. Porém, vale citar que não houve diferença expressiva entre os investimentos dos cenários com as rotas A ou B.

Observa-se ainda que a maior relação investimento-produção de etanol é da planta 2G independente no curto prazo, pois não há compartilhamento da infraestrutura e tem menor escala de produção de etanol. O investimento (em R\$/l) diminui ao longo do tempo em razão de maiores rendimentos e produtividades em etanol, operação durante o ano todo, aumento da escala das plantas e redução no investimento resultante da curva de aprendizado.

*Estimativa da evolução temporal dos custos do E2G*

Os resultados da análise financeira para estimativa dos custos do E2G estão agrupados na Tabela 8. Observa-se que, no curto prazo, os custos do E2G são superiores aos custos do E1G. A partir do médio prazo, há uma inversão dessa situação. As curvas nos gráficos 4a e 4b mostram esta tendência, caso as premissas assumidas nessa avaliação se concretizem. Os custos do E2G em cenários integrados e independentes, com fermentação C5 separada ou com cofermentação, apresentaram diferença muito pequena entre si, especialmente no longo prazo.

**Tabela 8** | Estimativa dos custos de produção do E1G e E2G nos diferentes horizontes temporais

	Cenários	Custo 1G (R\$/l)	Custo 2G (R\$/l)	Diferença (R\$/l)
Base	0	1,091	-	-
Curto prazo	1	1,159	-	-
	4	1,159	1,528	0,369
	7	1,159	1,475	0,316
Médio prazo	2	0,845	-	-
	5A	0,845	0,769	(0,076)
	5B	0,845	0,742	(0,103)
	8A	0,845	0,727	(0,118)
	8B	0,845	0,675	(0,171)
Longo prazo	3	0,756	-	-
	6A	0,756	0,550	(0,206)
	6B	0,756	0,521	(0,235)
	9A	0,756	0,524	(0,232)
	9B	0,756	0,521	(0,235)

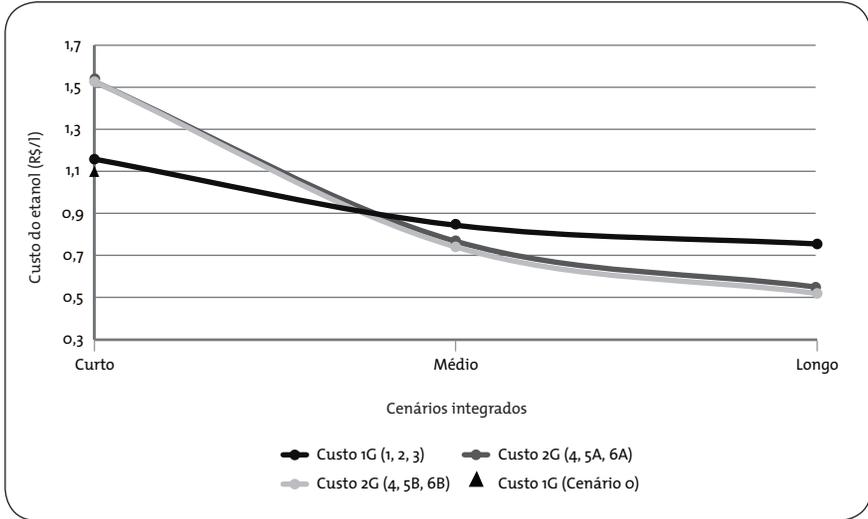
Fonte: Elaboração própria.

O custo de produção do etanol no Cenário 0 também está representado no Gráfico 4a (R\$ 1,091/l). Observa-se que esse custo ficou abaixo do custo de E1G do Cenário 1 (R\$ 1,159/l), já que a usina anexa é favorecida pela média histórica dos preços do açúcar na última década. Caso fossem considerados os preços atuais (de julho de 2014) para o etanol anidro, açúcar e eletricidade, o custo de produção do E1G no Cenário 1 seria menor que no Cenário 0, em função do critério de alocação dos custos baseados nas receitas com cada um dos produtos.

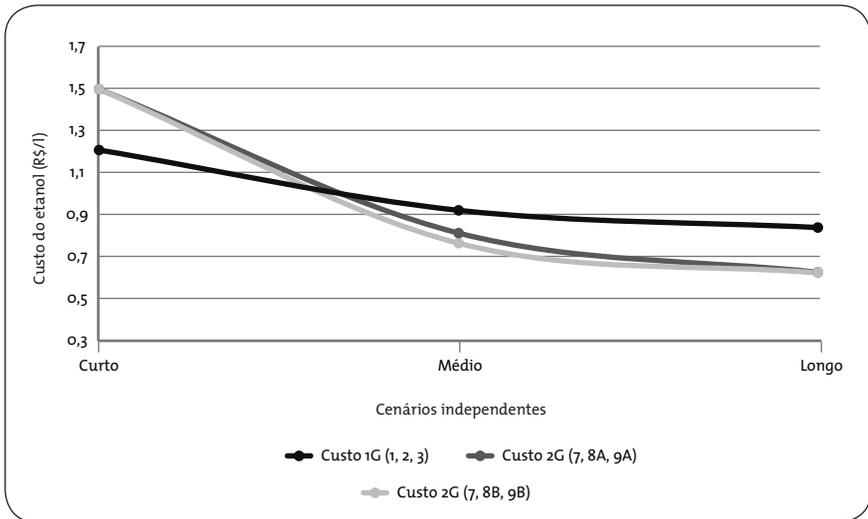
A queda observada no custo de produção do E2G (Gráfico 4) está associada à contínua redução no tempo nos custos do capital, da biomassa e das enzimas.

**Gráfico 4** | Evolução dos custos de produção do E1G e E2G

**Gráfico 4a** | Cenários integrados



**Gráfico 4b** | Cenários independentes

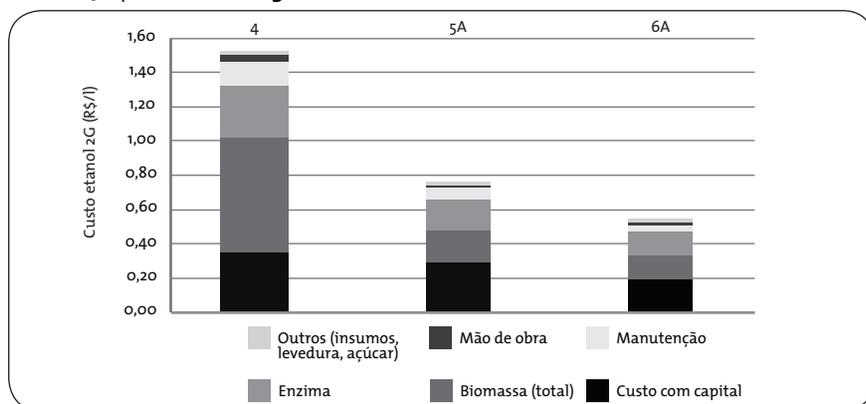


Fonte: Elaboração própria.

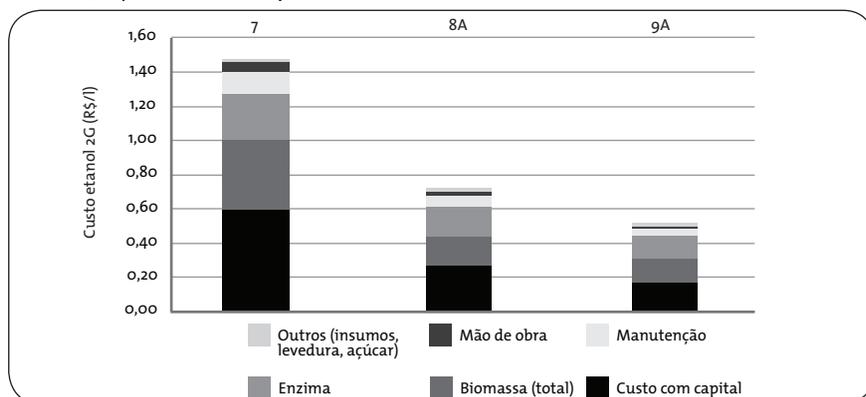
Como mostra o Gráfico 5, o custo com capital é de cerca de R\$ 0,60/l de E2G no curto prazo, sendo reduzido para patamares próximos a R\$ 0,20 no longo prazo. Essa redução é um reflexo de uma expectativa de queda gradual nos custos com equipamentos industriais e do aumento progressivo no rendimento de etanol nas plantas de segunda geração, reduzindo a relação Capex por litro de E2G produzido. Já os custos com a biomassa são reduzidos de um patamar de R\$ 0,40/l no curto prazo para aproximadamente R\$ 0,15/l no longo prazo, em razão da redução do custo de produção da biomassa nos médio e longo prazos mostrados anteriormente. A redução no custo com enzimas ao longo do tempo é uma premissa importante deste estudo, como foi mostrado na Tabela 4.

**Gráfico 5 |** Evolução dos componentes de custos de produção do E2G

**Gráfico 5a |** Cenários integrados



**Gráfico 5b |** Cenários independentes



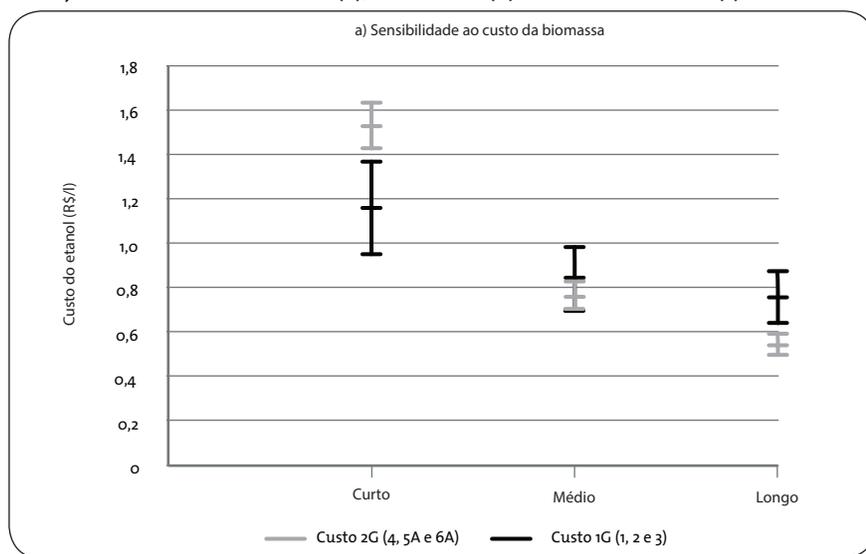
Fonte: Elaboração própria.

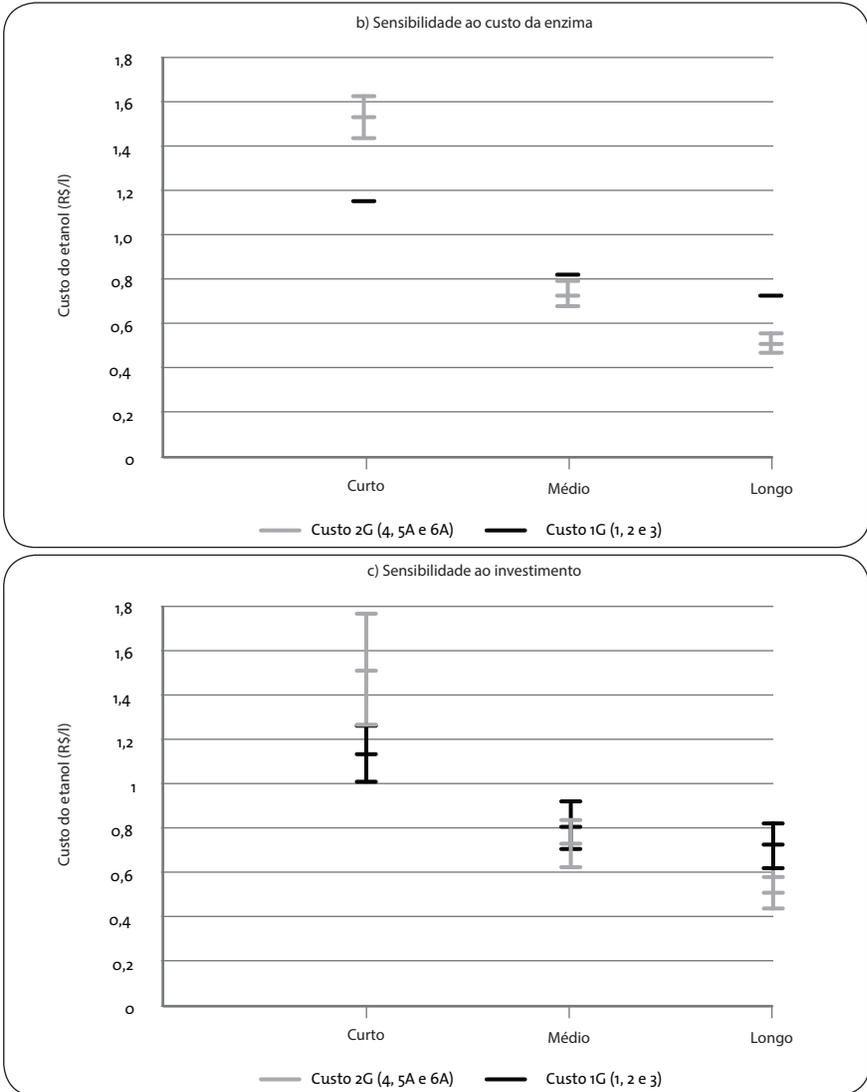
### Análise de sensibilidade na estimativa dos custos do E2G

Uma análise de sensibilidade foi realizada para mostrar o impacto de possíveis variações no custo da biomassa, das enzimas e no investimento no custo total do E2G. Foi considerada uma variação percentual de 30% em relação ao custo determinístico (calculado por meio do CanaSoft) da biomassa, ao custo estimado da enzima e ao investimento. No caso da biomassa, essa variação reflete a variabilidade histórica do preço da cana na última década.

Os gráficos 6a e 6b mostram o E1G mais sensível às variações no custo da biomassa por causa da maior participação desta em seus custos operacionais, se comparada à composição de custos do E2G. Obviamente, a sensibilidade ao custo da enzima afeta apenas o E2G, já que a produção de E1G não usa enzimas. No curto e no longo prazo, existem faixas distintas de custos de E1G e E2G, sendo que no curto prazo, sempre há predominância de custos 2G superiores e, no longo prazo, essa situação se inverte, mesmo com as variabilidades de 30% consideradas. Esse resultado mostra que, ainda que as premissas otimistas consideradas em relação à redução do custo de biomassa e enzima não se concretizem, o custo do E2G será inferior ao de E1G no longo prazo. No médio prazo, no entanto, existe certa similaridade nos custos de produção de E1G e E2G (na faixa de R\$ 0,70/l a R\$ 0,85/l).

**Gráfico 6** | Análise de sensibilidade dos custos de produção do E1G e E2G considerando variação no custo da biomassa (a), de enzima (b) e no investimento (c)





Fonte: Elaboração própria.

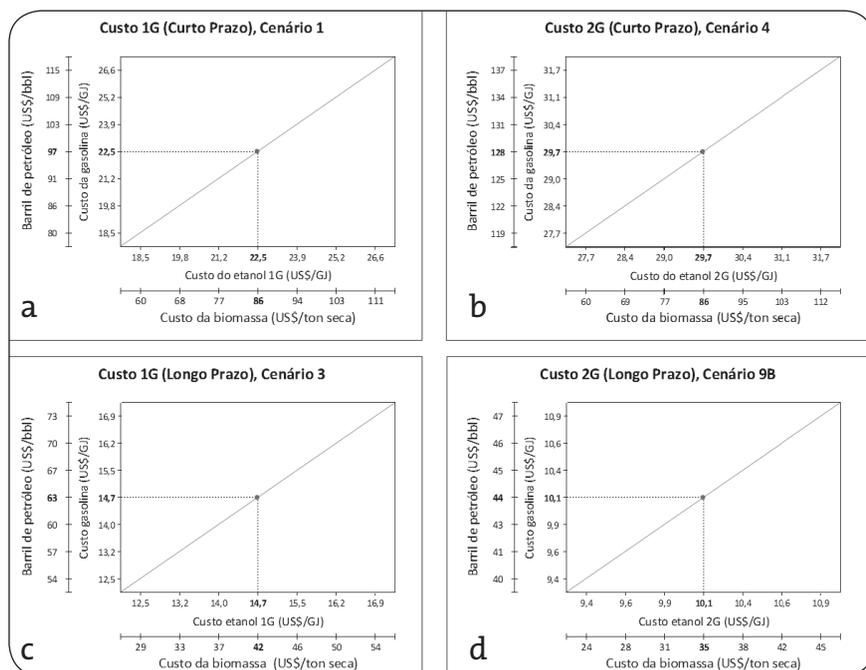
No caso da sensibilidade do custo do etanol às variações nos valores de investimento (Gráfico 6c), observa-se que o Capex interfere de forma mais acentuada no custo do E2G. Isso ocorre pela maior participação do custo com o capital na composição final do custo do E2G, se comparado ao perfil de composição de custos do E1G. Observa-se também que, no curto prazo, existe uma possibilidade de valores coincidentes de custos do E1G

e do E2G, caso haja redução simultânea de 30% no valor considerado para o investimento no Cenário 4 e um acréscimo de 30% no valor considerado para o investimento no Cenário 1. Nesse caso, o valor obtido para o E1G e o E2G seria o mesmo: R\$ 1,28/l. No longo prazo, no entanto, as faixas distintas mostram que, em teoria, não há possibilidade de semelhança de custos do E1G e do E2G. No médio prazo, os valores de E1G e E2G podem apresentar similaridade de custos na faixa de R\$ 0,75/l e R\$ 0,88/l.

### Comparação dos custos de E2G com os combustíveis fósseis

A fim de ilustrar a competitividade do etanol com combustíveis fósseis no cenário internacional ao longo do tempo, os custos de produção de etanol foram comparados com o preço do petróleo necessário para produzir gasolina com custo equivalente ao etanol anidro, em base energética (US\$/GJ). A relação entre o preço do barril de petróleo (*crude oil*, WTI) e o custo de produção da gasolina seguiu a estimativa da U.S. Energy Information Administration [U.S. EIA (2014)].

**Gráfico 7** | Evolução da competitividade do etanol com combustíveis fósseis no cenário internacional



Fonte: Elaboração própria.

Nos gráficos 7a e 7b, os custos do E1G e E2G no curto prazo são de R\$ 1,16/l e R\$ 1,53/l respectivamente, faixa que corresponde a US\$ 22,5/GJ e US\$ 29,7/GJ. Essa equivalência de preços entre etanol e gasolina só seria possível caso os preços do petróleo fossem, respectivamente, US\$ 97,0 e US\$ 128,0 por barril. No longo prazo (gráficos 7c e 7d), a redução de custos do E1G e E2G leva essa relação ao patamar de US\$ 63,0 e US\$ 44,0 por barril, respectivamente.

### **Discussão dos resultados e limitações do estudo**

As projeções apresentadas para o custo de produção de E2G estão intrinsecamente relacionadas às premissas e considerações deste estudo. Diante da variedade de possibilidades existentes de rotas tecnológicas ou ainda de matérias-primas para o processo 2G, buscou-se abranger as principais alternativas de forma que o estudo pudesse fornecer informações suficientes para embasar a formulação de políticas públicas. É importante destacar que não foi objeto deste trabalho identificar a contribuição individual das premissas na redução dos custos de produção do E1G e E2G.

A inserção da CE nos cenários de médio e longo prazos pode ser considerada otimista. Ainda existem incertezas com relação ao processo de extração do caldo de CE por seu maior teor de fibras, mas, espera-se que, no médio e no longo prazo, a eficiência de extração seja pouco inferior à da CC para uma taxa de embebição que forneça um caldo com concentração similar. Outros aspectos relevantes e passíveis de considerável incerteza são as projeções para a produtividade agrícola, o sistema de produção e a definição da composição da CE (teor de fibras, açúcares, umidade). Por outro lado, de forma conservadora, limitou-se o processamento de CE à capacidade atual de processamento de fibras das usinas de cana, o que excluiu a possibilidade de aumentar-se a escala de processamento industrial.

Com a introdução do processo 2G, espera-se aumento nos volumes gerados de vinhaça. A alta carga orgânica desse efluente pode ser um obstáculo para sua utilização direta na fertirrigação, uma vez que possíveis alterações nas regulamentações de sua disposição no campo podem ser implementadas em um futuro próximo. A biodigestão de vinhaça é uma alternativa para a redução de odores e também para a conversão de sua carga orgânica em biogás. Esse produto pode ser utilizado como combustível para geração de eletricidade ou, ainda, como substituto parcial do diesel nos maquinários

agrícolas e caminhões, uma vez que já existem alternativas disponíveis para a adaptação dos motores. Poucos estudos abordam a biodigestão da vinhaça 2G, a qual tem carga orgânica bastante variável e dependente da tecnologia utilizada. Portanto, assumiu-se, como simplificação, que a vinhaça 2G teria os mesmos rendimentos da biodigestão da vinhaça 1G. Na realidade, são esperadas maiores cargas orgânicas, mas com menores eficiências de conversão em vista da maior presença de potenciais inibidores.

A consideração de CE como matéria-prima e a utilização de biogás em substituição ao diesel apresentam impactos diretos no custo da biomassa calculado para os diferentes cenários. A biomassa, o custo de capital e as enzimas são os principais contribuintes para a composição do custo de produção do E2G. A análise de sensibilidade com variação nos custos com biomassa e enzimas indicou que a diferença entre os custos de produção do E1G e E2G pode se aproximar ou se afastar, mas que a tendência não mudaria para curto e longo prazos. Isto é, no curto prazo, o E1G teria um custo menor que o E2G e, no longo prazo, essa situação se inverteria.<sup>16</sup>

Com relação ao custo de capital, além do amadurecimento tecnológico do processo 2G, que inclui aumento de teores de sólidos e diminuição nos tempos de reação, o que reduziria a capacidade necessária dos equipamentos, considerou-se uma diminuição gradual no investimento, o qual se daria em longo e médio prazos pela maior disponibilidade de fabricantes e novas soluções de engenharia. A redução do custo de capital também é consequência do próprio aumento de rendimentos e produtividades do processo 2G, possibilitando a maior produção de E2G.

Por outro lado, deve-se ter claro que os cenários que contemplam tecnologias integradas (4, 5A, 5B, 6A, 6B) consideraram investimentos em plantas *greenfields*. Logo, de forma conservadora, ao não considerar a integração de tecnologias de E2G às usinas existentes, o artigo não faz simulações para investimentos *brownfields*, o que tenderia a diminuir o custo de capital.

Quanto às enzimas, estas podem ser produzidas na própria planta de produção de etanol, utilizando fontes de açúcar e carbono disponíveis, bem como vapor e eletricidade. Alternativamente, podem ser compradas de

---

<sup>16</sup> Diante desses resultados, é importante ressaltar que, de modo a simplificar as simulações e o processo analítico, este artigo optou por considerar apenas a CE como biomassa complementar à CC. Assim, outras biomassas com elevado potencial de produtividade agrícola e que apresentem custos semelhantes aos projetos para a CE podem igualmente surgir como alternativa nos cenários considerados.

fornecedores, os quais se beneficiam do aumento de escala, da tecnologia de produção e da mão de obra especializada. Neste estudo, considerou-se uma projeção de valores decrescentes, confirmados por fornecedores, com base na produção de E2G. Esses valores são considerados independentemente da forma de aquisição das enzimas, uma vez que ambas as alternativas provavelmente coexistirão no período considerado.

De forma conservadora, não se considerou a cofermentação de C5 e C6 no curto prazo, ainda que essa tecnologia já esteja sendo empregada nas atuais plantas de E2G. Contudo, a configuração da planta 2G (integrada ou independente; cofermentação ou fermentação separada) não apresentou impacto expressivo de modo a alterar a tendência da diferença de custo entre E1G e E2G, principalmente em vista das incertezas existentes nas premissas adotadas, em especial para os cenários de médio e longo prazos.

Com relação à produtividade industrial, a premissa de produção de 240 l/t MLC (base seca), no curto prazo, foi considerada razoavelmente conservadora por parte das empresas que participaram do estudo. Para algumas, já é possível atingir 300 l/t MLC, patamar alcançado apenas para os cenários de médio prazo. No entanto, vale ressaltar que não há informação pública quanto aos tempos requeridos em cada etapa do processo 2G, que podem ser superiores aos considerados neste estudo.

Além disso, a oferta de açúcares oriundos de biomassa representa uma grande oportunidade para a produção, em uma mesma planta, de químicos verdes e E2G. O conjunto de produtos químicos, sobretudo aqueles com diversas aplicações – mais conhecidos como *building blocks* –, compreende uma grande diversidade de opções, como o ácido succínico, butadieno, farne-seno, óleos especiais, entre outros [Bain & Company e Gas Energy (2014)]. Contudo, apesar de estar em linha com o conceito de biorrefinarias, tendência que deve consolidar-se no futuro, a produção de químicos verdes e E2G em uma mesma planta não foi considerada neste estudo.

No que tange às premissas econômicas, os modelos de composição de custo têm seus dados de entrada em moeda nacional. No caso de flutuações cambiais, o modelo não capta tais efeitos sobre a aquisição de insumos, equipamentos e demais componentes de custos do etanol brasileiro. Na comparação com o custo do barril de petróleo, a desvalorização do real em relação ao dólar estadunidense causaria redução no custo energético do etanol (US\$/GJ). Isso quer dizer que um dólar mais valorizado reduziria o

preço do etanol brasileiro em um contexto que utiliza o dólar estadunidense como referência.

Ainda sobre premissas econômicas, aumentos no preço da eletricidade elevam o custo de oportunidade do MLC, matéria-prima do Cenário 7, o que aumenta o custo do E2G. Para os demais cenários, e com base no critério de alocação aqui utilizado (Figura 4), aumentos no preço da eletricidade diminuem a alocação dos custos para o E1G, e em menor proporção, para o E1G2G. Como resultado líquido, tem-se um aumento do custo alocado para o E2G a fim de compensar a maior redução do custo alocado para o E1G.

Portanto, pode-se afirmar que, ao combinar parâmetros de maior incerteza com outros mais conservadores, o conjunto de premissas utilizado pode ser considerado equilibrado e, como conclusão principal, o estudo aponta, já no médio prazo, um grande potencial para que o E2G seja mais competitivo que o etanol convencional.

Contudo, essa evolução não ocorrerá de forma espontânea, pois boa parte dos ganhos de eficiência aqui discutida só ocorrerá em decorrência da construção de novas plantas de E2G e, conseqüentemente, do aumento de escala e redução de custos, além do maior investimento em P&D em biomassa, enzimas e equipamentos para E2G. Assim, para que tal cenário se realize, é indispensável a criação de mecanismos de política pública que estimulem o investimento no E2G, justamente o objetivo da próxima seção.

## **Sugestões de políticas públicas para o etanol 2G no Brasil**

Conforme discutido nas seções anteriores, o E2G vem sendo objeto da atenção de diversos mecanismos públicos de incentivos, tanto para seu desenvolvimento tecnológico e escalonamento produtivo, quanto para a ampliação de seu consumo e a maior inserção na matriz energética de diversos países.

No Brasil, o foco maior de apoio está na oferta de fundos para P&D. Menor atenção é posta nos mecanismos de estímulos ao consumo de E2G, o que contrasta com o que vem sendo praticado em outros países, sobretudo os EUA.

A análise do potencial de evolução do E2G demonstra que estamos diante apenas do início de sua curva de aprendizado, havendo significativas oportunidades de aumento de eficiência, sobretudo nas etapas de produção de biomassa, enzimas e equipamentos.

Ao se estimularem os investimentos em novas plantas de E2G, haveria maior incentivo para o desenvolvimento de toda a cadeia produtiva, como a instalação, no Brasil, de fornecedores de enzimas e equipamentos, o que implicaria aumento de escala e redução de custos e maior incentivo ao desenvolvimento tecnológico.

Assim, o objetivo desta seção é apresentar alternativas de políticas que tenham capacidade de, ao incentivar produção e consumo, acelerar os ganhos de produtividade oriundos do E2G e, com isso, ampliar sua participação tanto no mercado doméstico quanto nas exportações do Brasil.

### **Mandato obrigatório de mistura**

Em setembro de 2014, foi sancionada a Lei 13.033, que estabelece que o Poder Executivo poderá elevar de 25% para 27,5% o percentual obrigatório de adição de etanol anidro à gasolina, desde que constatada sua viabilidade técnica. Considerando os atuais volumes de consumo de gasolina no Brasil, esse aumento de mistura exigiria produção adicional de quase um bilhão de litros de etanol anidro.

Se apenas 10% desse volume adicional (cem milhões de litros) fosse direcionado para o consumo de etanol anidro celulósico, a produção das primeiras plantas brasileiras receberiam suficiente incentivo para distribuir seu produto localmente, evitando a exportação de parcela majoritária dessa produção. Ademais, havendo a sinalização de um aumento gradativo da parcela do anidro celulósico na mistura obrigatória, outros projetos seriam estimulados, o que poderia engendrar novo ciclo de investimentos no setor.

Adicionalmente, a meta inicial de cem milhões de litros de anidro celulósico representaria apenas 0,25% do volume atual da gasolina consumida nos postos, o que significaria que, mesmo que o litro de anidro celulósico obtivesse um prêmio de R\$ 0,50, seu impacto ao consumidor ficaria em torno de R\$ 0,00125 por litro de gasolina. Isto é, um tanque de quarenta litros poderia ser completado com custo adicional de apenas cinco centavos, pago apenas pelo consumidor de combustíveis.

Por outro lado, deveria ser evitado que parcela tão pequena de um novo aditivo à gasolina fosse obrigatória em todo o território nacional, de forma a minimizar custos logísticos. Uma eventual solução seria a concentração da mistura nos estados canavieiros que já contêm projetos de E2G implantados ou em implementação.

Contudo, ainda que se concentre geograficamente a mistura física do E2G, restaria solucionar a repartição de custos entre as distribuidoras de combustíveis. Mecanismos similares aos certificados de mistura de biocombustíveis utilizados nos EUA (Renewable Identification Number – RIN), que conferem a seu proprietário a evidência de que cumpriu a meta de consumo mandatória, poderia ser uma solução a ser analisada. Outra alternativa seria o desenho de leilões específicos para o E2G, assim como já ocorre com o biodiesel.

### **Subsídios ao consumo**

Ao contrário do mandato, a oferta de subsídios não implicaria a repartição dos custos entre as distribuidoras, pois aquelas obrigadas a misturar ou aquelas que optarem por misturar parcela de anidro celulósico seriam ressarcidas diretamente pelo governo, o que tornaria a política de incentivo mais simples e de implementação mais rápida.

Contudo, os custos seriam pagos por todos os contribuintes, e não apenas pelos usuários de veículos. Considerando o hipotético prêmio de R\$ 0,50 por litro e um consumo inicial de cem milhões de litros, a opção pelo subsídio exigiria uma despesa fiscal anual de pelo menos R\$ 50 milhões.

### **Incentivos ao investimento na produção: isenção de tributos e financiamento**

De forma a complementar o incentivo ao consumo, seria importante estabelecer medidas temporárias que facilitassem o investimento na produção do E2G, tais como:

1. isenção dos tributos federais para aquisição e importação de máquinas e equipamentos destinados a plantas para processamento de açúcares oriundos de biomassa (incluindo aquelas que produzirão E2G e químicos renováveis) e a plantas para produção de enzimas, a exemplo do que já ocorre com os benefícios concedidos através do Regime Especial de Incentivos Fiscais da Indústria Petrolífera (Repenec) e do Regime Tributário para Incentivo à Modernização e à Ampliação da Estrutura Portuária (Reporto);
2. isenção dos tributos federais para importação e aquisição internas de enzimas e leveduras, o que também seria um caso semelhante ao

Repenec e Reporto, pois poderia ser defendida a adoção do conceito de ativo biológico para os casos de produção *on-site*;

3. suspensão do Programa Integração Social e Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (PIS/Cofins) nas aquisições de biomassa celulósica, tal como já ocorre no mercado de cana;
4. extensão do crédito presumido de PIS/Cofins para o E2G por um período maior de tempo que o do E1G;
5. depreciação acelerada dos equipamentos usados na produção do E2G;
6. redução das alíquotas da Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL) para empresas produtoras de E2G; e
7. redução das alíquotas de Imposto de Renda Pessoa Jurídica (IRPJ) para empresas produtoras de E2G.

Além dos incentivos tributários, seria importante analisar a possibilidade da criação de programa federal de financiamento agrícola específico para agricultura de fins energéticos e/ou químicos que incentivasse o plantio de culturas como a cana-energia e sorgo biomassa, entre outros materiais.

Ainda com relação ao financiamento à produção, o BNDES poderia estudar a conveniência de criar incentivos para o investimento em plantas que processam açúcares oriundos de biomassa (incluindo aquelas que produzem E2G e químicos renováveis) e para plantas que produzem enzimas.

### **Financiamento contínuo à P&D aplicada (empresas e ICTs)**

As iniciativas do PAISS 1 e 2 ajudaram a despertar o interesse de empresas para as novas tecnologias fomentadas. No entanto, em razão da reduzida participação de recursos não reembolsáveis (cerca de R\$ 250 milhões em um total de R\$ 5 bilhões), boa parte dos projetos optou por utilizar biotecnologias desenvolvidas no exterior, evitando assim apostar em alternativas nacionais ainda em fase de maior risco tecnológico.

Desse modo, o aumento da oferta de recursos não reembolsáveis, tanto para instituições tecnológicas como para empresas, seria uma oportunidade única para complementar o esforço do PAISS, ao auxiliar o amadurecimento de tecnologias locais e fomentar a competição com as alternativas estrangeiras, sobretudo no que tange a:

1. coquetéis enzimáticos;

2. cepas de leveduras para fermentação de pentoses;
3. sistemas de pré-tratamento exclusivamente dedicados à biomassa de cana e previamente adaptados à integração com usinas 1G;
4. novos clones de cana-energia, sorgo biomassa e outros materiais lignocelulósicos;
5. máquinas e equipamentos especificamente desenhados para plantio e colheita de cana-energia, sorgo biomassa e outros materiais lignocelulósicos; e
6. novos microrganismos para conversão de açúcares da cana em *building blocks* químicos selecionados de acordo com seu impacto na demanda interna e potencial de exportação de produtos químicos finais.

Entre os mecanismos que poderiam ser criados ou direcionados para suportar essas iniciativas, destacam-se: (1) a priorização do Programa Nacional de Plataformas do Conhecimento e dos recursos de P&D obrigatórios da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (nos casos que envolvem cogeração de energia elétrica); e, eventualmente, (2) a criação de fundo de pesquisa específico para biocombustíveis e bioquímicos. Ademais, seria oportuno atrelar ao financiamento de P&D metas de desempenho das tecnologias que se busca desenvolver.

### **Regulamentação da biotecnologia industrial**

Entre as principais barreiras ao investimento privado em atividades de P&D que utilizam técnicas de biotecnologia avançada, destaca-se a insegurança jurídica causada pelo marco regulatório vigente no nível federal.

#### *Da Lei de Acesso ao Patrimônio Genético da Biodiversidade Brasileira*

Instituída pela Medida Provisória (MP) 2.186-16, de 23 de agosto de 2001, essa lei cria o Conselho de Gestão do Patrimônio Genético (CGEN), de caráter deliberativo e normativo, composto por representantes de órgãos e entidades da Administração Pública Federal que detêm competência sobre as diversas ações de que trata a referida MP.

Na opinião de alguns especialistas, a legislação vigente fora formulada em um período no qual a preocupação fundamental do país era se proteger contra a “biopirataria”, o crime de alguém que explora nossos recursos sem autorização. O receio principal naquele momento era de uma fuga de elementos e conhecimentos nativos para o exterior.

Apesar disso, os riscos de evasão do patrimônio genético da biodiversidade local para o exterior parecem não terem sido evitados com a atual legislação, uma vez que o controle de tais restrições legais somente pode ser aplicado em território nacional. Diante desse cenário, ainda que a intenção dessa MP seja meritória, passa a ser essencial uma reflexão sobre o referido marco regulatório e seu *modus operandi*. É necessário rever o processo estabelecido de concessão de autorizações para pesquisa com base no recurso genético da biodiversidade brasileira, evitando limitar ou mesmo coibir uma das atividades econômicas na qual o Brasil tem grande vantagem comparativa natural.

Uma proposição seria a substituição do atual processo de autorização pelo CGEN por um simples cadastro de acesso ao patrimônio genético, em um portal único, autodeclaratório por parte de seus executores, nos casos de atividades de P&D realizadas no país. Essa alternativa eliminaria um grande gargalo para a atividade de pesquisa de novos produtos e processos que usassem a biodiversidade brasileira. Para os agentes inovadores locais, seriam reduzidos a forte insegurança jurídica, os prazos de autorização excessivos e incompatíveis com suas atividades finalísticas e os riscos de penalidades severas em casos de não aderência aos requisitos legais.

#### *Do processo de fiscalização de atividades que envolvam organismos geneticamente modificados e seus derivados*

A Lei 11.105, de 24 de março de 2005, estabelece normas de segurança e mecanismos de fiscalização de atividades que envolvam organismos geneticamente modificados (OGM) e seus derivados, cria o Conselho Nacional de Biossegurança (CNBS) e reestrutura a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio), entre outras providências.

Essa lei prevê que os interessados em realizar atividades e projetos que envolvam OGM e seus derivados deverão requerer autorização da CTNBio, que se manifestará de forma expressa.

De acordo com relatos de agentes envolvidos no processo de obtenção de autorização, especificamente para a biotecnologia industrial voltada para a produção de biocombustíveis e produtos químicos a partir de biomassa, um processo de autorização de uso de determinado OGM leva, em média, dois anos. Qualquer nova variação nesse OGM já autorizado, por meio de técnicas de engenharia genética, ainda que produza um microrganismo muito

similar ao que já está aprovado, necessita de um novo processo, que leva cerca de dois anos adicionais.

Uma sugestão para tornar esse processo mais eficiente, sem comprometer a segurança do meio ambiente e da saúde pública, é a criação de atalhos no processo de análise, com trâmite simplificado para aqueles organismos classificados como Classe de Risco I, na qual se enquadram quase todas as demandas da indústria de biocombustíveis e de químicos a partir de biomassa. Sugere-se criar um mecanismo de cadastro, no qual o agente executor se responsabilize pelas informações prestadas e eventuais omissões. Com as informações prestadas, caso não haja manifestação contrária do agente regulador no prazo de noventa dias, o processo estaria automaticamente deferido. Naturalmente, a autorização não eximiria de eventuais penalidades o agente responsável pela execução, caso as informações por ele prestadas estivessem incorretas.

Outra questão frequentemente apontada como fonte dos atrasos nos processos de autorização pela CTNBio é a composição heterogênea dessa Comissão. Apesar do requisito de formação acadêmica de alto nível dos 27 representantes doutores em ciências, nem todos dispõem de conhecimentos específicos acerca do potencial econômico (e de seus desdobramentos sociais positivos) e dos riscos reais associados às atividades de pesquisa e uso de OGM em ambientes industriais. Essa carência no conhecimento técnico específico traz insegurança à própria equipe da CTNBio que, por precaução, fortalece as exigências de testes e ensaios prévios mediante pedidos de vista nos pleitos de autorização.

Para agravar a situação, os representantes que compõem a CTNBio não têm dedicação integral aos trabalhos da Comissão, ou seja, embora possam exercer função remunerada em órgãos de governo ou centros públicos de pesquisa, não são remunerados especificamente para o trabalho adicional demandado pela Comissão. Por isso, sugere-se uma reestruturação da composição dos quadros do agente regulador, com a criação de equipes técnicas especialistas, dedicadas ao tema e remuneradas para esse fim.

### *Formação de mão de obra técnica em biotecnologia industrial*

Segundo depoimento de representantes dos setores ligados à atividade de pesquisa no campo da biotecnologia industrial, o padrão acadêmico brasileiro é reconhecidamente bom nos conhecimentos básicos, alicerce de

muitas das tecnologias modernas que estão sendo desenvolvidas. No entanto, há uma carência de profissionais que detenham familiaridade com as técnicas modernas da biotecnologia avançada. Nesse campo específico, recomenda-se a articulação com o Ministério da Educação a fim de estabelecer um programa mais extensivo de educação em biotecnologia industrial, considerando ações como:

- rever a grade curricular dos cursos de biotecnologia e correlatos, à luz dos cursos mais reconhecidos internacionalmente como referência para o setor;
- priorizar programas como o Ciência sem Fronteiras para estudantes interessados em cursos de biotecnologia, considerando parceiros os países e as universidades estrangeiras com comprovada capacitação nessa área do conhecimento;
- aumentar a disponibilidade de cursos de nível técnico no campo da biotecnologia, incluindo a revisão da grade curricular para incorporar o uso de técnicas modernas de biologia sintética; e
- ampliar a integração entre escola e indústria, conferindo aos alunos prévia experiência para compreender e vivenciar os principais desafios enfrentados pelas empresas que trabalham com biotecnologia.

### *Acompanhamento e avaliação dos impactos*

Para que o impacto das políticas aqui desenhadas possa ser avaliado futuramente, é preciso monitorar a evolução tecnológica do E2G e, sempre que possível, identificar uma relação de causalidade com os instrumentos de política implementados.

Assim, seria oportuno estabelecer no Brasil um programa periódico de avaliação dos custos correntes e futuros da produção de E2G em bases experimentais, o que poderia ser viabilizado pela utilização tanto da Planta-Piloto para Desenvolvimento de Processos (PPDP) quanto da BVC, ambas localizadas no CTBE/CNPEM. Essas estruturas permitiriam validação experimental, simulação e avaliação em escala-piloto de diversas rotas tecnológicas de E2G e de químicos a partir de biomassas brasileiras.

A geração dessa referência periódica de custos, independente e qualificada, contribuirá positivamente para o desenvolvimento dessa indústria no Brasil, seja influenciando estratégias empresariais, seja subsidiando e avaliando a agenda de política pública.

Como dito anteriormente, as estimativas de custos obtidas [Humbird *et al.* (2011)] pelo NREL dos EUA vêm subsidiando, em certa medida, os principais mecanismos de incentivo ao desenvolvimento do E2G, como é o caso do mandato obrigatório de consumo de combustíveis celulósicos.

## Conclusão

Este artigo procurou demonstrar o potencial competitivo do E2G no Brasil e, com base na avaliação feita, sugeriu mecanismos de política pública capazes de acelerar sua evolução tecnológica.

O diagnóstico, baseado principalmente na estrutura analítica e no conhecimento do CTBE e apoiado em entrevistas com as principais empresas com iniciativas relevantes para E2G no Brasil, concluiu, em função das premissas assumidas, que, por conta de avanços nas etapas de produção e conversão de biomassa e da redução no custo de enzimas e equipamentos, o E2G pode ser mais competitivo que o etanol convencional e próximo do patamar de preço de barril de petróleo a US\$ 44, no longo prazo.

Com esse nível de competitividade, o E2G não seria apenas uma solução para reduzir o volume de gasolina importada pelo Brasil, mas também uma alavanca poderosa de exportações, haja vista o fato de o consumo de combustíveis avançados ser valorizado por políticas públicas nos EUA e na Europa.

Ademais, o E2G competitivo também poderia determinar um ciclo intenso de investimentos na química renovável, atraídos pelo açúcar de custo baixo proveniente da biomassa. A associação de tais produtos químicos com o E2G, não apenas contribuiria para reduzir o significativo déficit brasileiro na indústria química, mas também colocaria o Brasil como referência mundial para localização de biorrefinarias.

Contudo, essa (r)evolução não ocorrerá de forma espontânea. Boa parte dos avanços tecnológicos previstos depende, em grande medida, da ampliação dos investimentos em novas usinas de E2G. Isso implicaria maior desenvolvimento local da cadeia produtiva, com aumento de escala e redução de custos, sobretudo no que tange a biomassas com maior produtividade e conteúdo de fibras, enzimas mais eficientes e equipamentos com menor custo. Ademais, um cenário de maior inserção do E2G também implicaria maiores investimentos em P&D, outro fator determinante para o aumento da eficiência em diversas etapas de sua produção.

Portanto, a implementação de mecanismos como os sugeridos neste artigo, se bem-sucedida, cumprirá papel determinante para produzir ganhos de eficiência mais rápidos e intensos e, com isso, acelerar a difusão de um novo paradigma tecnoeconômico na indústria brasileira de cana-de-açúcar, agora baseado no conceito de biorrefinarias. O resultado final esperado é o aumento da competitividade do setor.

## Referências

- AMARASEKARA, A. S. *Handbook of Cellulosic Ethanol*. [S.I.]: Scrivener Publishing and John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- BAIN & COMPANY; GAS ENERGY. *Potencial de diversificação da indústria química: Químicos com base em fontes renováveis*. 2014. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/chamada\\_publica\\_FEPprospec0311\\_Quimicos\\_Relat4\\_Quimicos\\_de\\_renovaveis.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/chamada_publica_FEPprospec0311_Quimicos_Relat4_Quimicos_de_renovaveis.pdf)>. Acesso em: 15 dez. 2014.
- BASTOS, V. D. Biorrefinarias, biocombustíveis e química renovável: revolução tecnológica e financiamento. *Revista do BNDES*, n. 38, p. 85-138. BNDES, Rio de Janeiro, dez. 2012.
- BONOMI, A. *et al. The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB) – 2011 Report* [Internet]. Campinas: Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory (CTBE)/Technological Assessment Program (PAT), 2012. 128p. Disponível em: <<http://ctbe.cnpem.br/pesquisa/avaliacao-integrada-biorefinarias/>>. Acesso em: 15 dez. 2014.
- BRAUNBECK, O. Mecanização de baixo impacto na produção de cana-de-açúcar. *Jornal Biomassa BR*, v. 15, p. 6-10, 2014.
- CARDOSO, T. F. *Avaliação socioeconômica e ambiental de sistemas de recolhimento e uso da palha de cana-de-açúcar*. 2014. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas, 2014.
- CARDOSO, T. F. *et al.* Technical and economic assessment of trash recovery in the sugarcane bioenergy production system. *Scientia Agrícola*, v. 70, p. 353-360, 2013.

CUNNINGHAM, L. J. *et al.* *Alternative fuel and advanced vehicle technology incentives: a summary of federal programs*. [S.I.]: Congressional Research Service, j. 2013.

DIAS, M. O. S. *et al.* Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. *Bioresource Technology*, 103(1), 152-161, 2012.

DIAS, M. O. S. *et al.* Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. *Applied Energy*, 109, 72-78, 2013.

DOE-EERE – DEPARTMENT OF ENERGY – ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. *Bioenergy Technologies Office Multi-Year Program Plan – July 2014*. US Department of Energy. Jul. 2014.

GRETZ, R. *et al.* R&D subsidy games: a cost sharing approach vs. reward for performance. *J Technol Transf*, n. 37 (p. 385-403). [S.I.]: 2010. In: PEREIRA, F. S. *Comparação internacional de programas de subvenção a atividades de PD&I em Biocombustíveis*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

HUMBIRD, D. *et al.* Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. Dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. *NREL Technical Report*. Golden, CO, mai. 2011.

LUO, L. *et al.* An energy analysis of ethanol from cellulosic feedstock–Corn stover. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2003-2011, 2009a.

\_\_\_\_\_. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1613-1619, 2009b.

MILANEZ, A. Y. *et al.* O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política. *BNDES Setorial*, n. 35, p. 277-302. BNDES, Rio de Janeiro, mar. 2012.

MILLER, J. C. *et al.* *Summary of Federal Biofuel Incentives*. Sustainable Energy Research Center. Mississippi State University. Washington. 2010.

NOVACANA. *GranBio inicia produção de etanol de segunda geração*. 2014. Disponível em: <<http://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/granbio-producao-etanol-segunda-geracao-240914/>>. Acesso em: 5 jan. 2015.

NYKO, D. *et al.* A corrida tecnológica pelos biocombustíveis de segunda geração: uma perspectiva comparada. *BNDES Setorial*, n. 32, p. 5-48. BNDES, Rio de Janeiro, set. 2010.

\_\_\_\_\_. A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? *BNDES Setorial*, n. 37, p. 399-442. BNDES, Rio de Janeiro, mar. 2013a.

\_\_\_\_\_. 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*, n. 38, p. 55-78. BNDES, Rio de Janeiro, set. 2013b.

PANOUTSOU, C. *et al.* Policy regimes and funding schemes to support investment for next-generation biofuels in the USA and the EU-27. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. [S.I.]: Ed. Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons, Ltd. Ago. 2013.

PEREIRA, F. S. *Comparação internacional de programas de subvenção a atividades de PD&I em Biocombustíveis*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

PETERS, M. *et al.* *Plant design and economics for chemical engineers*. New York: McGraw-Hill Science, 2002.

PETERS, M. *et al.* The impact of technology-push and demand-pull policies on technical change – Does the locus of policies matter? *Research Policy*, v. 41, n. 8, p. 1.296-1.308, out. 2012.

PUGATCH CONSILIUM. *Building the bioeconomy: examining national biotechnology industry development strategies*. [S.I.]: abr. 2014.

RAELE, R. *et al.* Scenarios for the second generation ethanol in Brazil. *Technological Forecasting & Social Change*, n. 87, p. 205-223. [S.I.]: Elsevier, jan. 2014.

SCHNEPF, R. *Energy provisions in the 2014 Farm Bill*. [S.I.]: Congressional Research Service, mar. 2014.

STEINMUELLER, W. E. Economics of Technology Policy. In: HALL, B. H.; ROSENBERG, N (ed.). *Handbooks in Economics of Innovation*, v. 2, ch. 28. [S.I.]: Elsevier, 2010.

TURTON, R. C. *et al. Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Upper Saddle River, Prentice Hall, 2009.

U.S. EIA – UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Independent Statistics and Analysis*. 2014. Disponível em: <<http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=22&t=10>>. Acesso: nov. 2014.

WEISS, C.; BONVILLIAN, W. B. Structuring an energy technology revolution. [S.I.]: *The MIT Press*, 2009.

YACOBUCCI, B. D. *Biofuels Incentives: a summary of federal programs*. [S.I.]: Congressional Research Service, jan. 2012.

YE, F.; PAULSON, N.; KHANNA, M. Technology uncertainty and learning by doing in the cellulosic biofuel investment. In: AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS ASSOCIATION'S 2014 AAEE ANNUAL MEETING. *Anais...* Minneapolis, MN, 2014.

#### Anexo 1 | Parâmetros do processo 1G e etapa de cogeração

Processo 1G	Caso-base	Curto prazo	Médio prazo	Longo prazo
Eficiência de separação de palha na limpeza a seco (%)	-	55	65	75
Eficiência de separação de terra na limpeza a seco (%)	-	65	65	65
Eficiência de extração de açúcares (para CC) <sup>a</sup> (%)	96	95,37	95,36	95,42
Eficiência de fermentação dos açúcares C6/C12 (%)	89,5	90 <sup>b</sup>	90	90
Teor de etanol no vinho (g/l)	70	70	85	85
Eficiência da destilação (%)	99	99	99	99
Pureza do etanol anidro (% em massa)	99,6	99,6	99,6	99,6
Pureza do açúcar final (% em massa)	99,6	-	-	-
Umidade do açúcar produzido (% em massa)	0,1	-	-	-

(Continua)

*(Continuação)*

<b>Processo 1G</b>	<b>Caso-base</b>	<b>Curto prazo</b>	<b>Médio prazo</b>	<b>Longo prazo</b>
<b>Cogeração</b>				
Pressão de caldeira (bar)	22	65	65	65
Eficiência de caldeira (com base no poder calorífico inferior) (%)	75	87,8	87,8	87,8
Eficiência isentrópica da turbina de acionamento mecânico (%)	55	-	-	-
Demanda de energia mecânica – preparo e extração de CC (kWh/t CC)	14	-	-	-
Eficiência isentrópica do turbogerador (%)	70,6	83,3	83,3	83,3
Demanda de energia elétrica – processo 1G, exceto preparo e extração (kWh/t CC+CE)	12	12	12	12
Demanda de energia elétrica – preparo e extração de CC (kWh/t CC)	-	18	18	18
Demanda de energia elétrica – preparo e extração de CE (kWh/t CE) – moenda de 5 ternos	-	-	25,2	25,2
Demanda de energia elétrica – preparo e extração de CE (kWh/t CE) – moenda de 2 ternos	-	-	22,7	22,7
Demanda de energia elétrica – processo 2G (kWh/t MLC)	-	48	48	48
Eficiência do motor de combustão interna com biogás (%)	-	38	38	38

Fonte: Elaboração própria.

<sup>a</sup> Considerou-se uma redução da eficiência de extração de modo a manter a mesma concentração de sólidos solúveis do bagaço do caso-base (Cenário 0).<sup>b</sup> Na Rota A, a fermentação do licor C6 é realizada em conjunto com o caldo; neste caso, considerou-se a redução da eficiência para 88%.**Anexo 2 | Parâmetros do pré-tratamento com explosão a vapor e hidrólise enzimática (rotas A e B)**

	<b>Curto prazo</b>	<b>Médio prazo</b>	<b>Longo prazo</b>
<b>Pré-tratamento com explosão com vapor</b>			
Temperatura (°C)	190	200	210
Tempo de residência (min)	15	10	5

*(Continua)*

(Continuação)

	Curto prazo	Médio prazo	Longo prazo
<b>Pré-tratamento com explosão com vapor</b>			
Teor de sólidos (%)	Definido pela quantidade de vapor requerida para atingir a temperatura no reator		
Conversão de celulose a glicose (%)	0,5	1,0	1,0
Conversão de celulose a oligômeros de glicose (%)	3,0	3,0	3,0
Degradação de celulose a HMF* (%)	1,5	1,5	1,5
Conversão de xilana a xilose (%)	30	45	60
Conversão de xilana a oligômeros de xilose (%)	30	25	20
Degradação de xilana a furfural (%)	10	10	10
Solubilização de lignina (%)	10	10	10
Conversão do grupo acetil a ácido acético (%)	70	80	90
<b>Hidrólise enzimática</b>			
Temperatura (°C)	50	50	65
Pressão (bar)	1,0	1,0	1,0
Tempo de residência (h)	48	36	36
Teor de sólidos (%)	15	20	25
Conversão de celulose a glicose (%)	60	70	80
Conversão de xilana a xilose (%)	60	70	80
Conversão do grupo acetil a ácido acético (%)	60	70	80
Conversão de oligômeros de xilose a xilose (%)	60	70	80

Fonte: Elaboração própria.

\* HMF = Hidroximetilfurfural.

**Anexo 3 | Parâmetros da desoligomerização e fermentações para rota A (fermentação separada)**

	Curto prazo	Médio prazo	Longo prazo
<b>Desoligomerização e fermentação de C5</b>			
Temperatura (°C)	33	33	33
Tempo de residência (h)	48	36	24
Conversão de oligômeros de xilose a xilose (%)	80	90	90

(Continua)

*(Continuação)*

	<b>Curto prazo</b>	<b>Médio prazo</b>	<b>Longo prazo</b>
<b>Desoligomerização e fermentação de C5</b>			
Conversão de oligômeros de glicose a glicose (%)	80	90	90
Conversão de C6 a etanol (%)	90	90	90
Conversão de C5 a etanol (%)	80	80	85
Concentração alcoólica máxima (g/l)	70	70	70
Reciclo de células (%)	80	90	95
<b>Fermentação de C6/C12</b>			
Condições operacionais	Idênticas a 1G	Idênticas a 1G	Idênticas a 1G
Conversão de C6/C12 a etanol (%)	88	90	90
Concentração alcoólica máxima (g/l)	70	85	85

Fonte: Elaboração própria.

**Anexo 4 | Parâmetros da fermentação para rota B (cofermentação de C5/C6)**

	<b>Curto prazo</b>	<b>Médio prazo</b>	<b>Longo prazo</b>
<b>Cofermentação de C5/C6</b>			
Temperatura (°C)	33	33	33
Tempo de residência (h)	48	36	24
Conversão de C6 a etanol (%)	90	90	90
Conversão de C5 a etanol (%)	80	80	85
Concentração alcoólica máxima (g/l)	70	70	70

Fonte: Elaboração própria.

**Anexo 5 | Parâmetros das separações sólido-líquido (rotas A e B)**

	<b>Curto prazo</b>	<b>Médio prazo</b>	<b>Longo prazo</b>
<b>Separação da celulignina<sup>a</sup></b>			
Água adicionada (% de fibras de celulignina)	250	180	180
Retenção de sólidos (%)	99,5	99,5	99,5
Sólidos solúveis recuperados do licor (%)	98	98	98
Umidade da celulignina (%)	50	50	50

*(Continua)*

(Continuação)

	Curto prazo	Médio prazo	Longo prazo
<b>Separação de sólidos residuais<sup>b</sup></b>			
Água adicionada (% de fibras de celulignina)	-	-	-
Retenção de sólidos (%)	95	97	99
Sólidos solúveis recuperados do licor (%)	92	95	99
Umidade da celulignina (%)	55	50	50

Fonte: Elaboração própria.

<sup>a</sup> Após o pré-tratamento, apenas para a rota A.<sup>b</sup> Após a hidrólise na rota A e após a destilação na rota B.**Anexo 6 | Detalhamento dos custos de produção da matéria-prima para cenários selecionados**

Cenários		Cana convencional				Cana energia	
		0	1	2	3	2	3
<b>(1) Operações agrícolas</b>	<b>R\$ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup></b>	<b>1.908,79</b>	<b>2.021,06</b>	<b>1.757,11</b>	<b>1.717,39</b>	<b>1.990,44</b>	<b>2.476,47</b>
Maquinário <sup>a</sup>	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	553,89	715,77	793,87	787,25	896,23	1.204,86
Manutenção	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	266,91	338,89	376,21	358,21	454,99	547,07
Diesel <sup>b</sup>	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	323,76	386,83	124,98	133,11	170,59	208,69
Lubrificantes	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	21,94	25,49	27,66	23,87	35,35	37,34
Taxas e seguros	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	6,36	8,14	9,03	8,62	10,43	13,32
Mão de obra – oper. mecanizadas	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	145,86	175,12	186,33	167,32	184,30	226,64
Mão de obra – oper. manuais	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	590,07	370,82	239,02	239,02	238,55	238,55
<b>(2) Insumos</b>	<b>R\$ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup></b>	<b>1.134,52</b>	<b>1.133,05</b>	<b>876,06</b>	<b>775,03</b>	<b>585,73</b>	<b>514,20</b>
Mudas	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	253,00	277,10	301,19	158,13	150,60	79,06
Agroquímicos	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	135,14	119,90	104,66	104,66	106,89	106,89
Fertiliz. minerais	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	707,00	885,35	766,31	770,42	1.442,47	1.169,45
Calcário e gesso	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	39,39	39,39	39,39	39,39	19,69	19,69

(Continua)

(Continuação)

Cenários		Cana convencional				Cana energia	
		0	1	2	3	2	3
<b>(3) Transporte<sup>b</sup></b>	<b>R\$ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup></b>	<b>718,45</b>	<b>1.105,14</b>	<b>1.040,58</b>	<b>1.230,86</b>	<b>2.429,31</b>	<b>2.398,55</b>
Transporte de colmos e palha	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	482,89	719,85	685,10	877,60	1.968,12	1.816,11
Transporte de insumos	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	76,10	90,85	69,01	67,16	85,74	88,73
Transporte de resíduos industriais – vinhaça, torta de filtro e cinzas	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	159,46	294,44	286,48	286,10	375,44	493,71
<b>(4) Remuneração da terra</b>	<b>R\$ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup></b>	<b>996,25</b>	<b>996,25</b>	<b>996,25</b>	<b>996,25</b>	<b>996,25</b>	<b>996,25</b>
<b>(5) Impostos e taxas</b>	<b>R\$ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup></b>	<b>154,66</b>	<b>154,02</b>	<b>193,73</b>	<b>239,34</b>	<b>399,57</b>	<b>503,10</b>
Custo total (1 + 2 + 3 + 4 + 5)	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	4.912,67	5.409,52	4.863,74	4.958,87	6.401,31	6.888,57
<b>Divisão dos custos totais por etapa do ciclo produtivo</b>							
Reforma	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	876,65	857,43	710,15	552,25	390,30	320,45
Tratos culturais	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	1.177,77	1.284,61	1.016,65	1.016,39	1.093,31	1.205,02
Corte e carregamento e transporte	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	1.707,33	2.117,22	1.946,95	2.154,64	3.521,86	3.863,75
Remuneração da terra	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	996,25	996,25	996,25	996,25	996,25	996,25
Impostos/taxas	R\$ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	154,66	154,02	193,73	239,34	399,57	503,10
<b>Produções<sup>c</sup></b>							
Colmos	t ha <sup>-1</sup>	76,64	76,32	96,00	118,60	-	-
Palha recolhida (base seca)	t ha <sup>-1</sup>	-	4,81	8,06	11,62	-	-
Cana energia	t ha <sup>-1</sup>	-	-	-	-	196,66	247,61

Fonte: Elaboração própria.

<sup>a</sup> Inclui a depreciação e a remuneração do capital, considerando uma taxa de 12% ao ano, ao longo da vida útil de cada maquinário.<sup>b</sup> Para os cenários de médio e longo prazos, 70% do diesel é substituído por biogás.<sup>c</sup> Descontando os colmos que são utilizados como mudas na reforma do canavial.