

A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política

Artur Yabe Milanez

Diego Nyko

Marcelo Soares Valente*

Carlos Eduardo Osório Xavier

Luiz Alexandre Kulay

Cristina Guimarães Donke**

Marília Ieda da Silveira Folegatti Matsuura

Nílza Patrícia Ramos

Marcelo Augusto Boechat Morandi***

Antônio Bonomi

Daniel Henrique Dario Capitani

Mateus Ferreira Chagas

Otávio Cavalett

Vera Lúcia Reis de Gouvêia****

* Respectivamente, gerente, economista e engenheiro do BNDES.

** Respectivamente, doutorando em Economia Aplicada da Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz (Esalq)-Universidade de São Paulo (USP) e pesquisador do Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas (Pecege)-Esalq-USP; professor da Escola Politécnica da USP; e mestranda do Instituto de Energia e Ambiente da USP.

*** Pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Meio Ambiente.

**** Respectivamente, coordenador e pesquisadores do Programa de Avaliação Tecnológica do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE). Os autores agradecem as empresas entrevistadas que colaboraram para a elaboração das premissas tecnológicas. Este artigo é de exclusiva responsabilidade dos autores, não refletindo, necessariamente, a opinião do BNDES.

Resumo

A inclusão na matriz energética brasileira de um biocombustível obtido de uma nova biomassa desperta questões sobre potenciais impactos ambientais e econômicos. Desse modo, com base em entrevistas com diversas empresas e consulta à literatura disponível sobre o etanol produzido por meio da integração cana-de-açúcar-milho, este artigo objetiva avaliar o desempenho ambiental e econômico das usinas *flex*. Do ponto de vista ambiental, os resultados para as usinas *flex* não comprometem o desempenho do etanol produzido, tanto pela ótica do balanço energético quanto pela das reduções das emissões de gases de efeito estufa (GEE). O desempenho econômico, por seu turno, aponta para maior viabilidade em regiões com oferta de milho a preços baixos e demanda elevada por ração animal.

Abstract

The inclusion of a biofuel obtained from a new biomass source in the Brazilian energy matrix arouses questions about potential environmental and economic impacts. Therefore, this article aims to evaluate the environmental and economic performance of ethanol produced from sugarcane integrated with corn at flex plants. The study was based on interviews with various actors of the sector and on the data available at literature on the topic. From the environmental standpoint, the results for the flex plants do not compromise the ethanol performance, for both energy balance and reductions of greenhouse gases emission (GHG). The economic performance points to an upper viability in regions with corn supply at low prices and high demand for animal feed.

Introdução

O setor sucroenergético vem buscando cada vez mais elevar os níveis de utilização de seu parque industrial ao longo do ano. Atualmente, as usinas moem cana-de-açúcar apenas durante a safra, que normalmente pode durar até oito meses.

O meio mais usual para buscar atingir esse objetivo é o desenvolvimento de variedades de cana adaptadas para atingir produtividade economicamente viável em diferentes períodos do ano e condições de clima.

Esforços também têm sido feitos na busca de matérias-primas que possam ser processadas pelas usinas de cana-de-açúcar durante a entressafra. Entre essas matérias-primas, o setor privado vem considerando o milho como alternativa de elevado potencial.¹

O interesse privado ocorre em um cenário que apresenta, de um lado, elevada produção de milho em regiões que não contam com condições logísticas para escoamento apropriado dessa *commodity* e, de outro, estagnação de investimentos em novas usinas de etanol, cujo efeito mais deletério tem se traduzido em importações crescentes de gasolina.

Contudo, a inclusão, na matriz energética do Brasil, de um biocombustível obtido de uma nova biomassa desperta questões sobre o seu desempenho ambiental e econômico. Essa inclusão só se justificaria se os impactos ambientais e econômicos da produção desse biocombustível fossem equivalentes ou mais favoráveis que os de seus potenciais substitutos, sejam eles de fonte renovável ou fóssil.

Diante disso, o objetivo deste artigo é avaliar as dimensões ambiental e econômica da produção de etanol em uma usina que seja capaz de processar cana-de-açúcar e milho. Esse tipo de unidade é aqui denominado de usina *flex*.

¹ Atualmente, há duas usinas de pequeno porte no Mato Grosso que já processam milho e cana. Além dessas, existem apenas projetos de usinas para a Região Centro-Oeste.

Pretende-se ainda oferecer subsídios para a definição de políticas públicas que apoiem o desenvolvimento das usinas *flex* e, particularmente, para orientar uma potencial política de financiamento do BNDES.

O artigo está assim dividido: além desta introdução, a seção seguinte oferece um panorama mundial da produção de etanol, colocando ênfase nas diferenças entre o milho e a cana-de-açúcar. Na terceira seção, são apresentados os principais resultados das análises ambiental e econômica de uma usina *flex*. Na quarta seção, tais resultados são discutidos, sem perder de vista os possíveis benefícios que essas tecnologias poderiam trazer para a economia brasileira. Já na quinta seção, são sugeridas políticas públicas que possam estimular, de maneira sustentável, projetos de usinas *flex*. A última seção encerra com considerações finais.

Panorama mundial da produção de etanol

Nos últimos anos, a bioenergia vem recebendo atenção crescente em muitos países, nos campos político, econômico e técnico-científico, especialmente em razão das preocupações com as mudanças climáticas e a segurança energética. Exemplo de um produto bioenergético é o etanol derivado da cana-de-açúcar, que, no Brasil, se consolidou como importante biocombustível, substituindo a gasolina em parcela importante da demanda por combustíveis veiculares. Como resultado, a participação do etanol no consumo de combustíveis líquidos de ciclo Otto saiu de 35%, em 2002, para 55%, em 2009.²

Se, de um lado, o etanol faz parte da realidade brasileira há décadas, de outro, ainda está distante de ser relevante na matriz energética mundial. Embora venham ganhando espaço entre as alternativas aos combustíveis fósseis, os biocombustíveis ainda são pouco representa-

² Em 2009, a participação do etanol na frota de veículos *flex* atingiu seu pico histórico no período recente. Desde então, essa participação vem diminuindo em razão da estagnação da produção de etanol. Em 2013, essa participação atingiu cerca de 40% da frota.

tivos. A sua produção em larga escala depende fundamentalmente de avanços na produtividade, de forma a mitigar eventuais efeitos negativos, como possíveis pressões sobre o preço de *commodities* agrícolas.

Estimativas da Renewable Fuels Association (RFA)³ indicam que, em 2012, a produção mundial de etanol foi de 82,5 bilhões de litros. Desse total, Estados Unidos e Brasil – hoje, os dois maiores produtores do mundo – responderam, respectivamente, por 61% e 26%. Nos Estados Unidos, o milho é a principal matéria-prima para a produção de etanol, que, em 2012, representou 10% da demanda por combustível veicular naquele país. No Brasil, como visto, a cana-de-açúcar desempenha esse papel.

Nesse contexto, a adoção comercial dos biocombustíveis depende da avaliação de parâmetros amplos de eficiência [BNDES e CGEE (2008)], considerando diversos critérios econômicos, sociais, ambientais e estratégicos, como a segurança energética nacional. Assim, para ser usada como fonte de bioenergia, a biomassa escolhida precisa ter características capazes de atender a esses critérios. Segundo Souza *et al.* (2013), as características da biomassa ideal incluem: alta produtividade agrícola, curtos ciclos produtivos, baixo consumo energético, baixo custo de produção, baixos níveis de contaminantes e baixa demanda por nutrientes. Ainda na visão dos autores, para dirimir as críticas sobre os biocombustíveis, é importante que a biomassa tenha balanço de carbono favorável quando mensurado por avaliações de ciclo de vida (ACV), que consideram toda a cadeia de produção e o uso dos biocombustíveis. Por sua vez, BNDES e CGEE (2008) destacam a importância de apresentar um balanço energético positivo.

Comparando essas características entre diversos tipos de biomassa, os autores constataam que a cana-de-açúcar é, atualmente, a fonte mais promissora para a produção de biocombustíveis (Tabela 1), ainda que necessite de mais água ou tenha um ciclo de colheita superior ao da maioria das biomassas da comparação.

³ Para mais detalhes, conferir: <<http://ethanolrfa.org/pages/World-Fuel-Ethanol-Production>>. Acesso em: 2 jan. 2014.

Tabela 1
 Comparação de diferentes matérias-primas para a produção de bioetanol
 e de plataformas de biocombustíveis

Características das culturas	Matérias-primas fontes de combustíveis							
	Sacarose da cana-de-açúcar	Sacarose da beterraba	Sacarose do sorgo	Amido de milho	<i>Miscanthus</i> lignocelulósico	<i>Switchgrass</i> lignocelulósico	Alamo lignocelulósico	Salgueiro lignocelulósico
	12-18	5-11	4-6	4	10-12	2-7	36-480	36-60
Ciclo de colheita (meses)								
Rendimento (t ha ⁻¹)	80 ^a	60,8 ^a	35	8,65	25-41	10-20	2,95-9,1	4,12-10,5
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	65	255	140-280	153	60-104	120-180	95-276	40-130
Fósforo (kg ha ⁻¹)	52	160	30-60	65	13	12	11-36	0-34
Potássio (kg ha ⁻¹)	100	65	60-120	77	78	118	88-171	0-155
Necessidades de água (mm colheita de ciclo ⁻¹)	150-250	64,7-88,5 ^b	15-77	50-80	75-120	81	70-105	109-180
Entrada de energia (kcal x 1,000 ha ⁻¹)	13,5-19	40-100	85-300	2,4-19	250-550	150-500	150-250	4.000
Custos de colheita (US\$ ha ⁻¹)	2,200-2,650	237-321	407	917	1,025-2,380	230	57,5-346 ^b	1,479-3,905
Características quanto a biocombustível produzido	6,000-7,000	5,400	1,440	3,800	4,600-12,400	5,000	1,500-3,400	792-2,574 ^b

Fonte: Elaboração própria, com base em Souza *et al.* (2013).

^a Com base no peso úmido (cana = 70% de água, beterraba = 85% de água).

^b Valores de referência.

Sem ter a pretensão de discutir exaustivamente as vantagens e desvantagens de grãos e cana-de-açúcar como matérias-primas para etanol, BNDES e CGEE (2008) resumem didaticamente os principais pontos de comparação (Quadro 1).

Quadro 1

Panorama geral das biomassas para a produção do etanol

Matéria-prima	Redução na emissão de GEE	Custo de produção	Produção de biocombustível por hectare	Terras utilizadas
Grãos (trigo, milho)	Moderado a baixo	Moderado	Moderado	Terras férteis
Cana-de-açúcar	Alto	Baixo	Alto	Terras férteis

Fonte: Elaboração própria, com base em IEA (2005) *apud* BNDES e CGEE (2008).

Em primeiro lugar, a cana-de-açúcar é muito mais produtiva do que o milho em termos de etanol por unidade de área. Enquanto chega a produzir cerca de sete mil litros de etanol por hectare, o milho produz apenas quatro mil litros. Essa maior produtividade da cana-de-açúcar traduz-se em custos de produção de etanol mais baixos, mesmo com um ciclo de colheita superior ao do milho.

No período de entressafra, a cana-de-açúcar não pode ser processada, já que não é possível estocá-la. Isso não ocorre com o milho, que pode ser estocado ao longo do ano.

As duas biomassas também têm diferenças em relação aos co-produtos que delas derivam. Além do etanol, a cana-de-açúcar dá origem ao açúcar e à energia elétrica, produzida com base no bagaço oriundo da moagem (e, em alguns casos, também da palha). Essa flexibilidade de produção tem valor estratégico para as usinas de cana-de-açúcar, na medida em que permite a elas capturar valor em diferentes mercados, a depender dos preços relativos.

O milho, por sua vez, dá origem ao etanol e a outros produtos alimentícios, como óleo e proteínas para ração animal (DDG e DDGS).⁴ Segundo RFA (2013), para cada unidade de milho processada em etanol, um terço retorna para o mercado de nutrição animal. A usina produtora de etanol americana, entretanto, não é autossuficiente em termos energéticos, tal como a brasileira. Ainda segundo RFA (2013), enquanto o etanol de milho disponibiliza entre 1,9 e 2,3 unidades de energia para cada unidade de energia fóssil usada em sua produção, o etanol de cana-de-açúcar pode disponibilizar até nove unidades de energia para cada unidade de energia fóssil usada em sua produção [BNDES e CGEE (2008); Macedo, Seabra e Silva (2008); Wang *et al.* (2012)]. Tal fato confere vantagem ambiental e econômica ao etanol de cana-de-açúcar.

Essas vantagens do etanol de cana-de-açúcar são reconhecidas até mesmo pela legislação dos Estados Unidos. Em 2007, foi lançado o Energy Independence and Security Act (EISA), que criou principalmente disposições destinadas a aumentar a eficiência energética e a disponibilidade de energia renovável no mercado estadunidense. O EISA alterou o Renewable Fuel Standard (RFS) de 2005. Conhecida como RFS2, a legislação de 2007 estabeleceu metas mínimas anuais (até 2022) de consumo de biocombustíveis utilizados exclusivamente para o transporte nos Estados Unidos. O RFS2 determinou que deveriam ser consumidos não apenas biocombustíveis convencionais, como o etanol de milho, mas tam-

⁴ DDG, ou *dried distillers grains*, são coprodutos do processo de produção de etanol. Dependendo do tipo de processo, pode-se chegar ao DDGS, ou *dried distillers grains with solubles*. Para gerar o DDGS, a fração líquida que é separada do mosto durante o processo de destilação é parcialmente desidratada e, em seguida, o xarope resultante é adicionado ao DDG. Esses produtos podem funcionar, portanto, como ração de alta qualidade para bovinos, suínos, aves e peixes. Essa ração pode ser uma alternativa econômica ao milho e ao farelo de soja, entre outros.

bém biocombustíveis avançados, como os celulósicos e o diesel de biomassa. Essa classificação é definida por meio de critérios de redução de gases de efeito estufa (GEE). Assim: (i) biocombustível tradicional é definido como etanol derivado de amido de milho capaz de reduzir as emissões de GEE em, pelo menos, 20%, quando comparado ao substituto fóssil; e (ii) biocombustíveis avançados são aqueles combustíveis renováveis (excluído, entre outros, o etanol de amido de milho), derivados de biomassa renovável e capazes de reduzir as emissões de GEE em, pelo menos, 50%, em relação ao substituto de origem fóssil.

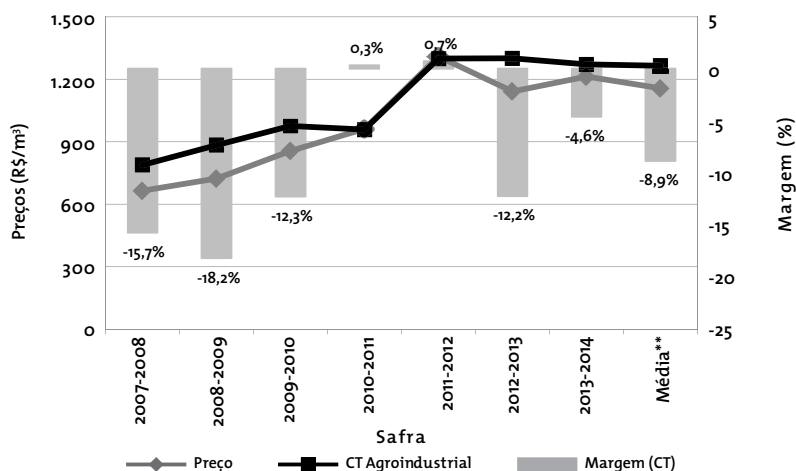
Segundo a Environmental Protection Agency (EPA), a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, o etanol de milho reduz as emissões de GEE em apenas 21%. Já o etanol de cana-de-açúcar reduz tais emissões em 61%, o que o caracteriza como biocombustível avançado.

Nesse contexto, a integração da cultura da cana-de-açúcar, com safra de até oito meses, com outras culturas energéticas, como a do milho, poderia ampliar a sustentabilidade do etanol brasileiro como bioenergia. A usina *flex*, capaz de processar milho e cana-de-açúcar usando como fonte de energia somente o bagaço (e, no futuro, a palha) da cana-de-açúcar, poderia auxiliar o setor sucroenergético a superar o atual contexto adverso, de baixos níveis de rentabilidade do etanol, especialmente aquele produzido pelas agroindústrias instaladas na Região Centro-Oeste do Brasil (Figura 1).

Esse fato, evidente nesse último ciclo de produção canavieira, vem reduzindo o ímpeto por investimentos na construção de novas usinas na região. Ao mesmo tempo, essa conjuntura deflagrou intensa busca por inovações com potencial de trazer aumento nos níveis de rentabilidade dessas jovens empresas, como a integração do processamento de milho às usinas de cana-de-açúcar já estabelecidas.

Figura 1

Evolução de custos totais econômicos (CT), preços e margem de rentabilidade da produção de etanol hidratado na região de expansão



Fonte: Pecege/CNA (2014).

O crescimento recente da produção de milho-safrinha, tradicional produto agrícola da Região Centro-Oeste cultivado em rotação com a cultura da soja, fomentou o aprofundamento de análises sobre a adaptação das tecnologias de produção de etanol de milho, já amplamente adotadas nos Estados Unidos. Uma forte motivação para essas análises parte das oportunidades de preços competitivos para aquisição da matéria-prima, assim como do aproveitamento da infraestrutura da usina ociosa na entressafra de cana-de-açúcar. Além disso, a grande quantidade de áreas de produção de soja ainda não utilizadas para produção de milho-safrinha (Tabela 2) indica um amplo potencial de aumento da produção regional, caso se desenvolva um mercado consumidor local mais estável, em que os preços remunerem os custos de produção da lavoura.

A região destaca-se, historicamente, como um mercado secundário, com excedente de produção de milho, em que os níveis de

produção mostram amplas oscilações em função dos níveis de preços definidos pelo mercado internacional. Como os custos logísticos de escoamento do excedente de produção local são altos e o milho tem baixo valor agregado, a produção regional é atrativa economicamente apenas em períodos de altos preços internacionais do produto, como em 2012, quando, segundo Agência Brasil (2013), a quebra de safra nos Estados Unidos permitiu um aumento de 27,2% da produção brasileira e 101,5% da produção mato-grossense de milho.

Tabela 2

Potencial de área e produção de milho-safrinha na Região Centro-Oeste

Unidade da federação	Área de soja (mil ha)	Área de milho-safrinha (mil ha)	Diferença entre área de soja e de milho-safrinha (mil ha)	Produtividade do milho-safrinha (kg/ha)	Potencial de aumento de produção de milho-safrinha (mil t)
	(a)	(b)	(a - b)	(c)	c (a - b)
Mato Grosso	8.131	3.349	4.782	5.780	27.639
Mato Grosso do Sul	2.078	1.461	617	5.100	3.144
Goiás	3.032	779	2.254	5.160	11.630
Total	13.241	5.589	7.652	5.516	42.413

Fonte: Conab (2013).

Com esse panorama em mente, a seguir são realizadas as análises ambiental e econômica sobre os vários cenários tecnológicos potenciais para a integração dessas duas culturas em uma usina *flex*.

Análises ambiental e econômica

A construção dos cenários agrícolas e industriais

Os estudos de desempenho econômico e ambiental das usinas *flex* consideraram um único cenário agrícola para cada uma des-

sas matérias-primas (Quadro 2) e oito diferentes cenários industriais (Quadro 3).

Quadro 2

Cenários agrícolas para cana-de-açúcar e milho

Cenário agrícola	Cana-de-açúcar ^a	Milho ^b
Produtividade	80 t ha ⁻¹ (de área colhida)	6 t ha ⁻¹
Ocupação do solo	• 12 meses por ano • Ciclo de seis anos (plantio + cinco cortes)	• Quatro meses por ano • Milho-safrinha, cultivado na entressafra da soja, entre os meses de fevereiro e junho
Descrição tecnológica	• Preparo de solo convencional • Plantio e colheita mecanizados • Sem queima pré-colheita • Sem recolhimento de palhada • Fertilização típica, com NPK e vinhaça • Calagem • Controle químico de pragas	• Plantio direto • Sem recolhimento de palhada • Alta mecanização das operações agrícolas • Calagem • Fertilização nitrogenada e potássica • Controle químico de pragas
Distância de transporte do campo à usina	30 km	70 km

Fonte: Elaboração própria.

^a O inventário da produção de cana-de-açúcar foi processado com o auxílio do modelo CanaSoft [Bonomi *et al.* (2012)], ferramenta desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE/CNPEN).

^b O inventário da produção de milho baseou-se no estudo de Donke *et al.* (2013).

Os cenários industriais foram divididos em básicos – que buscam representar a tecnologia das usinas de cana-de-açúcar construídas durante o Proálcool e que continuam em operação – e otimizados – que buscam representar as usinas modernas, com tecnologia atual e venda de excedente de energia elétrica.

Na entressafra da cana-de-açúcar, existe a possibilidade de operação de parte da estrutura da usina para o processamento de milho, por até

120 dias. A produção de etanol de cana e milho em uma estrutura compartilhada caracteriza as usinas *flex* (cenários C2a, C2b, C4, C5 e C6).

Outra possibilidade é a existência de uma planta paralela para a produção de etanol de milho, que compartilha apenas as utilidades (vapor e energia elétrica) disponíveis em uma usina de cana-de-açúcar, com potencial para operar durante toda a safra e entressafra (C7).

O fluxograma de uma usina destinada ao processamento exclusivo de cana-de-açúcar (C3) é mostrado no Anexo 1 e, para uma usina *flex* (C4), no Anexo 2.

Quadro 3

Cenários industriais

Cenário industrial	Tecnologia	
	Cana-de-açúcar ^a	Milho ^b
CI 1	Autônoma básica	-
CI 2a	• Processamento de 625 t cana/h • Caldeira de 22 bar • Sem venda de energia elétrica • Moendas com acionamento a vapor	• Planta <i>flex</i>, com processamento de milho apenas na entressafra • Retirada de sólidos após a fermentação
CI 2b	• Desidratação com coluna azeotrópica • Produção de etanol hidratado e anidro (1:1, em volume)	• Planta <i>flex</i>, com processamento de milho apenas na entressafra • Retirada de sólidos após a fermentação • Uso de cavaco como fonte complementar de energia
CI 3	Autônoma otimizada	-
CI 4	• Processamento de 625 t cana/h • Caldeira de 65 bar • Com venda de energia elétrica • Moendas com acionamento elétrico • Otimização energética	• Planta <i>flex</i>, com processamento de milho apenas na entressafra • Retirada de sólidos após a fermentação • Sem aproveitamento dos sólidos solúveis (produção de DDG)
CI 5	• Desidratação com peneira molecular • Produção de etanol hidratado e anidro (1:1, em volume)	• Planta <i>flex</i>, com processamento de milho apenas na entressafra • Retirada de sólidos antes da fermentação • Sem aproveitamento dos sólidos solúveis (produção de DDG) • Reciclo de células

(Continua)

(Continuação)

Cenário industrial	Tecnologia	
	Cana-de-açúcar ^a	Milho ^b
CI 6		• Planta <i>flex</i>, com processamento de milho apenas na entressafra • Retirada fracionada de coprodutos • Com aproveitamento dos sólidos solúveis
CI 7		• Planta paralela de milho, com processamento na safra e na entressafra • Retirada de sólidos após a fermentação • Com aproveitamento dos sólidos solúveis (produção de DDGS)

Fonte: Elaboração própria.

^a Descrição dos cenários básico e otimizado para cana-de-açúcar baseado em Bonomi *et al.* (2012), Cavalett *et al.* (2012) e Dias *et al.* (2012).

^b A descrição dos cenários industriais para o milho baseou-se nas entrevistas com empresas e especialistas do setor.

A tecnologia de processamento de etanol de milho difere quanto à etapa de remoção de sólidos do “caldo” – que pode ocorrer após a fermentação, obtendo-se como coproduto o DDG (C2a, C2b e C4) ou o DDGS (C7); antes da fermentação (C5); ou em várias fases do processo, obtendo-se diversos coprodutos (C6); no consumo energético; e nos rendimentos obtidos. Na Tabela 3, são apresentados os rendimentos industriais considerados para cada um dos cenários avaliados, bem como os dias de operação e as quantidades processadas de cada matéria-prima. As limitações quanto às informações dos processos industriais de processamento de milho usadas neste estudo derivam do fato de terem sido obtidas por meio de entrevistas com representantes do setor. Alguns desses processos ainda não são efetivamente praticados no Brasil e, dessa forma, as informações merecem um processo de validação para determinação de sua incerteza.

Tabela 3

Resumo dos principais parâmetros industriais selecionados para os diferentes cenários tecnológicos avaliados

Cenários	Básicos			Otimizados				
	C1	C2a	C2b	C3	C4	C5	C6	C7
Produtos								
Etanol hidratado – cana	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9
Etanol anidro – cana	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2
Energia exportada – cana	-	-	-	95,5	27,8	27,8	27,8	27,8
Etanol hidratado – milho ^a	-	194,2	194,2	-	194,2	177,8	209,8	195,8
Etanol anidro – milho ^a	-	192,4	192,4	-	192,4	176,0	207,9	193,9
DDG – milho	-	280,0	280,0	-	280,0	309,4	-	-
DDGS – milho	-	-	-	-	-	-	-	285,6
Produtos fracionados	-	-	-	-	-	-	192,8	-
Energia exportada – milho	-	-	-	-	220,3	125,4	298,0	82,8
Quantidade de matéria-prima processada no ano								
Cana	t _{cana} /ano	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000

(Continua)

(Continuação)

Cenários	Básicos			Otimizados			
	C1	C2a	C2b	C3	C4	C5	C7
Dias de processamento dias/ano com cana	200	200	200	200	200	200	200
Capacidade horária de processamento de cana t_{cana}/h	625	625	625	625	625	625	625
Milho t_{milho}/ano	-	154.543	394.828	-	394.141	369.865	541.971
Dias de processamento dias/ano de milho	-	47	120	-	120	103	320
Capacidade horária de processamento de milho t_{milho}/h	-	137	137	-	137	150	71
Produção anual							
Etanol hidratado m^3	131.609	161.617	208.275	131.609	208.141	197.370	237.700
Etanol anidro m^3	129.676	159.407	205.633	129.676	205.501	194.788	234.787
Energia exportada GWh	-	-	-	286,4	170,4	129,9	128,4
DDG $10^3 t$	-	43,3	110,6	-	110,4	114,4	-
DDGS $10^3 t$	-	-	-	-	-	-	154,8
Produtos fracionados $10^3 t$	-	-	-	-	-	-	72,0

Fonte: Elaboração própria.

^a O consumo de açúcares para o crescimento da levedura foi considerado quando estabelecido o rendimento de produção de etanol.

Os seguintes pressupostos foram assumidos para a caracterização das usinas *flex* (C2a, C2b, C4, C5 e C6):

- Os sistemas de destilação e desidratação permaneceram inalterados, independentemente da matéria-prima processada (cana-de-açúcar ou milho), não sendo considerada a necessidade de adaptação da primeira coluna para remoção dos sólidos, por razões de simplificação. A capacidade do sistema para destilação e desidratação do etanol de milho definiu a quantidade máxima de milho processada por hora.
- Definida a quantidade máxima de milho processada por hora, a quantidade de bagaço acumulada durante o processamento de cana-de-açúcar determinou o número de dias do processamento subsequente de milho (exceto para o C2b, que opera durante toda a entressafra, usando cavaco de madeira como combustível complementar ao bagaço).
- O sistema de cogeração também permaneceu inalterado, para o processamento de ambas as matérias-primas. O sistema de cogeração foi dimensionado para a queima de bagaço durante o processamento da cana-de-açúcar, com geração de energia elétrica excedente para venda, nos cenários otimizados.⁵
- Em alguns cenários, o número de fermentadores variou, sendo ampliado para atender ao processamento de etanol de milho, para o qual o processo de fermentação é mais demorado.

Para o cenário C7, a quantidade de milho processada por hora foi determinada conforme a disponibilidade de bagaço, de forma a possibilitar a operação da planta de milho por 320 dias.

⁵ Nos cenários otimizados, é considerada a existência das turbinas de condensação no sistema de cogeração, mesmo que sem uso efetivo quando do processamento de milho na entressafra.

A seguir, serão apresentadas as avaliações econômica e ambiental dos cenários descritos anteriormente.

Avaliação ambiental

Embora muitas categorias de impacto devam ser consideradas em uma avaliação de desempenho ambiental de um biocombustível, o foco dessa análise é o balanço energético e de emissões de GEE.

Os benefícios do uso de um biocombustível dependem da magnitude relativa do consumo e da economia de combustíveis fósseis na sua produção e no uso [Malça e Freire (2006)], isto é, do seu balanço energético. Em outras palavras, o balanço energético pode ser definido como a proporção de energia não renovável usada na produção de uma unidade energética do produto principal e de seus coprodutos [Batchelor, Booth e Walker (1995); Lopes (2006)].

O balanço energético de um combustível pode também ser entendido como a relação entre a energia consumida e a disponibilizada em determinado sistema, para cada unidade de produto [Costa e Lora (2009)]. Para chegar ao balanço energético, é necessário analisar sistematicamente os principais fluxos de energia nos processos produtivos envolvidos no ciclo de vida do combustível [Nogueira (1987); Lopes (2006)].

O balanço de GEE é outro importante indicativo de desempenho ambiental para biocombustíveis. São GEE aqueles com características específicas de absorção radioativa, cujo aumento antinatural de sua concentração na atmosfera gera um aquecimento da superfície terrestre, provocando o fenômeno de aquecimento global – como o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso (N_2O), o metano (CH_4) e os gases halogenados [Unep (1996)]. O balanço de GEE é obtido pela contabilização do sequestro (pela incorporação na biomassa) e da emissão de GEE no ciclo de vida do biocombustível.

Os balanços energéticos e de GEE devem ser processados pela abordagem da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Trata-se de uma metodologia que considera todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração de recursos naturais, a produção agrícola e o processamento agroindustrial até o uso e a disposição final dos produtos, incluindo as etapas intermediárias e de transporte. O método permite avaliar o desempenho ambiental de produtos, bem como identificar os estágios do seu ciclo de vida que mais contribuem para a geração de impactos. Também possibilita a incorporação de aspectos ambientais ao projeto e ao desenvolvimento de produtos e processos e a implementação de melhorias em processos produtivos, além de subsidiar declarações ambientais. A ACV tem forte base científica e é reconhecida internacionalmente, sendo padronizada pelas normas ISO 14040:2006 e 14044:2006 [ISO (2006a; 2006b)].

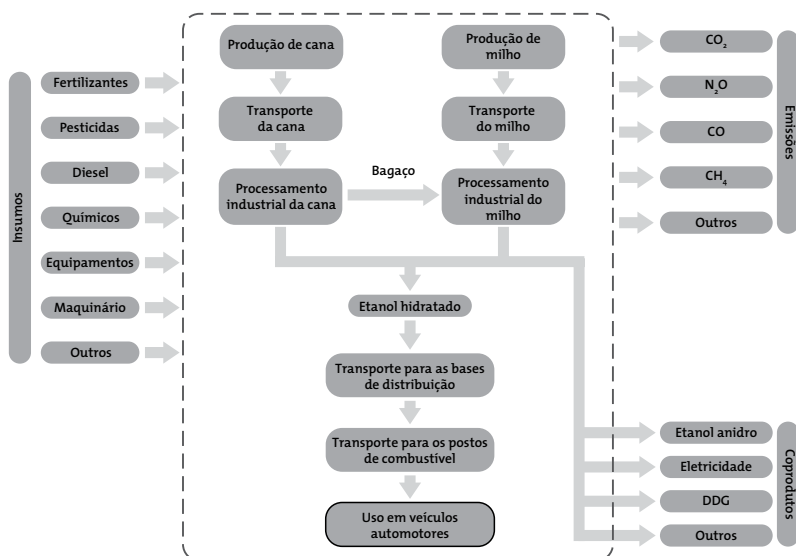
Método e escopo

O objetivo dessa etapa do estudo é avaliar o desempenho ambiental do etanol hidratado produzido em usinas *flex*, especificamente quanto ao balanço energético e de GEE, comparando-o ao seu substituto como combustível veicular, a gasolina.

Os sistemas estudados compreenderam: (1) *os processos de produção de cana-de-açúcar, milho, etanol hidratado e anidro e seus coprodutos* – considerando os cenários previamente descritos; (2) *os processos de produção de seus principais insumos* – incluindo os recursos materiais, combustíveis e energia elétrica; (3) *os processos de transporte*; e (4) *os processos de distribuição e uso do etanol hidratado* (Figura 2). A abordagem do estudo foi “berço ao portão”, quando se avaliam os impactos por litro de etanol hidratado, e “berço ao túmulo”, quando se avaliam os impactos em termos de MJ de combustível exercendo a função de movimentação veicular.

Figura 2

Sistema de produto avaliado neste trabalho



Fonte: Elaboração própria.

As unidades de análise foram: (1) *1 t de etanol hidratado*, para as avaliações que compreenderam as fases do ciclo de vida até a produção desse combustível (na porta da usina); (2) *1 MJ do combustível* (etanol hidratado ou gasolina), para as avaliações que compreenderam o completo ciclo de vida do produto (exercendo a função de movimentação veicular).

Como, além do etanol hidratado, as usinas *flex* produzem também etanol anidro, sólidos derivados do milho (DDG, DDGS ou produtos fracionados) e eletricidade, os impactos ambientais gerados na sua produção devem ser alocados entre todos esses produtos. Para a avaliação das emissões de GEE, o critério de alocação adotado foi o econômico, dividindo-se os impactos entre os produtos de acordo com a receita gerada por cada um deles

(cujos valores são detalhados na seção de avaliação econômica deste estudo). A adoção da alocação econômica para o balanço de GEE frente a outras opções de partição de impactos ambientais corresponde, neste estudo, a uma abordagem conservadora, pois, com esse critério de alocação, o etanol recebe a maior parcela dos impactos ambientais.

Para o balanço energético, foi considerada como “energia total produzida” toda a energia produzida na forma de combustível líquido (etanol anidro e hidratado) e eletricidade. Para os combustíveis, o conteúdo de energia foi estabelecido usando os seus poderes caloríficos inferiores. Para a eletricidade, assumiu-se uma equivalência de geração térmica com eficiência de 50% [Macedo, Seabra e Silva (2008)]. Para os coprodutos, foram descontadas, da soma de energia fóssil usada no seu ciclo de vida, as demandas energéticas de produtos equivalentes derivados da soja que deixariam de ser produzidos, de acordo com Wang *et al.* (2012). A equivalência dos coprodutos do milho com o farelo de soja substituído foi estabelecida com base nos respectivos teores de proteína. Para o óleo (quando pertinente), a equivalência foi de 1:1. O balanço energético foi calculado como a razão entre a energia total produzida e a energia fóssil consumida no ciclo de vida, descontada a energia equivalente dos coprodutos deslocados.

Para a avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida, foram adotados os seguintes métodos: (a) *IPCC 2007 GWP 100a, versão 1.02* [IPCC (2007)], para o balanço de emissões de GEE; e (b) *Cumulative Energy Demand (CED), versão 1.08* [Frischknecht e Jungbluth (2003)], para determinar a energia fóssil consumida no ciclo de vida. Foi usado como *software* de apoio o SimaPro, versão 7.3.3, e os inventários de processos de produção dos insumos agrícolas e industriais da base de dados ecoinvent, versão 2.2.

Este estudo adotou dados primários para o sistema de produção de milho, representativos da produção no estado do Mato Grosso, na safra de 2013 [Donke *et al.* (2013)], e dados secundários, para os demais processos – incluindo dados oriundos da consulta a empresas do setor e a especialistas, da literatura técnica e científica e da base de dados ecoinvent [Ecoinvent Centre (2007)], além de gerados por simulação computacional de processos [Bonomi *et al.* (2012); Cavalett *et al.* (2012); Cavalett *et al.* (2013); Dias *et al.* (2012)]. As informações utilizadas podem ser consideradas atuais e representativas das regiões produtoras brasileiras, assim como das tecnologias descritas nos cenários agrícolas e industriais.

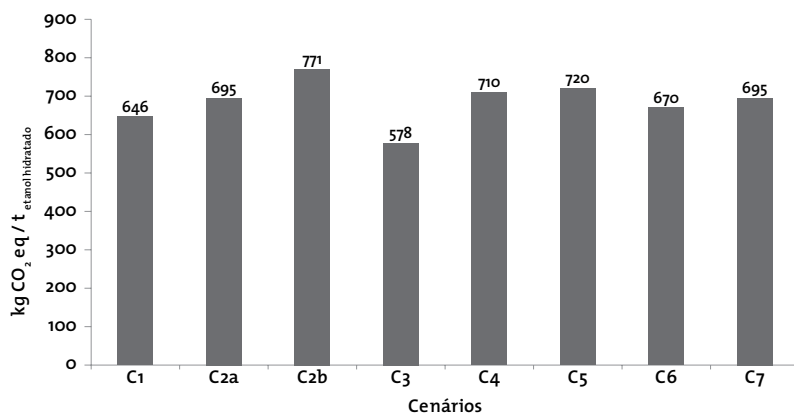
Resultados

Balanço de GEE

Em todo o ciclo de vida do etanol combustível, vários processos são geradores de GEE, que contribuem para o fenômeno do aquecimento global. Até a obtenção do etanol hidratado (abrangendo-se todos os processos do ciclo de vida a montante da produção do etanol, incluindo a fase agrícola, transporte da cana e a fase industrial), são emitidos de 578 kg a 771 kg de CO₂ equivalente por tonelada de produto (Figura 3). Considerando-se ainda a etapa de uso desse combustível, são emitidos de 24,1 g a 31,4 g de CO₂ equivalente por MJ de produto (Figura 4), para os cenários com menor (C3) e maior (C2b) quantidade de emissões, respectivamente. Em termos absolutos, as diferenças não são grandes entre os cenários. A maior diferença observada foi de 25% (Tabela 4). Entretanto, se for considerado o grande potencial de consumo desse biocombustível no Brasil, essas diferenças podem ser importantes.

Figura 3

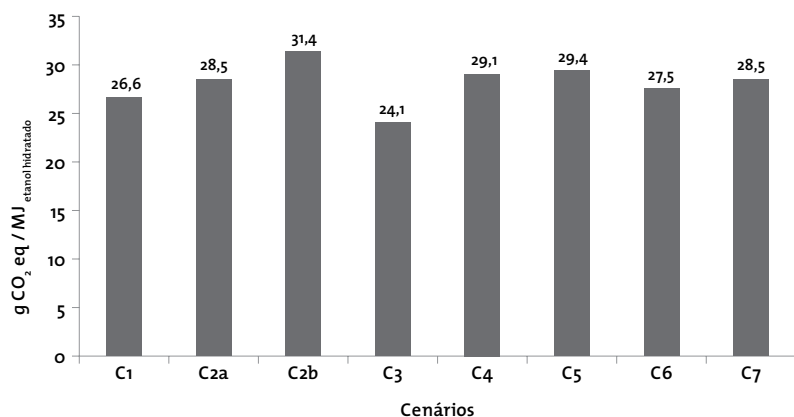
Emissões de gases de efeito estufa de 1 t de etanol hidratado, para os diferentes cenários industriais (“berço ao portão”)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4

Emissões de gases de efeito estufa de 1 MJ de etanol hidratado, para os diferentes cenários industriais (“berço ao túmulo”)



Fonte: Elaboração própria.

Os cenários correspondentes a usinas dedicadas exclusivamente ao processamento de cana-de-açúcar (C1 e C3) foram os que geraram menores quantidades de GEE, sendo o menos impactante aquele referente a uma usina otimizada de cana-de-açúcar (C3). Os principais fatores que influenciaram as emissões de GEE foram a inclusão do milho no sistema, a quantidade de milho processada e o rendimento industrial de produção de etanol de milho.

A inclusão do milho no sistema aumenta a geração de GEE por unidade de etanol produzida. Isso explica por que o cenário C2a, não otimizado, gera menor quantidade de GEE, comparado a outros cenários industriais com milho (exceto os cenários C6 e C7): ele corresponde ao cenário industrial que processa a menor quantidade de milho, equivalente a 155 mil t ano⁻¹. Já o cenário C2b, com o mesmo rendimento de processo que o cenário C2a ($386,6 \text{ L}_{\text{etanol}} \text{ t}_{\text{milho}}^{-1}$), gera uma quantidade maior de GEE (a maior, entre os cenários avaliados), por processar também maior quantidade de milho (395 mil t ano⁻¹), utilizando ainda cavaco de madeira para complementar a demanda energética do processo. Entre os cenários otimizados, o cenário C5, que apresenta o menor rendimento industrial de etanol ($353,8 \text{ L}_{\text{etanol}} \text{ t}_{\text{milho}}^{-1}$ – em grande parte, por causa da perda de açúcares na operação de retirada de sólidos, antes da fermentação), tem o pior desempenho para essa categoria de impacto ambiental. Cabe lembrar, entretanto, que a tecnologia adotada no C5 tem como vantagem não avaliada neste trabalho a possibilidade de cofermentação dos caldos das duas matérias-primas durante a safra da cana, o que possibilita solucionar eventuais problemas operacionais (por exemplo, paradas na moagem de cana), incorporando ganhos no sistema de produção. Entre os cenários de usinas *flex*, o C6, de melhor rendimento industrial ($417,7 \text{ L}_{\text{etanol}} \text{ t}_{\text{milho}}^{-1}$), resultou nas mais baixas emissões de GEE. A produção de coprodutos com maior valor agregado também contribui para as menores emissões

dos cenários C6 e C7, em relação aos demais cenários otimizados de usinas *flex*. Mesmo processando maior quantidade de milho ao ano (542 mil t ano⁻¹), o cenário C7 apresenta menores emissões que os cenários C4 e C5.

Tabela 4

Diferenças entre as emissões de GEE comparando-se os diferentes cenários (em %)

	Cl 2a	Cl 2b	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 6	Cl 7
Cl 1	7,6	19,3	(10,6)	9,9	11,4	3,7	7,6
Cl 2a		10,8	(16,9)	2,1	3,5	(3,7)	0,0
Cl 2b			(25,0)	(7,9)	(6,6)	(13,1)	(9,8)
Cl 3				22,9	24,5	15,9	20,3
Cl 4					1,3	(5,7)	(2,1)
Cl 5						(6,9)	(3,4)
Cl 6							3,8

Fonte: Elaboração própria.

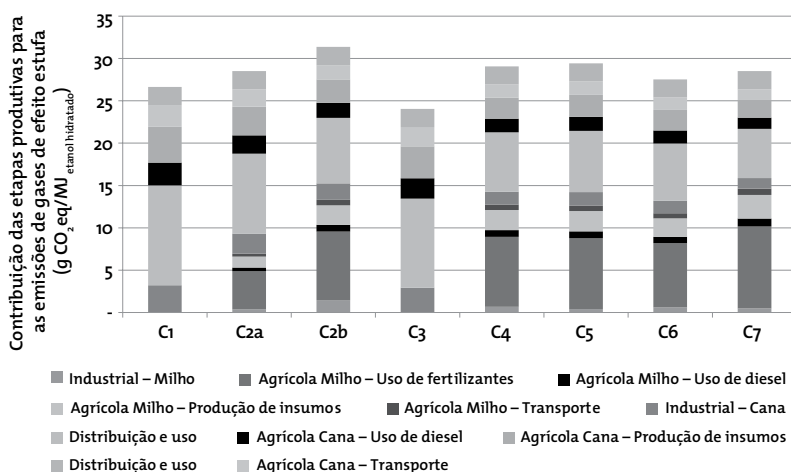
Nota: Diferença entre tratamento menor que 10%.
 Diferença entre tratamento entre 10% e 20%.
 Diferença entre tratamento maior que 20%.

Considerando-se todos os processos do ciclo de vida do etanol hidratado, destaca-se o uso de fertilizantes como o que mais contribui para as emissões de GEE. Para os cenários que tratam da produção exclusiva de etanol de cana-de-açúcar (C1 e C3), bem como para o que considera o processamento de uma quantidade reduzida de milho (cenário C2a), a fertilização da cana-de-açúcar foi a atividade mais impactante. Já para os demais cenários, em que o milho ingressa em elevadas quantidades, o uso de fertilizantes na cultura de milho também teve grande contribuição (Figura 5). O uso de fertilizante nitrogenado, por exemplo, resulta na emissão de óxido nitroso (N₂O), que tem potencial de efeito estufa 298 vezes maior que o do gás carbônico (CO₂) [IPCC (2006)].

Também foram importantes os processos de produção de insumos agrícolas, distribuição e uso do etanol e combustão do diesel em operações agrícolas (Figura 5). Vale lembrar que, no cenário agrícola para a cana-de-açúcar avaliado neste estudo, não são consideradas queimadas pré-colheita, nem mudanças no uso da terra (potenciais geradores de emissões de GEE) em função da produção de cana-de-açúcar e milho.

Figura 5

Contribuição relativa das etapas produtivas para as emissões de gases de efeito estufa de 1 MJ de etanol hidratado usado como combustível veicular, para os diferentes cenários industriais (“berço ao túmulo”)



Fonte: Elaboração própria.

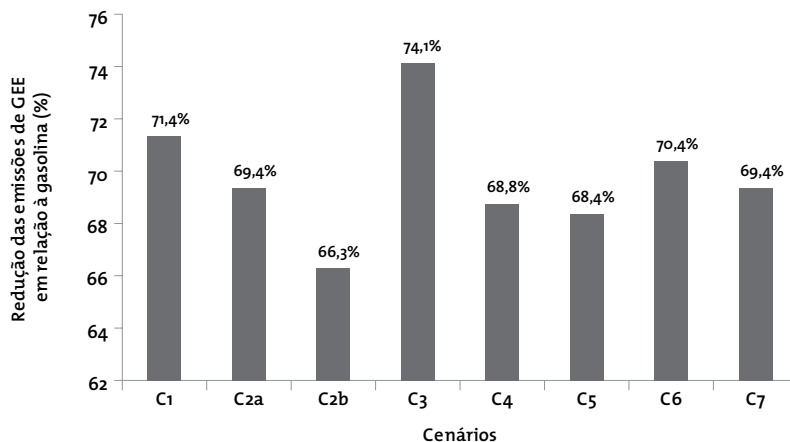
Comparando-se as emissões de GEE ocorridas no ciclo de vida do etanol hidratado com as da gasolina (93 g CO₂eq/MJ), todos os cenários avaliados resultaram em mais de 65% de redução de emissões (Figura 6), lembrando mais uma vez que não são considerados os efeitos da mudança no uso da terra. Segundo os critérios da EPA,

portanto, o etanol produzido pela usina *flex*, apesar de apresentar emissões de GEE maiores que o do etanol somente de cana, seria considerado avançado, o que lhe atribui grande potencial para ser usado como alternativa aos combustíveis fósseis em diversos países.

O etanol obtido nas usinas *flex*, nos cenários propostos para a realidade brasileira, é capaz de promover reduções maiores que as obtidas pelo etanol de milho norte-americano, que variam de 19% a 48%, segundo Wang *et al.* (2012).

Figura 6

Redução das emissões de gases de efeito estufa do uso de etanol hidratado, em relação à gasolina (“berço ao túmulo”)



Fonte: Elaboração própria.

Balanço energético

O balanço energético tem um perfil semelhante ao de emissões de GEE entre os cenários avaliados. Seus valores variam de 5,5 (C2b) a 7,9 (C3) (Figura 7), ou seja, uma diferença de cerca de 30% entre o menor e o maior valor.

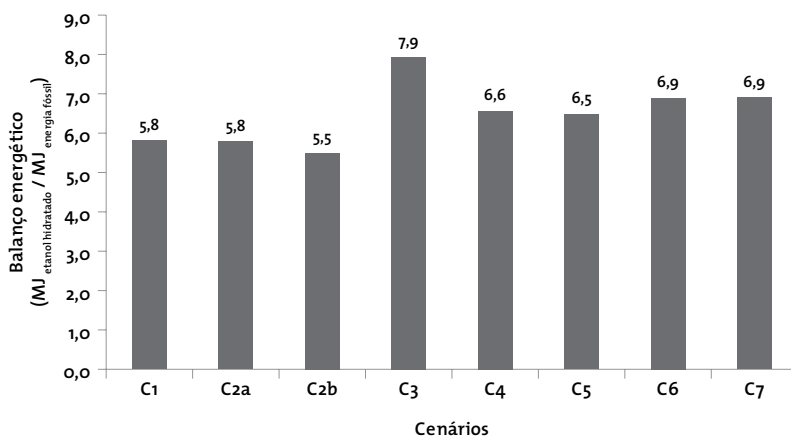
As usinas que processam exclusivamente cana-de-açúcar (C1 e C3) tiveram desempenho energético superior ao das usinas *flex* de mesmo nível tecnológico.

O melhor balanço energético do etanol de cana-de-açúcar deve-se ao fato de sua matéria-prima resultar de um processo agrícola mais produtivo e de o seu processo industrial fornecer biomassa para cogeração de energia, embora seu rendimento industrial (em etanol produzido por quantidade de matéria-prima processada) seja mais baixo. O balanço energético da combinação dos processos agrícola e industrial do etanol de cana-de-açúcar é melhor que o do etanol de milho.

O pior desempenho energético foi o da usina *flex* de nível tecnológico básico, que processou maior quantidade anual de milho (entre as usinas básicas – 395 mil t) e que exigiu a importação de biomassa de cavaco para sua operação por um número de dias equivalente ao dos outros cenários (120 dias) – C2b.

Figura 7

Balanço energético do etanol hidratado, para os diferentes cenários industriais (“berço ao túmulo”)



Fonte: Elaboração própria.

Entre as usinas *flex* otimizadas, aquelas que reuniram as características de baixa demanda energética para operação e o maior rendimento de etanol por quantidade de matéria-prima (C6 e C7) foram as que obtiveram o melhor balanço energético.⁶

Para o balanço energético do etanol de milho produzido nos Estados Unidos, Wang *et al.* (2012) apresentam o valor de 1,61. Esse valor é bastante inferior ao encontrado para a produção de etanol de milho dos cenários avaliados neste estudo, pois o processo nos Estados Unidos utiliza energia fóssil para o processamento industrial. No Brasil, a utilização da energia do bagaço de cana-de-açúcar traz grande benefício energético e ambiental para o etanol de milho produzido em uma usina *flex*.

Análise econômica

Método e escopo

Tecnicamente, destaca-se como uma solução conveniente a possibilidade de processar milho para produção de etanol utilizando o parque industrial de usinas de cana-de-açúcar durante seu período de ina-

⁶ O balanço energético apresentado em Macedo *et al.* (2008) para o etanol de cana-de-açúcar brasileiro foi superior aos encontrados neste trabalho: 9,3 para uma usina com tecnologia média na safra 2005-2006, chegando a 11,6, caso seja considerada uma usina otimizada com uso de parte da palha de cana-de-açúcar para geração de energia. As diferenças podem ser atribuídas principalmente a diferentes quantidades de insumos considerados para os sistemas de produção de cana-de-açúcar, bem como a diferentes valores de energia incorporada nesses insumos. Soares *et al.* (2009) compilaram estudos de balanço energético da produção e uso do etanol de cana-de-açúcar brasileiro e relataram valores entre 8 e 9 MJ L⁻¹, tanto para o estado de São Paulo como para o país. Esses autores atribuíram essas variações justamente a diferenças na utilização de insumos no sistema produtivo e nos pressupostos e alocações assumidos. Assim, a comparação de valores obtidos em diferentes estudos só é pertinente se respeitados o mesmo escopo e as mesmas considerações metodológicas.

tividade na entressafra. Nessa solução, o etanol de milho pode ser produzido por meio de investimentos muitas vezes incrementais para processamento de milho que se conecte com a estrutura já existente.

Para as diferentes opções de tecnologias de usinas *flex*, foi realizada análise comparativa de custos e rentabilidade da produção de etanol. Ou seja, foram utilizadas as informações dos cenários de produção delineados anteriormente junto com informações de valores de investimentos, preços e consumos de fatores de produção para calcular custos, receitas e rentabilidade da produção de etanol e seus coprodutos. É importante destacar que todos os cenários consideram um projeto completo, ou seja, mesmo nos casos em que já exista a usina de etanol de cana-de-açúcar, o valor de investimento original da usina existente é considerado na análise. Essa consideração é necessária para calcular o custo total econômico de cada cenário. Ou seja, os custos incluem remuneração a todos os fatores de produção, tais como terra, depreciações e capital. Os cálculos seguiram a metodologia estabelecida no levantamento de custos do Pecege, realizados desde 2008 como parte do programa Campo Futuro promovido pela Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). A descrição detalhada da metodologia está disponível em Xavier *et al.* (2009) e Pecege (2012; 2013). Os principais indicadores utilizados são destacados na Tabela 5 e na Tabela 6.

Tabela 5

Valores de investimentos industriais e principais consumos

Cenários	Básicos			Otimizados				
	C1	C2a	C2b	C3	C4	C5	C6	C7
Investimentos								
Investimento total (R\$ milhões)	405	505	505	585	685	715	825	790
Cana (R\$ milhões)	405	405	405	585	585	585	585	585
Milho (R\$ milhões)	-	100	100	-	100	130	240	205

(Continua)

(Continuação)

Cenários	Básicos			Otimizados				
	C1	C2a	C2b	C3	C4	C5	C6	C7
Investimento unitário (R\$/t)								
Cana (R\$/t) ¹	135	135	135	195	195	195	195	195
Milho (R\$/t) ²	-	250	250	-	250	350	640	380
Consumo específico dos insumos incrementais no processamento de milho								
Cavaco (kg/t) ³	-	-	248	-	-	-	-	-
Alpha amylase (t/t) ³	-	215	215	-	215	213	170	129
Gluco amylase (t/t) ³	-	430	430	-	430	563	500	443

Fonte: Elaboração própria.

¹ Pecege (2013).

² Dados médios declarados nas entrevistas com as empresas que estudam projetos de etanol de milho.

As estimativas de investimentos consideraram coeficiente de escala 0,75, baseados em dados do Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (Imea).

³ Coeficientes calculados em simulações da Biorrefinaria Virtual do CTBE, detalhes Bonomi *et al.* (2012).

Tabela 6

Preços considerados nas análises de custos e margem de rentabilidade

Preços dos produtos	
Etanol hidratado (R\$/m³) ¹	1.141
Etanol anidro (R\$/m³) ¹	1.314
DDG (R\$/t) ²	340
DDGS (R\$/t) ²	540
Coprodutos derivados do milho (R\$/t) ³	750
Energia exportada (R\$/MWh) ⁴	135
Preços das matérias-primas	
Alfa amilase (R\$/kg) ³	15,00
Glucoamilase (R\$/kg) ³	10,00

(Continua)

(Continuação)

Ciclo hexano (R\$/kg) ³	4,50
Bagaço (R\$/t) ⁵	50
Cavaco (R\$/t) ⁵	130
Preço do milho	
Custo de produção da saca (R\$/saca) ⁶	18,84
Preço considerado (10% de margem no custo)	20,72
Armazenamento por seis meses (R\$/t) ⁷	45,00
Transporte por 70 km (R\$/t) ⁷	15,00

Fonte: Elaboração própria.

¹ Pecege (2013).

² Estimativa baseada na proporção de proteína do produto em relação ao farelo de soja multiplicada pelo preço médio do farelo de soja. Os teores de proteína utilizados para DDG foram 17%, DDGS, 27%, e farelo e soja, 47,8%. O preço do farelo de soja considerado foi R\$ 950/t.

³ Dados médios declarados nas entrevistas com as empresas que estudam projetos de etanol de milho.

⁴ Preços médios atualizados dos contratos de energia vendida em leilões CCEE (2013).

⁵ Danelon *et al.* (2013).

⁶ Estimado pelos autores utilizando dados de custos de produção por hectare e produtividade média do estado do Mato Grosso para produção de milho segunda safra em sistema de produção de alta tecnologia definido por Imea (2013).

⁷ Esalq-LOG (2014), dados dos sistemas Sifreca (frete) e Siarma (armazenamento).

Inicialmente, foram calculados os custos e a receita da produção nos cenários C1 e C3. Reitera-se que esses são cenários de processamento exclusivo de cana-de-açúcar, nos quais foram utilizadas as premissas de investimentos agrícolas, configuração agrícola, custos industriais e administrativos, assim como preços de comercialização do etanol e da eletricidade iguais aos valores estimados para uma usina média representativa da região de expansão, tal como medido pela pesquisa do Pecege/CNA na safra 2012-2013 para uma usina já existente e operacional. Para o cálculo dos custos nos cenários

C1 e C3, foram feitas as adaptações no modelo de cálculo, tal como destacado a seguir.

- Os coeficientes unitários de custos das operações de colheita de cana-de-açúcar, assim como os coeficientes unitários de custos fixos de administração, depreciação dos investimentos e uso do capital imobilizado e da terra, foram recalculados em função da premissa de produtividade do canavial adotada. De forma prática, os coeficientes originais, mensurados em reais por toneladas de cana-de-açúcar, foram multiplicados pela razão entre a produtividade estimada no levantamento 2012/2013 e a produtividade de 80 t/ha considerada nos cenários analisados.
- Os coeficientes unitários de custos fixos industriais e administrativos (salários, manutenção, despesas administrativas, depreciação e custos de oportunidade do capital) foram recalculados assumindo uma taxa de utilização da capacidade industrial de 100%.
- A diferença entre custos nos cenários C1 e C3 ocorre em função da diferença no valor do investimento para uma usina de cana-de-açúcar com alta produtividade na cogeração e tecnologia mais avançada (conforme descrição dos cenários). Pesquisas de Pecege (2013) e dados de Valente *et al.* (2012) estimam os investimentos adicionais nas usinas com cogeração eficiente em R\$ 60 por tonelada de capacidade de processamento anual de cana-de-açúcar.

Para o cálculo dos custos de produção dos cenários em que ocorre produção de etanol de cana-de-açúcar e milho (C2a, C2b, C4, C5, C6 e C7), considerou-se a hipótese da inclusão de um projeto incremental à usina de cana-de-açúcar já existente. Dessa forma, o custo de produção do etanol de milho considera, exclu-

sivamente, os custos do projeto incremental, ou seja, os custos variáveis com a aquisição da matéria-prima e consumos do processo industrial, mais os custos fixos necessários para manutenção do projeto incremental.

Resultados

Os valores de custos dos cenários analisados são mostrados em termos absolutos e coeficientes unitários na Tabela 7, enquanto a receita gerada pela produção de etanol, eletricidade e coprodutos do milho é destacada na Tabela 8, juntamente com a margem de rentabilidade de cada cenário. Destaca-se, novamente, que todos os cenários consideraram iguais escalas de capacidade de processamento industrial de cana-de-açúcar. Dessa forma, todos os resultados, medidos em valores absolutos, são perfeitamente comparáveis entre si. Além disso, as comparações em margens medidas em reais ou porcentagens são interessantes, pois sintetizam os resultados de cenários que consideram duas diferentes matérias-primas e três diferentes grupos de produtos finais, os quais têm unidades de medidas diferentes entre si.

Destaca-se nos resultados o expressivo aumento de custos e receitas nos cenários em que as usinas utilizam o milho para produção de etanol. No caso do cenário C2b, por exemplo, a receita é mais de 65% superior à do C1 em função de um investimento 25% maior no Capex da indústria (Tabela 5). Em função dessas modificações, a margem de C2b é 17,3 milhões maior que a de C1. Em relação à integração com outros mercados de biomassa, tal como o cavaco de madeira, a comparação entre margens de produção de etanol de milho utilizando tecnologia básica (C2a e C2b) destaca que, na região analisada, o uso de cavaco aumenta a atratividade econômica do negócio.

Tabela 7

Custos absolutos, fatores e coeficientes unitários de custos considerados para cálculos dos custos de produção

Cenários	Básicos			Otimizados				
	C1	C2a	C2b	C3	C4	C5	C6	C7
Custos (milhões R\$)	299,8	380,7	499,6	315,4	501,9	496,1	510,6	578,3
Produção e aquisição de cana¹	206,1	206,1	206,1	206,1	206,1	206,1	206,1	206,1
Aquisição de milho²		62,7	160,1		159,8	149,9	151,5	219,7
Custos Industriais – cana³	73,4	73,4	73,4	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0
Salários	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2
Manutenção indústria	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6
Insumos químicos	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Combustíveis e lubrificantes⁴	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Diversos	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Depreciação e custo de capital²	35,1	35,1	35,1	50,7	50,7	50,7	50,7	50,7
Custos Industriais – milho		17,2	36,8		23,8	28,1	41,0	39,2
Salários⁵		1,5	3,9		3,9	3,7	3,7	5,4
Manutenção indústria⁶		4,0	4,0		4,0	5,9	9,6	8,2
Insumos químicos⁷		2,1	5,5		5,2	5,3	4,9	6,5
Cavaco⁸		0,0	12,7		0,0	0,0	0,0	0,0
Diversos⁹		0,8	2,1		2,1	1,9	1,9	1,4
Depreciação e custo de capital²		8,7	8,7		8,7	11,2	20,8	17,8
Custos administrativos¹								
Custos de capital de giro – milho¹⁰	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3
Custos (R\$/t processada)		1,1	2,9		2,9	2,7	2,7	4,0
Produção e aquisição de cana¹	68,7	68,7	68,7	68,7	68,7	68,7	68,7	68,7
Aquisição de milho²		405,4	405,4		405,4	405,4	405,4	405,4
Custos Industriais – cana³	24,5	24,5	24,5	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7
Salários	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
Manutenção Indústria	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Insumos químicos	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4

(Continua)

(Continuação)

Cenários	Básicos			Otimizados				
	C1	C2a	C2b	C3	C4	C5	C6	C7
Combustíveis e lubrificantes ⁴	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Diversos	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Depreciação e custo de capital ²	11,7	11,7	11,7	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9
Custos industriais – milho		111,0	93,3		60,5	74,0	109,7	72,4
Salários ⁵		10,0	10,0		10,0	10,0	10,0	10,0
Manutenção Indústria ⁶		25,9	10,1		10,1	14,0	25,7	15,1
Insumos químicos ⁷		13,8	13,8		13,1	14,4	13,1	12,0
Cavaco ⁸		0,0	32,2		0,0	0,0	0,0	0,0
Diversos ⁹		5,2	5,2		5,2	5,2	5,2	2,5
Depreciação e custo de capital ²		56,1	22,0		22,0	30,3	55,7	32,8
Custos administrativos ¹	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
Custos de capital de giro – milho ¹⁰		7,4	7,4		7,4	7,4	7,4	7,4

Fonte: Elaboração própria.

¹ Valores calculados após ajustes de produtividade dos cálculos de custos de produção de cana na região de expansão [Pecege (2013)].² Calculado em função das premissas destacadas na tabela anterior.³ Valores calculados após ajustes de nível de utilização da capacidade industrial utilizados nos cálculos de custos da região de expansão [Pecege (2013)].⁴ Custos de insumos considerados no modelo da região de expansão [Pecege (2013)].⁵ Dados médios declarados nas entrevistas com as empresas que estudam projetos de etanol de milho.⁶ Considerado valor de 4% do investimento inicial.⁷ Custos adicionais de enzimas e ciclohexano mais o coeficiente de custos com insumos da região de expansão [Pecege (2013)] convertido para equivalente milho, ou seja, considerou-se que os custos de processamento de 1 tonelada de milho são iguais à seguinte expressão: R\$/t milho = R\$/t cana X produtividade etanol tonelada de milho/produtividade etanol tonelada de cana.⁸ Valores calculados em função dos preços, consumos por litro de etanol destacados como premissas nas tabelas anteriores.⁹ Valores iguais ao coeficiente de custos com despesas diversas administrativas na região de expansão [Pecege (2013)] convertidos para tonelada de milho.¹⁰ Valores iguais ao coeficiente de custos com capital de giro na região de expansão [Pecege (2013)] convertidos para tonelada de milho.

Tabela 8

Receitas geradas pela produção de etanol, coprodutos e eletricidade

Cenários	Básicos			Otimizados				
	C1	C2a	C2b	C3	C4	C5	C6	C7
Receita da produção (milhões R\$)	326,9	408,3	544,0	359,6	566,6	536,4	583,1	678,5
Etanol	321,0	393,6	506,4	321,0	506,1	480,0	510,6	577,6
Processamento da cana	321,0	321,0	321,0	321,0	321,0	321,0	321,0	321,0
Processamento do milho	0,0	72,6	185,5	0,0	185,2	159,0	189,7	256,7
Eletricidade	0,0	0,0	0,0	38,7	23,0	17,5	26,3	17,3
Processamento da cana	0,0	0,0	0,0	38,7	11,3	11,3	11,3	11,3
Processamento do milho	0,0	0,0	0,0	0,0	11,7	6,3	15,0	6,1
Coprodutos	6,0	14,7	37,6	0,0	37,5	38,9	46,2	83,6
Bagaço	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DDG/DDGS	0,0	14,7	37,6	0,0	37,5	38,9	0,0	83,6
Fractionados	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,2	0,0
Margem (milhões R\$)	27,2	27,6	44,5	44,3	64,7	40,3	72,5	100,2
Margem de rentabilidade (%)	9,1	7,2	8,9	14,0	12,9	8,1	14,2	17,3

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 8, também se destaca a posição do etanol como a principal fonte de receita do processamento de milho, enquanto os coprodutos derivados do milho são uma fonte secundária cujo potencial de receita equivale a, no máximo, um terço da receita gerada pelo etanol (C7). Por outro lado, os coprodutos do milho têm potencial de geração de receita superior à da bioeletricidade.

Ainda na Tabela 8, é interessante observar que, para um mesmo nível de tecnologia da indústria processadora de cana, por exemplo C1 e C2b ou C3 e C4, os cenários em que se considera o processamento de milho têm menor margem de rentabilidade, em termos percentuais. Ou seja, nos cenários em que se processa milho, a margem unitária da produção de etanol é inferior. Por outro lado, a produção de uma quantidade maior de etanol gera uma margem maior, medida em reais. O incremento no volume produzido de etanol de milho, portanto, supera a redução na margem de contribuição unitária da produção de etanol.

O cálculo dos custos médios do etanol hidratado, ao considerar a contabilização integrada dos custos de processamento de cana-de-açúcar e milho, seguindo uma adaptação da metodologia de custos de Pecege (2013),⁷ é outra forma de verificar, em uma unidade de medida unitária, a análise anterior sobre menor margem de rentabilidade de produção de etanol nos cenários em que se processa milho. Na Figura 8, essa interpretação pode ser verificada por níveis de custos mais altos, como C4 em relação a C3. O interessante do indicador de custos médios do etanol hidratado é a possibilidade de compará-lo com outros cenários além dos analisados neste artigo. É possível, por exemplo, comparar os resultados deste artigo com os custos dos levantamentos das últimas seis safras feitos pelo Pecege (Figura 1).

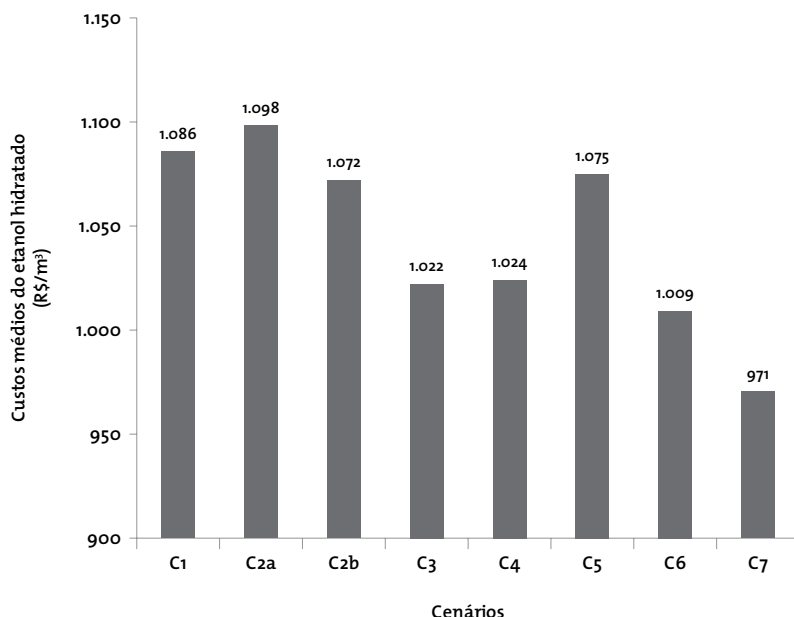
De forma ampla, os cenários de menor produtividade de conversão de milho em etanol, menor valor agregado dos coprodutos e menor integração na produção de eletricidade (C2a, C2b e C5) são

⁷ A adaptação feita na metodologia referiu-se à inclusão da receita da venda de eletricidade, bagaço e coprodutos derivados do milho como custos a serem descontados dos fatores da Tabela 7.

os que apresentam maiores custos do etanol. Sobressaem como destaques de melhores custos os cenários C3, C6 e C7.

Figura 8

Custos médios da produção de etanol hidratado nos cenários analisados



Fonte: Elaboração própria.

Como todas as análises destacadas são muito dependentes de premissas permeadas por alta incerteza, como o preço de aquisição de milho no mercado do Centro-Oeste ou o preço do DDG, realizou-se uma análise sobre a elasticidade da variação de custos de produção exclusivamente do etanol de milho no caso da variação das quatro premissas com maior impacto nos seus custos de produção. A Tabela 9 destaca esses resultados.

Tabela 9

Avaliação da elasticidade dos custos do etanol a variações (em %) nas principais premissas para cada cenário

Cenários	C2a	C2b	C4	C5	C6	C7
Variação de custo do etanol para o caso de 1% de aumento no preço do milho	0,73	0,80	0,82	0,78	0,79	0,92
Variação de custo do etanol para o caso de 1% de aumento no preço do DDG	(0,20)	(0,22)	(0,23)	(0,24)	(0,28)	(0,41)
Variação de custo do etanol para o caso de 1% de aumento no valor dos investimentos na produção de etanol de milho	0,12	0,05	0,05	0,07	0,13	0,09
Variação de custo do etanol para o caso de 1% de aumento nos níveis de produtividade	(0,99)	(0,99)	(0,99)	(0,99)	(0,99)	(0,99)

Fonte: Elaboração própria.

Como esperado, a variação do nível de rendimento da transformação de milho em etanol coloca-se como o principal fator de impacto nos custos. Nesse caso, um aumento de rendimento tem um efeito de diminuição nos custos do etanol, como destaca o sinal negativo do coeficiente de elasticidade na Tabela 9. A variação do preço do milho é o segundo fator mais relevante na variação dos preços do etanol. O sinal positivo do coeficiente destaca que um aumento do preço do milho terá um impacto direto nos custos do etanol. O preço dos coprodutos do milho e o do montante total do Capex industrial são, na sequência, os fatores de menor impacto nos resultados dos custos do etanol.

Para avaliar o risco de o preço do milho inviabilizar a produção de etanol de milho, estimou-se o preço de *break-even* do milho em cada cenário, o que está destacado na Tabela 10. A comparação entre os preços históricos do milho destacados na Figura 9 e os resultados da Tabela 9 permite afirmar que há baixo risco de o preço do milho no estado do Mato Grosso suplantará o preço de *break-even* de praticamente

todos os cenários, situação que é claramente mais confortável para os cenários C6 e C7. Já o nível histórico de preços do milho no estado de São Paulo destaca o contrário: há alto risco de o preço do milho em São Paulo ser maior do que o preço de *break-even* de cada projeto.

Ainda na Tabela 10, são mensurados os valores de *break-even* de preços de DDG e coprodutos derivados do milho. Utilizando as premissas gerais das análises, observa-se que apenas a viabilidade econômica dos cenários C2a e C5 é altamente dependente dos preços que esses coprodutos atingirão no mercado da Região Centro-Oeste, onde eles ainda não são comercializados. Esse resultado não é atraente, pois os preços de *break-even* dos coprodutos nesses cenários são muito próximos ou superiores à estimativa de precificação dessa produção em função do seu teor proteico e do preço do farelo de soja. A opção do C5 de produzir uma proporção maior de DDG por tonelada de milho processada cria a maior dependência desse cenário pelo mercado de coprodutos do milho. Essencialmente, a atratividade do C5 é prejudicada pela menor agregação de valor por tonelada de milho processada, pois o DDG tem menor valor agregado que o etanol.

Por outro lado, os demais cenários destacam uma condição de mercado bastante favorável e pouco dependente dos níveis de preços do nascente mercado de DDG/DDGS no Brasil. Essa condição favorável ocorre porque os preços de *break-even* são bastante inferiores aos preços esperados para o mercado local.⁸

⁸ A competitividade dos cenários C4, C6 e C7 mantém-se mesmo depois de uma análise de precificação bastante pessimista, como, por exemplo, considerar como referência os preços médios do DDGS no mercado dos Estados Unidos [U.S. Grains Council (2014)]. No mercado americano, o derivado do milho tem geralmente um pequeno deságio ou valor igual ao preço do milho, mesmo possuindo nível proteico consideravelmente maior. Em termos equivalentes, nessa análise pessimista, o preço esperado do DDGS no mercado do Centro-Oeste seria de R\$ 345 por tonelada do produto e o do DDG, de aproximadamente R\$ 215 por tonelada. Ou seja, valores ainda superiores ao *break-even* do cenário C7 e próximo do *break-even* do cenário C4.

Tabela 10

Preços do milho e seus coprodutos que tornam rentabilidade da produção incremental de etanol igual a zero

Cenários	Preço do milho (R\$/saca)	Preço dos coprodutos do processamento do milho (R\$/t)
C2a	20,87	331 ¹
C2b	23,35	184 ¹
C4	23,84	154 ¹
C5	20,20	368 ¹
C6	25,26	39% dos preços atuais ²
C7	26,92	179 ³

Fonte: Elaboração própria.

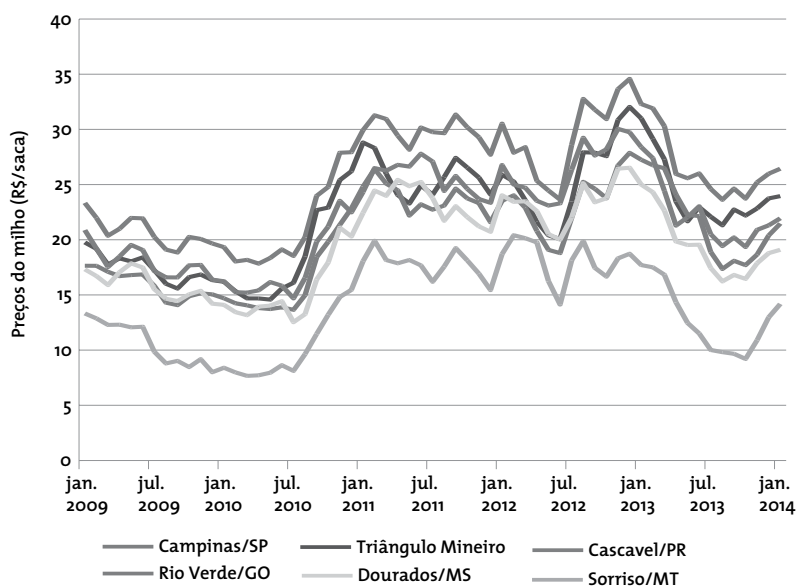
¹ DDG.

² Valores dos coprodutos derivados do milho.

³ DDGS.

Figura 9

Evolução dos preços do milho em vários estados



Fonte: Cepea/Esalq (2014).

Discussão dos resultados

Depois de realizadas as análises para os diferentes cenários de produção de etanol, cabe discutir os principais resultados, sem a pretensão de esgotar a discussão. Assim, a primeira afirmação que se pode fazer é que, ao agregar o milho às usinas de cana-de-açúcar, o setor aumentaria o volume produzido do etanol.

Essa perspectiva, que extrapola a ótica microeconômica, ganha força estratégica no atual contexto brasileiro de oferta e demanda de combustíveis líquidos. Por um lado, há forte expansão da frota nacional de veículos leves, que registrou crescimento médio de 7,9% ao ano nos últimos cinco anos. Esse crescimento da frota, que já ultrapassa 33 milhões de unidades, demanda volumes crescentes de combustíveis líquidos. Nesse mesmo período, a demanda energética na forma de combustíveis líquidos (gasolina A, etanol anidro e etanol hidratado) cresceu 7,8% ao ano, acompanhando o crescimento da frota [ANP (2013)].

Por outro lado, o crescimento da oferta nacional de combustíveis líquidos variou muito pouco no período. Por diversas razões, a oferta de etanol segue praticamente estagnada desde a safra 2008-2009, variando ao redor de 25 bilhões de litros [Milanez *et al.* (2012)]. Já a oferta doméstica de gasolina cresceu, em média, 6,5% ao ano nos últimos quatro anos. Por causa desse crescimento, a capacidade das refinarias brasileiras encontra-se próxima do limite, com o fator de utilização chegando a 96,3% em 2012 [ANP (2013)].

No curto prazo, apesar de haver previsão de início de operação de duas novas refinarias para 2014 e 2015 [Brasil (2013)], não deverá haver aumento da produção de gasolina por essas novas refinarias, que deverão produzir outros produtos, como os derivados petroquímicos.

Como consequência da demanda em expansão e da oferta estagnada, o ajuste vem sendo feito por meio de importações de gasolina e, esporadicamente, até mesmo de etanol. Segundo ANP (2013), o volume e o valor das importações de gasolina tiveram crescimento médio anual de, respectivamente, 1.159% e 751% entre 2008 e 2012. Nesse último ano, o “déficit comercial da gasolina” foi de aproximadamente US\$ 3 bilhões (FOB).

Além dos negativos impactos ambientais, ainda que seja possível reduzir o desequilíbrio desse mercado por meio de importação de gasolina, tal situação não é desejável. A melhor opção ainda é aumentar a produção doméstica de etanol, que tem potencial de gerar ganhos econômicos para os produtores, ganhos sociais para a população local no entorno dos projetos e ganhos ambientais para o Brasil e o mundo. Portanto, são necessários ganhos consistentes de produtividade do etanol que sejam capazes de aumentar a atratividade desse biocombustível tanto para os produtores quanto para os consumidores finais.

Nesse sentido, as análises demonstram que uma usina *flex*, capaz de processar cana-de-açúcar e milho, pode ser uma promissora alternativa para garantir rentabilidade da produção de etanol, especialmente em um contexto de pressão crescente de custos nessa atividade. E mais: essa alternativa não apresenta prejuízos ambientais significativos sobre o etanol brasileiro, que hoje é produzido unicamente de cana-de-açúcar.

Na Tabela 11, é feito exercício para estimar a quantidade potencial de etanol produzido e de milho consumido em cada cenário, se todas as usinas de capacidade igual ou superior a três milhões de toneladas da Região Centro-Oeste fossem reformadas para incorporar o milho no processo produtivo do etanol. Essas 14 usinas foram identificadas e classificadas de acordo com o padrão tecnológico aqui definido (tecnologia básica e otimizada).

Nesse exercício, a produção de etanol em usinas *flex* poderia aumentar em até 2,7 bilhões de litros,⁹ levando-se em conta a aplicação das premissas técnicas na reforma das usinas consideradas para os diferentes cenários (Tabela 11). Esse valor representa 10% da atual produção brasileira de etanol e pouco mais de 40% da atual produção do Centro-Oeste.

Além de aumentar a segurança energética do Brasil, o incremento da produção também garantiria o abastecimento do país em períodos críticos, como na entressafra da cana-de-açúcar. Por ser armazenável, o milho poderia ser adquirido em momentos de preços favoráveis e processado na entressafra da cana-de-açúcar, quando os preços do etanol costumam subir. Assim, haveria redução da sazonalidade de preços ao longo de todo o ano.

Tabela 11

Potencial de produção de etanol de milho no Centro-Oeste

	Tecnologia básica		Tecnologia otimizada			
Número de usinas no CO	5		9			
Cenários	C2a	C2b	C4	C5	C6	C7
Tonelada de milho processado por usina por ano	154.543	394.828	394.141	369.865	373.637	541.971
Total de milho consumido por ano	772.715	1.974.140	3.547.269	3.328.785	3.362.733	4.877.739
Total adicional de etanol anidro (milhões de litros)	149	380	682	586	699	946
Total adicional de etanol hidratado (milhões de litros)	150	383	689	592	706	955

Fonte: Elaboração própria.

⁹ Somatória dos volumes produzidos de etanol anidro e hidratado dos cenários C2b e C7.

Como o objetivo deste artigo é avaliar conjuntamente as dimensões econômica e ambiental dos cenários criados, a Tabela 12 classifica as melhores alternativas disponíveis, considerando essas duas dimensões.

Tabela 12

Classificação dos cenários

Posição	Cenário econômico	Posição	Cenário ambiental
1º	C7	1º	C3
2º	C6	2º	C6
3º	C3	3º	C7
4º	C4	4º	C1
5º	C1	5º	C4
6º	C2B	6º	C2A
7º	C5	7º	C5
8º	C2A	8º	C2B

Fonte: Elaboração própria.

Da perspectiva ambiental, todos os cenários mostram desempenho positivo quando comparados à gasolina. Quando se considera apenas a redução das emissões de GEE, o etanol produzido, em todos os cenários considerados, seria classificado como “biocombustível avançado” segundo terminologia da EPA. Significa dizer que o sistema produtivo do etanol de cana-de-açúcar é mais que suficiente para incorporar, de forma ainda considerada sustentável pela EPA, o milho como matéria-prima complementar. Como ilustração, a EPA considera que o etanol de milho norte-americano seja capaz de reduzir as emissões de GEE em 21%. Logo, o pior dos cenários analisados (C2b) tem desempenho bastante superior ao etanol de milho norte-americano.

Como identificado anteriormente, o grande benefício proporcionado pela cana ao milho está no processo agrícola mais produtivo da cana-de-açúcar, bem como na geração de energia (para autonomia da usina e, em alguns casos, também para exportação) com base

no bagaço. Logo, o balanço energético do processo também exibiu bom desempenho da usina *flex* em todos os cenários, com pequenas diferenças entre eles.

Cabe ressaltar, contudo, que as usinas que processam exclusivamente a cana-de-açúcar (C1 e C3) tiveram resultados ambientais ligeiramente superiores aos resultados obtidos pelas usinas *flex*. Mesmo com essa pequena desvantagem, os benefícios ambientais trazidos pela integração do milho à cadeia da cana-de-açúcar ainda seriam significativos, especialmente em razão do aumento da produção de etanol (e consequente substituição da gasolina). Nos cenários básicos (C2a e C2b), esse aumento de produção de etanol ficaria em torno de 22% e 28%, enquanto nos cenários otimizados (C4, C5, C6 e C7) esse aumento ficaria entre 50% e 80%.

De fato, o grande diferencial do sistema produtivo brasileiro encontra-se na integração de ambas as culturas, cana-de-açúcar e milho, para a produção de etanol. A incorporação do milho se beneficiaria da oferta de energia excedente disponível nas usinas de cana-de-açúcar, da base industrial instalada e dos grandes volumes de biomassa processados pelas usinas de cana-de-açúcar, o que aumentaria as economias de escopo e o nível de utilização da capacidade já instalada. Daí decorre o segundo ponto de destaque da análise econômica: não parece fazer sentido restringir a capacidade de processamento de milho pela capacidade de produção de bagaço excedente, como sugere o C2a. A atratividade econômica das usinas *flex* tende a aumentar na medida em que aumenta a quantidade processada de milho e, consequentemente, a utilização dos ativos existentes.

Em termos de rentabilidade, os cenários de processamento exclusivo de cana-de-açúcar exibem melhores resultados que seus pares que processam cana-de-açúcar e milho, exceto para o C7. Todavia, é importante lembrar que, em razão do elevado risco agrícola, o risco envolvido na construção de um *greenfield* exclusivo de cana-de-açúcar

tende a ser consideravelmente maior que o risco envolvido na transformação de uma usina já existente de cana-de-açúcar em usina *flex*.

Uma tentativa de mensurar o risco do novo negócio foi feita por meio das elasticidades da Tabela 9. O resultado corrobora a percepção de risco relativamente baixo no investimento em usinas *flex*. Nos cenários com melhores desempenhos, há espaço suficiente para absorver grandes variações de preço dos insumos e dos produtos finais, sem causar prejuízo à operação nas usinas da Região Centro-Oeste.

Quando são considerados apenas os cenários de usinas *flex*, pode-se observar que o nível tecnológico utilizado altera o patamar da rentabilidade das usinas. Para os cenários de tecnologia básica, a rentabilidade estimada oscila entre 7% e 9%, o que dificilmente atrairia novos investimentos. Já os cenários com tecnologia otimizada apresentaram rentabilidade superior a 12%, com exceção do C5.

Em todos os cenários de usinas *flex*, o etanol é a principal fonte de receita. Como sugerem os resultados econômicos do C5, a integração com a cana-de-açúcar exigirá alguns aprimoramentos tecnológicos adicionais.

Essa opção parece ser interessante em regiões que possam absorver os coprodutos, como as regiões produtoras de carne no Centro-Oeste. A integração das cadeias do milho, da soja, da cana-de-açúcar e de carnes tem potencial para ampliar a competitividade de todos esses segmentos e do projeto de usina *flex*, especialmente se houver infraestrutura logística de qualidade para escoamento da produção. Assim, os candidatos naturais a receber investimentos em usinas *flex* seriam os estados do Centro-Oeste, que também fazem parte da fronteira de expansão da cana-de-açúcar e possuem muitas novas usinas com tecnologia otimizada.

Segundo previsão da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a produção de milho do Brasil deverá ser de 78,9 milhões

de toneladas na safra 2013-2014. No Centro-Oeste, tal produção deverá alcançar 34,4 milhões de toneladas. Desse total, 27,9 milhões de toneladas serão de milho-safrinha, que aqui está sendo considerado como insumo adicional para a produção de etanol nas usinas *flex*.

Pela rentabilidade estimada e pela sensibilidade a custos do insumo e preço dos coprodutos, é razoável admitir que a reforma de usinas com capacidade de moagem igual ou superior a três milhões de toneladas de cana-de-açúcar e com tecnologia otimizada seja mais provável de acontecer do que a reforma de usinas com tecnologia básica. Como visto na Tabela 11, o C7 é aquele em que há o maior consumo de milho no ano, com cerca de 4,9 milhões de toneladas. Se, somado a isso, todas as usinas de tecnologia básica fossem transformadas em usinas *flex*, o uso de milho-safrinha para a produção de etanol seria significativo. No C2b, seriam consumidas cerca de dois milhões de toneladas de milho. Assim, nos cenários de maior consumo de milho (C2b e C7), seriam consumidas 6,9 milhões de toneladas, o que equivale a 16% do milho-safrinha previsto para a safra 2013-2014.

Mesmo considerando que alguns desses cenários não se concretizem em sua plenitude, os números estimados indicam que grandes volumes de milho poderiam ser usados para a produção de etanol. Como consequência de uma grande demanda por milho, o preço dessa *commodity* tenderia a subir.

Em resposta aos preços mais elevados, os produtores teriam incentivos para aumentar a produção de milho. Apenas considerando o milho-safrinha nos estados do Centro-Oeste, há espaço para a produção regional aumentar em pouco mais de 40 milhões de toneladas (Tabela 2). Essa situação difere do atual contexto, de preços de milho pouco remuneradores e previsão de redução de 8% do volume produzido na safra 2013-2014. Portanto, longe de afetar negativamente as demais cadeias que utilizam o milho como insumo, o

mercado teria condições de ajustar rapidamente oferta e demanda, sem prejuízo para outros segmentos no médio e longo prazo. Além disso, haveria produção maciça de DDG/DDGS, que seriam usados como ração animal (frangos, bovinos, peixes etc.) em virtude de seu conteúdo proteico.¹⁰

O último ponto que merece destaque é o comércio exterior. O etanol de cana-de-açúcar já é mundialmente reconhecido como um biocombustível sustentável, capaz de mitigar, de modo expressivo, os efeitos negativos das emissões de GEE da gasolina. Já o etanol produzido por uma usina *flex* poderia enfrentar resistência de alguns países importadores, o que poderia adicionar custos de segregação do produto final em etanol de milho e etanol de cana-de-açúcar.

Embora isso seja possível, os resultados aqui obtidos demonstram não ser lógico impor ao etanol de usinas *flex* qualquer tipo de penalização. Tanto na dimensão ambiental quanto na dimensão econômica, a produção desse etanol teve desempenho satisfatório nos cenários analisados. Ao se tornar realidade, as usinas *flex* aumentariam a disponibilidade interna do produto, dariam novo fôlego ao setor sucroenergético, especialmente nas regiões de fronteira, e melhorariam a situação dos produtores de milho, aumentando o volume produzido dessa matéria-prima também para outros segmentos consumidores.

¹⁰ Apesar de quase todo o amido ser convertido em etanol durante o processo de fermentação, o DDGS tem concentrações de fibras e gordura cerca de três vezes maiores do que o milho, além de elevado teor de proteínas. Já o DDG pode atuar como substituto para fontes convencionais de formulação de rações animais, como a soja e o próprio milho. Além disso, as fibras presentes nesse coproduto apresentam alta digestibilidade para alimentação animal, permitindo que ele sirva como um substituto parcial para forragens e concentrados [U.S. Grains Council (2012)]. Resultados de estudos do United States Department of Agriculture (USDA) demonstram que, considerando o conjunto dos principais mercados de alimentação animal nos Estados Unidos, uma tonelada de DDG pode substituir, em média, 1,22 toneladas de ração formulada com farinha de milho ou soja [Hoffman e Baker (2011)].

Alternativas de política para fomento de investimentos em usinas *flex*

Financiamento

O BNDES estrutura suas operações de forma a atender às prioridades definidas por sua Diretoria, em linha com as diretrizes definidas pelo governo federal. Dessa forma, a política operacional do BNDES estabelece diferentes condições de apoio financeiro para incentivar empreendimentos que estejam em linha com seus objetivos estratégicos.

Entre esses objetivos, destacam-se a preocupação com a sustentabilidade ambiental e o aumento da eficiência da economia brasileira, méritos presentes nos investimentos em usinas *flex*, conforme discutido nas seções precedentes. Além disso, também se deve reconhecer o mérito estratégico do aumento da produção interna de etanol, haja vista a crescente importação de combustíveis, situação que tem onerado a balança comercial brasileira.

Mesmo considerando apenas os cenários de maior viabilidade técnico-econômica, o potencial de produção adicional de etanol por meio de usinas *flex* poderia chegar a quase 2,7 bilhões de litros, volume que equivale a 10% da produção atual.

A título de comparação, essa mesma produção exigiria, pelo menos, 11 novas usinas de cana-de-açúcar com capacidade de moagem de três milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra, o que demandaria, além de 413 mil ha em novas áreas, pelo menos quatro anos para que essa capacidade fosse plenamente atingida, em razão do ciclo agrícola mais longo da cana-de-açúcar.

Por outro lado, no caso das usinas *flex*, pelo fato de o milho ser produzido em ciclo agrícola mais curto e o processo industrial

utilizar equipamentos que, de outra forma, estariam ociosos ou subutilizados – já existentes, portanto –, a produção de etanol seria adicionada mais rapidamente, dependendo apenas do tempo de reforma das usinas para introdução do sistema de processamento do milho.

Assim, considerando os méritos ambientais, além do contexto de necessidade de reduzir o déficit comercial com a importação de combustíveis líquidos pelo Brasil, o BNDES deveria avaliar a conveniência de reproduzir, para os investimentos em usinas *flex*, as mesmas condições oferecidas aos projetos de energia renovável.

Monitoramento do uso do milho

Sobre o potencial de consumo de milho para a produção de etanol, deve-se considerar o volume atual de produção e o enorme potencial de crescimento da safra de milho-safrinha, que atualmente ocupa apenas um terço da área de soja. Ainda assim, é recomendável que haja um monitoramento da utilização do milho para a produção de etanol, de forma a evitar choques inflacionários e os consequentes efeitos em outras cadeias usuárias de milho, como é o caso da produção de alimentos.

Ademais, o uso excessivo de milho na produção de etanol poderia intensificar o conhecido debate sobre o hipotético dilema “biocombustíveis *versus* alimentos”, polêmica até hoje pouco relacionada ao etanol de cana-de-açúcar e, por conseguinte, ao Brasil.

Desse modo, seria prudente criar mecanismos de monitoramento ou mesmo de restrição de uso de milho para fins energéticos. A título de exemplo, a legislação dos Estados Unidos estabelece um máximo de produção de etanol de milho que pode ser misturado à gasolina.

Incentivo ao consumo regional e às exportações

Em 2013, o consumo de etanol (anidro e hidratado) no Centro-Oeste alcançou cerca de 2,5 bilhões de litros e a produção dessa região chegou a seis bilhões de litros. Nos cenários mais favoráveis, as usinas *flex* adicionariam cerca 2,7 bilhões de litros de produção no Centro-Oeste, o que representa mais de 100% do consumo e 45% da produção da região.

Assim, considerando os benefícios econômicos para a sustentabilidade do crescimento da produção do milho-safrinha, a eventual pressão baixista nos preços locais de etanol com aumento de sua oferta e as dificuldades logísticas de transporte de etanol, seria oportuno que os estados do Centro-Oeste avaliassem a implementação de mecanismos de incentivo ao consumo local de etanol.

Ademais, como forma de facilitar o acesso ao mercado de etanol norte-americano, seria oportuno que as empresas interessadas em investir em usinas *flex* avaliassem, em parceria com o governo brasileiro, a possibilidade de requerer, na EPA, a inclusão do etanol de usinas *flex* brasileiras na categoria de “biocombustíveis avançados”, assim como o etanol somente de cana.

Considerações finais

O crescimento da demanda por combustíveis, impulsionado pela crescente frota de veículos, tem contrastado com a estagnação de investimentos na produção de etanol, o que se traduz em importações crescentes de gasolina.

Em paralelo, a safra de milho brasileira tem obtido crescimento significativo, sobretudo pelo aumento do plantio do chamado milho-safrinha, o que vem gerando pressão baixista sobre os preços desse grão, sobretudo nos estados do Centro-Oeste.

Nesse contexto, surgiram iniciativas com o objetivo de processar os excedentes de milho em etanol e, com isso, agregar valor a um produto que, de outra forma, teria dificuldade de escoamento. Entre essas iniciativas, destaca-se a estratégia de integrar o processamento do milho às usinas de cana-de-açúcar, o que permitiria, além de utilizar equipamentos subutilizados ou mesmo ociosos, aproveitar a energia excedente do processamento da cana-de-açúcar para aumentar a produção total de etanol da usina.

Desse modo, com base em entrevistas com diversas empresas atualmente envolvidas com o desenvolvimento dessa integração e, sobretudo, na literatura disponível sobre o assunto, este artigo procurou colher informações representativas para avaliar o potencial ambiental e econômico das usinas *flex*.

Do ponto de vista ambiental, a avaliação foi positiva, tanto pela ótica do balanço energético quanto pelo aspecto da redução das emissões de GEE. Nesse último caso, inclusive, cabe destacar que, em todos os cenários avaliados, o etanol obtido de usinas *flex* seria considerado, dentro da legislação dos Estados Unidos, “biocombustível avançado”, mesma categoria do etanol de cana-de-açúcar.

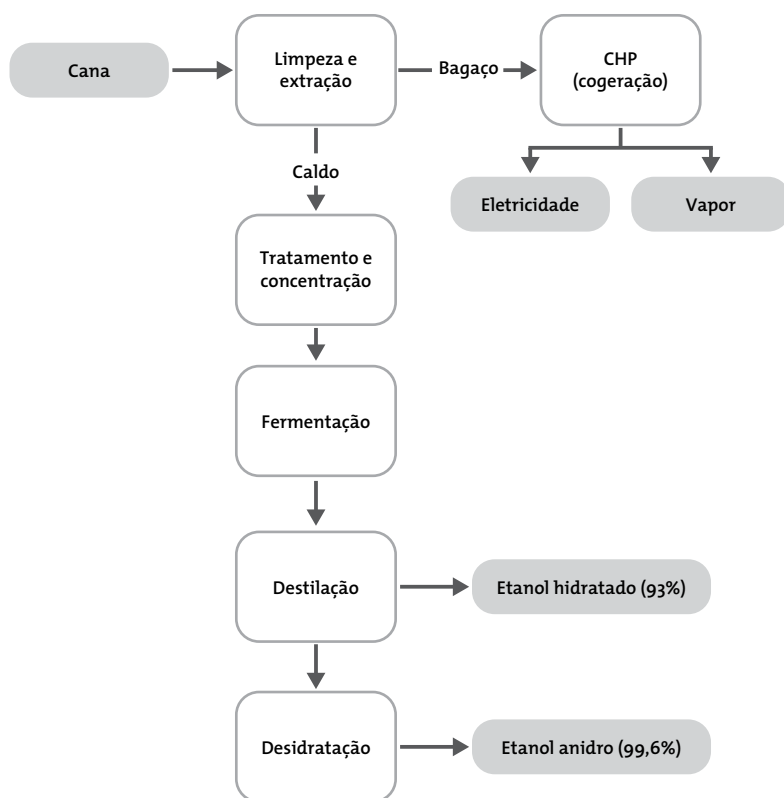
Pelo lado econômico, se considerados os cenários de melhor viabilidade, seria possível agregar cerca de 2,7 bilhões de litros de etanol, o que equivale a 10% da produção atual. O mesmo esforço de crescimento exigiria, pelo menos, 11 novas usinas de cana-de-açúcar, cada uma com capacidade de três milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra, o que demandaria, além de 413 mil ha de novos canaviais, pelo menos quatro anos para sua implementação plena.

Portanto, em razão dos méritos ambientais, econômicos e estratégicos avaliados neste trabalho, é oportuno que se avalie a criação de mecanismos que fomentem os investimentos em usinas *flex* no Brasil e, com isso, se construa uma solução, de curto prazo, tanto

para a urgente necessidade de aumentar a produção interna de etanol quanto para a viabilização sustentável do crescimento da oferta de milho-safrinha.

Anexo 1

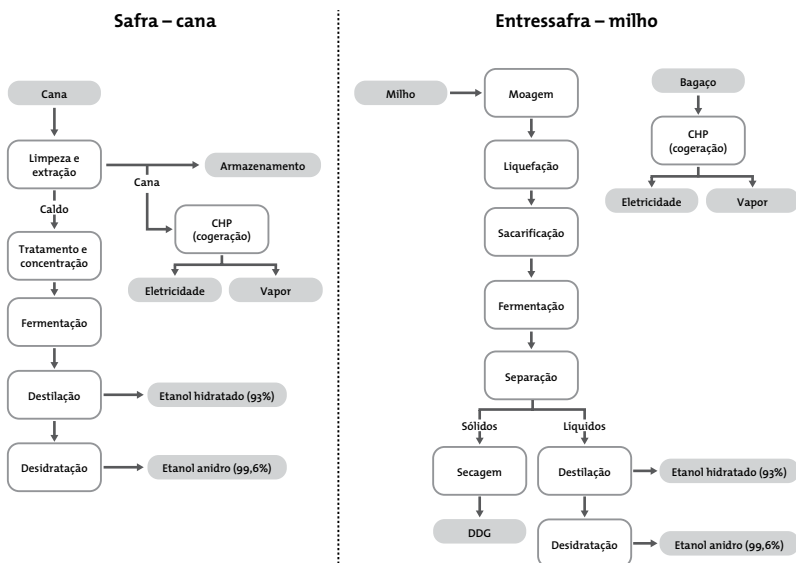
Fluxograma do processo para o cenário C3



Fonte: Elaboração própria.

Anexo 2

Fluxograma do processo para o cenário C4



Fonte: Elaboração própria.

Referências

AGÊNCIA BRASIL. Produção brasileira de milho aumenta 27,7% em 2012 e supera a de soja, 2013. Disponível em: <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2013-10-25/producao-brasileira-de-milho-aumenta-277-em-2012-e-supera-de-soja>>. Acesso em: abr. 2014.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis*, 2013.

BACHELOR, S. E.; BOOTH, E. J.; WALKER, K. R. Energy analysis of rape methyl ester (RME) production from winter oilseed rape. *Industrial Crops and Products*, v. 9, p. 193-202, 1995.

BNDES; CGEE – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (Org.). *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

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, 128 p. Disponível em: <<http://goo.gl/DjbBrL>>.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2022*. Brasília: MME/EPE, 2013.

CAVALETT, O. *et al.* Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 14, p. 399-410, 2012.

_____. Development of an agricultural model for biorefineries sustainability optimization. In: 21st EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE & EXHIBITION, Copenhagen, 2013. *ETA-Florence*, v. 1. p. 1-2, 2013.

CCEE – CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resultados consolidados dos leilões*, 2014. Disponível em: <www.ccee.org.br>. Acesso em: abr. 2014.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 1, safra 2013/2014, n. 2. Segundo levantamento, Brasília, p. 1-66, nov. 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_11_08_09_29_24_boletim_graos_novembro_2013.pdf>. Acesso em: dez. 2013.

COSTA, R. E.; LORA, E. E. *The energy balance in the production of palm oil biodiesel – two case studies: Brazil and Colombia*. Disponível em: <<http://www.galeon.com/francisko3/balancebio.pdf>>. Acesso em: 1º dez. 2009.

DANELON, A. F.; SILVA, M. T.; XAVIER, C. E. O. *O bagaço de cana-de-açúcar como insumo para a geração de vapor e eletricidade: Uma análise do mercado*. Piracicaba: Pecege/Esalq, 2013. Disponível em: <www.pecege.esalq.usp.br/portal>. Acesso em: abr. 2014.

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

DONKE, A. C. G. *et al.* *Energo and exergo-environmental analysis of a multipurpose process for ethanol production from sugarcane and corn.* In: INTERNATIONAL EXERGY, LIFE CYCLE ASSESSMENT, AND SUSTAINABILITY WORKSHOP & SYMPOSIUM. Nisyros. *Anais...* Nisyros: ECOST, 2013. p. 1.305-1.312, p. 437-448.

ecoinvent CENTRE. *Ecoinvent data v2.2. Ecoinvent reports n. 1-25.* Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *EPA lifecycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable fuels.* Washington, DC: EPA, 2010, 4 p. (EPA-420-F-10-006).

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N. *Implementation of life cycle impact assessment methods: final Report Ecoinvent 2000.* Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2003.

HOFFMAN, L. A.; BAKER, A. *Estimating the substitution of distillers' grains for corn and soybean meal in the U.S. feed complex.* Economic Research Service, United States Department of Agriculture. USDA (2011). Disponível em: <http://www.ers.usda.gov/media/236568/fds11i01_2_.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2014.

IMEA – INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA. Custos de produção de milho, 2013. Disponível em: <www.imea.com.br>. Acesso em: abr. 2014.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *IPCC Fourth Assessment Report: the physical science basis.* Genebra: IPCC, 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>>. Acesso em: 12 dez. 2013.

_____. *Guideline for national greenhouse gas inventories: 2006.* Disponível em: <<http://www.ipcc-nggi.iges.org/public/2006gl>>. Acesso em: jan. 2014.

ISO – INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. *International Standard ISO 14040: environmental management: life cycle assessment: principles and framework*. Genebra: ISO, 2006a.

_____. *International Standard ISO 14044: environmental management: life cycle assessment: requirements and guidelines*. Genebra: ISO, 2006b.

LOPES, E. M. *Análise energética e da viabilidade técnica da produção de biodiesel a partir de sebo bovino*. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006. 106 f.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, v. 32, p. 582-595, 2008.

MALÇA, F.; FREIRE, J. Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): assessing the implications of allocation. *Energy*, v. 31, p. 3362-3380, 2006.

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, mar. 2012.

NOGUEIRA, L. A. H. *Análise da utilização de energia na produção de álcool de cana-de-açúcar*. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1987. 180 f.

PECEGE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS. *Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: fechamento da safra 2011/2012*. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 2012. 50 p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA).

_____. *Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: fechamento da safra 2012/2013*. Piracicaba: Universidade de São

Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia, 2013. 67 p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA).

RFA – RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. *2013 Ethanol Industry Outlook*, 2013. Disponível em: <<http://ethanolrfa.org/page/-/PDFs/RFA%202013%20Ethanol%20Industry%20Outlook.pdf?nocdn=1>>. Acesso em: dez. 2013.

SOARES, L. H. B. *et al.* *Mitigação das emissões de gases de efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil*. Rio de Janeiro: Embrapa Agrobiologia, 2009. 14 p. (Circular Técnica n. 27).

SOUZA, A. P. *et al.* Sugarcane as a bioenergy source: history, performance, and perspectives for second-generation bioethanol. *BioEnergy Research*, v. online, p. online, 2013.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME. *Life cycle assessment: what it is and how to do it*. Paris: Unep, 1996.

U.S. GRAINS COUNCIL. *A guide to distiller’s dried grains with solubles (DDGS)*. 3a edição. U.S. Grains Council, 2012. Disponível em: <http://www.grains.org/images/stories/DDGS_user_handbook/2012/Complete_2012_DDGS_Handbook.pdf>. Acesso em: abr. 2014.

_____. *DDGS buying/selling notices to experts*. Disponível em: <www.grains.org/index.php/buying-selling/ddgs>. Acesso em: abr. 2014.

VALENTE, M. S. *et al.* Bens de capital para o setor sucroenergético: a indústria está preparada para atender adequadamente a novo ciclo de investimentos em usinas de cana-de-açúcar? *BNDES Setorial*, n. 36, p. 119-178, BNDES, 2012.

XAVIER, C. E. O. *et al.* *Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: safra 2008/2009*. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento

de Economia, Administração e Sociologia, 2009. 82 p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA).

WANG, M. *et al.* Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use.

Environmental Research Letters, v. 7, p. 1-13, 2012. (doi: 10.1088/1748-9326/7/4/045905).

Sites consultados

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA –
<www.cepea.esalq.usp.br>.

ESALQ-LOG – GRUPO DE PESQUISA E EXTENSÃO EM LOGÍSTICA
AGROINDUSTRIAL – <log.esalq.usp.br>.

