

COMPETIÇÃO ENTRE O ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO E A BIOELETRICIDADE PELO USO DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR*

Gabriel Maluf⁺
Angelo Costa Gurgel⁺⁺

Resumo

A produção de etanol de segunda geração e a produção de bioeletricidade (cogeração), ambos a partir do bagaço, são importantes tecnologias com capacidade de crescimento que demandam o mesmo insumo para suas continuidades. O presente estudo investiga a possível competição entre essas tecnologias pelo recurso comum às duas no Brasil, que é o bagaço da cana-de-açúcar. Para tal, utiliza-se um modelo computável de equilíbrio geral multiregional, aprimorado para representar as tecnologias em foco. O modelo é capaz de projetar cenários de crescimento da economia brasileira e mundial, considerando a produção, consumo e comércio internacional dos diferentes setores econômicos, em particular, nos setores agropecuários e energéticos. Os resultados indicam que haverá considerável competição entre as duas tecnologias pelo uso do bagaço, com predomínio do uso desse recurso, antes abundante, para a produção de combustíveis líquidos.

Palavras-chave: cogeração, etanol de segunda geração, bagaço, equilíbrio geral computável.

Abstract

The production of second generation ethanol and bioelectricity (cogeneration), both from sugar-cane bagasse, are important technologies capable to experience growth in the next years and that require the same input. This paper investigates the competition between these two technologies for the common resource they use in Brazil, the sugar-cane bagasse. To this end, we use a multiregional computable general equilibrium model improved to represent the technologies on spot. The model is capable to project scenarios of growth of Brazilian and world economies, considering the production, consumption and international trade in different economic sectors, in particular in the agricultural and energy sectors. The results indicate that there will be considerable competition between the two technologies to use the bagasse, with a predominance of the use of this resource, previously plentiful, for the production of liquid fuels.

Key words: cogeneration, second generation ethanol, bagasse, computable general equilibrium

Área 11 – Economia Agrícola e do Meio Ambiente

Classificação no JEL: Q13, Q16, Q42

* Trabalho desenvolvido com apoio do CNPq.

⁺ Escola de Economia de São Paulo, Fundação, gabrielmaluf@gmail.com

⁺⁺ Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getulio Vargas, bolsista do CNPq, angelo.gurgel@fgv.br

1. Introdução

Os produtos energéticos da cana-de-açúcar, etanol e energia elétrica, podem ser um caminho para ajudar na redução de emissões de gases do efeito estufa e redução da dependência de fontes fósseis, pois ambos são capazes de substituir outras fontes de energia que utilizam alternativas fósseis para sua produção.

O setor sucroenergético no Brasil é responsável por 1,15 milhão de postos de trabalho, tendo auferido uma receita de US\$ 36 bilhões na safra 2012/2013. O país é o maior exportador mundial de açúcar, sendo responsável por 23% da produção global e 48% das exportações e o segundo maior produtor de etanol, com 22% da produção mundial e 34% das exportações. Tais exportações geraram divisas externas de US\$ 15 bilhões na safra 2012/2013 (UNICA, 2013).

A bioeletricidade - eletricidade gerada a partir da queima do bagaço nas caldeiras - mantém o funcionamento das usinas de cana-de-açúcar, sendo que hoje existe a autossuficiência nas cerca de 400 usinas do Brasil. Em 2012, além da energia consumida pelas usinas, foi exportado 1.381 MW médios, o que corresponde a um volume de energia de, aproximadamente, 2% do consumo total brasileiro.

Verifica-se ser uma tendência, com os mandatos atuais e com as políticas desenhadas pelos governos em vários países, o aumento da mistura de etanol na gasolina, assim como vem ocorrendo no Brasil, bem como o aumento da mistura do biodiesel no diesel. Em alguns estados americanos, é obrigatória a mistura de 10% de etanol à gasolina, sendo que, em 2009, o consumo de etanol foi de 8,5% do mercado de combustíveis para veículos com ciclo Otto. Na União Europeia, o mandato atual de biocombustíveis é de 5,75% com meta de se atingir 10% de energia renovável até o ano de 2020. A tendência de elevação da internacionalização do etanol para utilização como combustível pode ser verificada em vários países e deverá alterar a matriz energética mundial nos próximos anos, conferindo maior participação ao combustível renovável (UNICA, 2010). Sob o ponto de vista ambiental, a substituição da gasolina pelo etanol vem sendo muito importante, dado que o etanol produzido pela cana-de-açúcar emite 90% menos dióxido de carbono quando comparado com a gasolina (MACEDO, 2008), sendo, portanto, um substituto direto da gasolina e trazendo impacto positivo de redução em emissões de gases do efeito estufa.

O aumento de produção futura do etanol para atender à demanda mundial pelo produto, além de se dar pelo desenvolvimento de novas fronteiras, crescimento de áreas produtivas, aumento das eficiências agrícola e industrial, e da criação de novas unidades produtoras, terá também novas tecnologias aplicadas, como é o caso do etanol de segunda geração. Em paralelo, espera-se o aumento da demanda, que conforme já visto, é uma tendência mundial como combustível, e também poderá ser aplicado a novas utilizações, seja para a indústria alcoolquímica, seja como combustível de aviação ou para outras tecnologias em desenvolvimento.

Se por um lado há previsão de maior necessidade de volume de biomassa para cogeração, por outro lado existe a possibilidade de viabilização econômica das novas tecnologias de produção de etanol de segunda geração (etanol 2G), tecnologias estas que se utilizam dessa mesma biomassa para produção de etanol. Portanto, há a previsão do interesse na biomassa tanto para produção de energia elétrica quanto para a produção de combustível. Haverá insumo suficiente para acomodar o desenvolvimento das duas tecnologias? Deve-se esperar a competição de ambas pela biomassa residual da cana-de-açúcar e o predomínio de uma das duas formas de geração de energia, ou as duas coexistirão em larga escala? Sob quais condições tende-se a observar o predomínio de uma das duas?

O objetivo do presente trabalho é investigar a possível competição futura entre o etanol de segunda geração e a produção de eletricidade pelo uso do bagaço, que é o recurso comum às duas tecnologias. Mais especificamente o presente estudo pretende verificar se haverá bagaço suficiente para atender às demandas dos dois processos produtivos e, havendo competição entre eles, estudar qual das tecnologias teria maior utilização do insumo e como se desenvolverão tais processos

produtivos no Brasil. Também tem o objetivo de estudar se há alteração nos comportamentos das demandas dos produtos no país, se ocorre alteração nas produções das tecnologias e se há impacto sobre o PIB. Para isso, foi adaptado um modelo quantitativo dinâmico para representar as duas tecnologias como possíveis usuárias da biomassa residual da cana-de-açúcar, contribuindo para o avanço das projeções e de suas análises.

Foram simulados quatro cenários no modelo contemplando a produção de etanol e de bioeletricidade, sendo um cenário de referência onde o etanol 2G não é viabilizado no período estudado, um cenário em que a produção do etanol 2G apresenta custo de produção 20% mais elevado em relação ao etanol de primeira geração, um cenário de produção do etanol 2G com custo reduzido em relação ao cenário anterior e o quarto cenário que assume a possibilidade de aumentos na exportação brasileira de etanol.

Dessa forma, o presente estudo pretende contribuir com uma visão sobre as trajetórias futuras possíveis do desenvolvimento da produção de energia renovável no Brasil, considerando o país no contexto global. Para tal, utiliza-se um modelo dinâmico computacional de equilíbrio geral capaz de considerar as relações entre agentes econômicos domésticos e internacionais, e ao mesmo tempo representar o setor de energia e de uso da terra e projetar trajetórias possíveis do comportamento mundial nos próximos anos, respondendo assim às questões formuladas para o período dos próximos 35 anos.

2. Revisão de Literatura

Vários estudos recentes incorporaram os biocombustíveis na modelagem dos mercados de energia, a maioria buscando mensurar impactos econômicos associados à sua expansão. Reilly e Paltsev (2007) estimaram o potencial de produção de bioenergia para os próximos 50 anos, enquanto Gurgel, Reilly e Paltsev (2007) expandiram o trabalho de Reilly e Paltsev, considerando a modelagem formal de mudanças no uso da terra e incluindo a presença de ecossistemas naturais. Foram considerados nestes dois estudos, porém, somente biocombustíveis de origem celulósica, sem que fossem analisados os impactos dos combustíveis produzidos a partir de outros insumos, tais como a cana-de-açúcar.

Já Msangi et al. (2007) explora o cenário de crescimento de utilização da biomassa utilizando um modelo de equilíbrio parcial. Porém, apesar de todas as representações de oferta e demanda dos distintos produtos agricultáveis, o modelo utilizado desconsidera os mercados de energia e suas relações com os mercados agrícolas.

Scaramucci (2006), por outro lado, buscou estudar o mercado de energia utilizando um modelo EGC e seu objetivo foi verificar a penetração possível da energia elétrica gerada a partir do bagaço. Seu estudo concluiu que a cogeração a partir do bagaço é uma importante fonte de energia para o Brasil podendo atenuar crises de falta de energia no país. Esse estudo, porém, estava focado na possível escassez de oferta de energia elétrica no país, motivada pela crise energética ocorrida entre os anos de 2001 e 2002.

Os estudos de Hertel, Tyner e Birur (2008) e Birur, Hertel e Tyner (2008) verificam como as políticas mandatórias de produção de biocombustíveis pelos diferentes países impactam o uso da terra. Para tal, incorporam a produção de biocombustíveis da chamada primeira geração (etanol de milho, trigo e cana-de-açúcar, bem como biodiesel de diferentes plantas oleaginosas) no modelo GTAP.

Já Nagavaparu (2008) procura avaliar o desenvolvimento regional e o meio ambiente no Brasil com os impactos da expansão do etanol, representando explicitamente a produção desse combustível no seu modelo de equilíbrio geral. Esse autor, contudo, não considera os possíveis usos do bagaço para a produção de energia elétrica via cogeração.

Nesse sentido, a representação de resíduos e coprodutos da produção de biocombustíveis é um importante avanço na literatura. Taheripour et al. (2010) estudou os biocombustíveis considerando seus coprodutos utilizados na indústria de alimentação, aperfeiçoando, para isso, o modelo GTAP. Concluiu que há menor necessidade de uso da terra com o etanol produzido a partir de cereais quando da incorporação dos coprodutos no modelo, dado que os mesmos têm importante papel na oferta de insumos para a indústria alimentar. Ainda, observaram uma significativa redução nos preços dos alimentos quando é considerado o cenário com coprodutos. Contudo, os autores não representaram os resíduos da cana-de-açúcar nem seus múltiplos usos, uma vez que focaram sua análise na indústria do etanol de milho.

O aprofundamento do estudo do comércio internacional de biocombustíveis é outro aspecto importante no desenvolvimento recente da modelagem quantitativa de bioenergia. Mais recentemente, Golub, Hertel e Lee (2012), também considerando coprodutos no modelo GTAP, estudam os impactos dos biocombustíveis na mudança de uso da terra levando em conta o comércio internacional dos biocombustíveis e sua capacidade de substituir combustíveis fósseis. Nesse estudo é verificado que, para responder sobre os rendimentos do milho nos EUA são necessários mais estudos sobre rendimentos de outras culturas em outras regiões. Esse estudo também tem foco nos biocombustíveis do milho dos EUA, sem que fossem representadas as possíveis utilizações dos resíduos da cana-de-açúcar do Brasil.

As possíveis alterações que o mandato americano de etanol pode causar no equilíbrio do comércio internacional do produto é um assunto relevante a ser considerando nas projeções de oferta mundial dos biocombustíveis. Keeney (2009) estuda mudanças no uso da terra conforme são considerados choques de demanda de etanol nos EUA com a alteração do seu mandato, simulando cenários de oferta do produto pelo próprio país. Ele considera também no estudo o comércio internacional do produto, demonstrando a necessidade de produção de biocombustíveis e de grãos em outros países quando há aumento na demanda de etanol no país. Seu estudo, porém, não representa a possibilidade da tecnologia do etanol 2G, que pode alterar a oferta mundial do produto, e nem os impactos que essa tecnologia pode gerar na matriz energética.

Os estudos relativos ao carbono armazenado na natureza têm importância pela mensuração dos gases de efeito estufa produzidos mundialmente e retirados via fotossíntese e também pela sua sensibilidade quanto ao impacto da utilização de biocombustíveis, suas emissões e a disponibilidade de terras conforme política ambiental adotada para sua produção. Nesse sentido, Gurgel et al. (2011) utilizam o modelo EPPA para estudar o impacto de políticas climáticas de impostos sobre as emissões de gases de efeito estufa e sobre o uso da terra, concluindo que, com a implantação de uma precificação do CO₂ via imposto às emissões de gases de efeito estufa haveria crescimento na demanda por biocombustíveis. Já Reilly et al. (2012) investigam a utilização da terra para mitigação das mudanças climáticas com o modelo EPPA concluindo que a biomassa tem um papel importante no fornecimento de combustíveis líquidos e que o melhor cenário para a diminuição da temperatura da terra é a combinação de uma política de preços de carbono concomitante com a produção de biocombustíveis. Os dois trabalhos ressaltam a forte correlação existente entre biocombustíveis, uso da terra e o clima. Contudo, esses estudos não representam o etanol de modo separado dos demais biocombustíveis e também não abordam os resíduos da cana-de-açúcar nem suas possíveis utilizações.

As políticas climáticas adotadas pelos países podem alterar o uso da terra e, conseqüentemente, a oferta futura dos biocombustíveis no mundo e seu comércio internacional. Lima (2011) utilizou um modelo EGC para estudar os impactos de políticas climáticas adotadas em países desenvolvidos e, levando em consideração a inexistência de barreiras comerciais, concluiu que a elevação na produção e na exportação do etanol brasileiro de segunda geração para atender às necessidades de combustíveis renováveis dos países desenvolvidos competiria por recursos produtivos com outros setores da economia, reduzindo sua produção, de modo que o país passaria a depender demasiadamente das importações, levando a um efeito final de menor crescimento do

Produto Interno Bruto (PIB) nacional no caso de não haverem barreiras comerciais. O estudo considera, entretanto, a hipótese de substituição perfeita entre o etanol e a gasolina em todos os mercados mundiais, bem como não representa os impactos na cogeração de energia elétrica.

Os veículos flex-fuel da frota brasileira permitem argumentar pela substituição perfeita entre o combustível fóssil e o etanol, onde o consumidor pode optar pela fonte de energia mais barata, porém, a obrigatoriedade da mistura do etanol à gasolina no país determina uma certa complementaridade entre os dois produtos, com isso, a substituição imperfeita entre o etanol e a gasolina do Brasil é um aspecto importante na representação destes mercados. Gurgel (2011b), utilizando substituição imperfeita entre etanol e gasolina, estima os impactos do crescimento da demanda de etanol no Brasil e nos EUA sobre a produção agrícola e o uso da terra, concluindo que a disponibilidade de terras para agricultura no país permitiria acomodar o crescimento da cultura da cana-de-açúcar sem causar impactos de desmatamento das florestas tropicais. O estudo também contribui abordando a produção de etanol de milho e de cana-de-açúcar concomitantemente, não focando em somente uma fonte de produção, além de considerar também o comércio internacional. O estudo, contudo, não considera o uso do bagaço para cogeração e nem o emprego da tecnologia do etanol 2G.

Os trabalhos citados agregaram, cada qual, avanços na modelagem, seja pela representação de biocombustíveis da primeira e/ou da segunda geração, seja pela consideração de mercados internacionais de biocombustíveis, ou ainda, pela incorporação de coprodutos. Porém, apesar de pioneiros, não foram considerados em nenhum deles e, ao mesmo tempo, algumas especificidades da economia brasileira relacionadas à bioenergia, como a possibilidade da tecnologia do etanol de segunda geração e a produção de energia elétrica, ambos a partir do bagaço da cana-de-açúcar, além das possibilidades de expansão da fronteira agrícola no Brasil. Há, portanto, espaço e necessidade de se evoluir na modelagem para o cenário brasileiro. Não há estudos que reflitam a expansão do etanol de segunda geração analisando sua competição com o etanol de primeira geração e verificando o que ocorre com a matriz energética brasileira quando o etanol de segunda geração compete como o bagaço utilizado para a cogeração de energia elétrica. Por isso, a necessidade de avanços na modelagem que consiga responder aos questionamentos citados anteriormente.

3. Metodologia

Com o objetivo de investigar a possível competição pelo uso do bagaço pelas tecnologias de produção de etanol de segunda geração e de cogeração será utilizado o modelo dinâmico-recursivo de equilíbrio geral computável *Emissions Prediction and Policy Analysis* – EPPA (PALTSEV et al., 2005), desenvolvido especificamente para o estudo de políticas energéticas e climáticas.

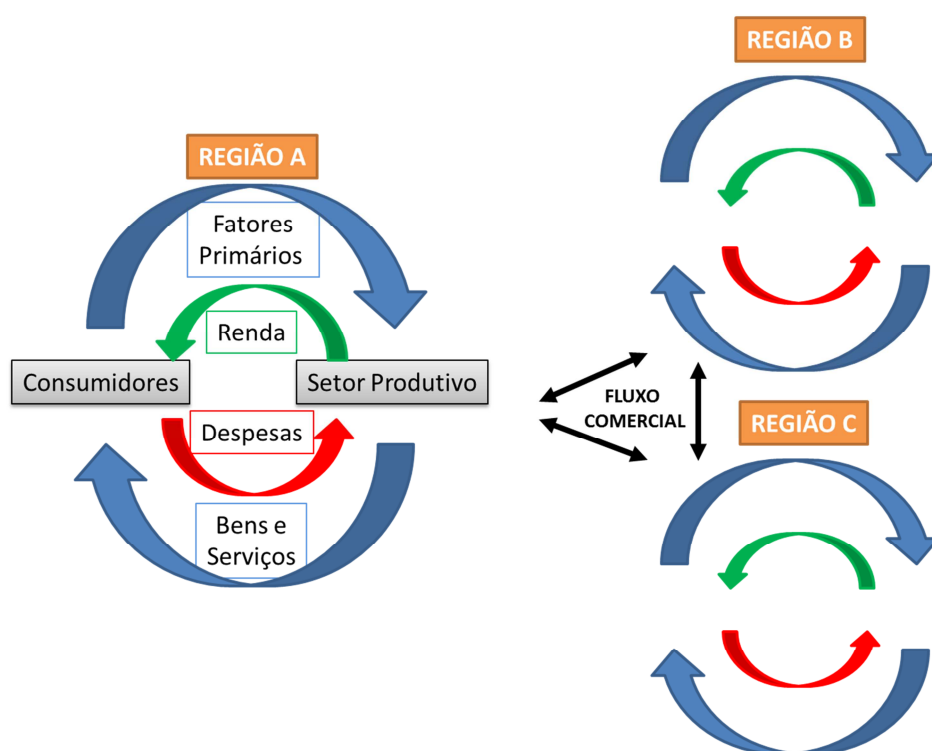
Apresenta-se a seguir uma breve descrição da modelagem de equilíbrio geral e do modelo EPPA, baseadas nos trabalhos de Paltsev et al (2005), Lima (2011) e Gurgel (2011a).

Os modelos de equilíbrio geral computável representam a economia real de um ou vários países e regiões e são úteis em auxiliar na identificação de efeitos de equilíbrio geral causados por mudanças exógenas, que não seriam facilmente identificados *a priori* por sua complexidade ou por relações inesperadas e pouco óbvias (PIERMARTINI; TEH, 2005). A análise dos resultados dessa classe de modelos permite identificar relações entre setores e agentes econômicos que dificilmente seriam identificadas em modelos teóricos ou analíticos, devido à necessidade de simplificação no número de agentes e de relações econômicas nesses últimos. Os resultados das simulações de modelos de equilíbrio geral computável permitem visualizar as direções e magnitudes relativas de choques exógenos, bem como comparar cenários alternativos.

Os modelos de equilíbrio geral são caracterizados pelas relações entre os diversos agentes que buscam cada qual sua otimização e se relacionam por meio dos mercados de bens e fatores de

produção (SHOVEN; WHALLEY, 1998). Obtém-se o equilíbrio neste modelo quando as diversas variáveis endógenas (preços e quantidades) se ajustam de tal forma que os agentes não podem melhorar sua situação alterando seu comportamento. Deste modo, oferta e demanda se igualam em todos os mercados, firmas sob retornos constantes de escala auferem lucros normais e as despesas dos agentes ajustam-se às suas receitas.

É possível representar os modelos de equilíbrio geral pelo fluxo circular de bens e serviços da economia (Figura 1), onde os setores produtivos ofertam bens e serviços aos consumidores enquanto estes ofertam capital e trabalho (fatores primários) aos setores produtivos. É considerado o recebimento de pagamentos (renda) pelos consumidores advindos dos setores produtivos devido ao capital disponibilizado e trabalho fornecido por estes consumidores e, com estes recursos recebidos, os bens e serviços são consumidos através das despesas dos consumidores.



Fonte: Adaptado de PALTSEV et al., 2005, p.5.

Figura 1 - Fluxo circular de bens e serviços

O governo também pode ser explicitado no modelo, mas tem um papel passivo (exógeno) no fluxo circular. As relações comerciais entre diferentes regiões e/ou países podem ser endógenas ou exógenas, o que caracteriza respectivamente modelos multirregionais ou de única região. O equilíbrio no fluxo circular de bens e serviços na economia é representado pela conservação de produto e de valor. A conservação do produto se dá mesmo quando a economia não está em equilíbrio. A conservação de valor reflete o princípio contábil do equilíbrio orçamentário em que, para cada atividade na economia, o valor das despesas deve ser equilibrado pelo valor dos rendimentos. (WING, 2004).

O modelo funciona como um sistema de equações simultâneas representando as condições de equilíbrio de mercado. A modelagem computável de equilíbrio geral utiliza a teoria econômica de equilíbrio geral como uma ferramenta operacional para análises de orientação empírica sobre questões relacionadas a economias de mercado, alocação de recursos, fluxos comerciais, mudança tecnológica, efeitos de choques, entre outras. (SADOULET; JANVRY, 1995).

A utilização de modelos computáveis de equilíbrio geral é justificada quando se espera que medidas políticas ou choques exógenos produzam efeitos de equilíbrio geral na economia, como é

o caso do choque de introdução de uma nova tecnologia como a de etanol de segunda geração e a sua consequente concorrência por matéria-prima com a cogeração no setor de bioenergia brasileiro, ou, ao crescimento de utilização de etanol no mundo por conta dos mandatos de biocombustíveis e redução nas restrições de comércio internacional, ou ainda, devido às restrições de viabilidade de utilização do petróleo e de necessidade de redução de emissão de dióxido de carbono.

O modelo EPPA (Emissions Prediction and Policy Analysis) é um modelo EGC dinâmico recursivo, ou seja, encontra o equilíbrio econômico para um determinado período de tempo e se utiliza dos resultados deste equilíbrio como condição inicial para o período subsequente, repetindo esta ordem de operações até que se atinja a data final de projeção. O modelo é resolvido em intervalos de cinco anos e o horizonte temporal pode se estender a simulações até o ano 2100. O modelo é também multirregional e multisetorial. Foi desenvolvido pelo (Massachusetts Institute of Technology) MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change e vem sendo aprimorado e amplamente utilizado para o estudo de aspectos ligados à energia, agricultura e políticas climáticas. (PALTSEV et al., 2005).

O modelo foi construído como um problema de complementaridade mista (MCP), uma classe de problemas matemáticos que abrange a otimização (linear e não linear), utilizando a sintaxe do algoritmo Modeling Programming System for General Equilibrium (MPSGE), desenvolvida por Rutherford (1999). O MPSGE consiste em um conjunto de equações algébricas que caracterizam as condições de lucro econômico zero para a produção, equilíbrio entre oferta e demanda nos mercados de bens e fatores de produção e equilíbrio entre renda e despesas dos consumidores. O modelo é implementado na linguagem de programação General Algebraic Modeling System –(GAMS). (BROOKE et al., 1998).

O modelo é alimentado por dados econômicos formados principalmente por matrizes de contabilidade social e de insumo-produto que representam as estruturas das economias das regiões, provenientes do Global Trade Analysis Project (GTAP) (HERTEL, 1997; DIMARANAN; MCDOUGALL, 2002), um banco de dados consistente sobre consumo, produção e fluxos de comércio bilateral, tanto do ponto de vista macroeconômico quanto microeconômico, para um grande conjunto de países e regiões do mundo. Dados sobre produção e uso de energia em unidades físicas são baseados nos balanços da Agência Internacional de Energia. As estatísticas sobre os gases de efeito estufa (dióxido de carbono - CO₂, metano - CH₄, óxido nitroso - N₂O, hidrofluorcarbonos – HFCs, perfluorcarbonos – PFCs e hexafluoreto de enxofre - SF₆) foram obtidos nos inventários fornecidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. As informações sobre outros poluentes urbanos (dióxido sulfúrico – SO₂, óxidos de nitrogênio – NO_x, carbono negro – BC, carbono orgânico – OC; amônia – NH₃; monóxido de carbono – CO e compostos orgânicos voláteis não metano – VOC) foram obtidas do banco de dados Global EDGAR desenvolvido por Olivier e Berdowski (2001).

Neste estudo, foi utilizada a versão 5 do modelo EPPA, calibrado para o ano base de 2004. As simulações foram realizadas de forma endógena de cinco em cinco anos a partir do ano 2005.

4. Resultados e Conclusões

Para atender os objetivos do presente estudo de investigar a possível competição da bioenergia pelo bagaço da cana-de-açúcar no país, foram simulados quatro cenários contemplando a produção de etanol e de bioeletricidade (cogeração), sendo um cenário de referência, os quais são detalhados nesta seção.

1. Cenário de referência (denominado “REF”): os indicadores econômicos são avaliados considerando a produção de eletricidade a partir do bagaço da cana-de-açúcar, porém como se o etanol 2G não fosse viabilizado ao longo do tempo, ou seja, REF representa a trajetória da economia projetada pelo modelo EPPA, se ela continuasse sob a mesma dinâmica que a determina hoje, excluindo a possibilidade de implantação da tecnologia do etanol 2G.

2. Cenário de produção do etanol 2G (denominado “2G”): considera a viabilidade da nova tecnologia em escala comercial a partir do ano de 2020. Neste cenário é considerado que a tecnologia 2G, a partir do bagaço da cana-de-açúcar, tem um custo mais elevado (mark-up) de 20% em relação à tecnologia convencional (primeira geração), desconsiderando o custo com o bagaço no processo. Contudo, a tecnologia 2G substitui cerca de 80% do processo produtivo da tecnologia convencional, ou seja, para que o etanol 2G seja produzido, é preciso passar por apenas 20% do processo do etanol de cana-de-açúcar convencional, enquanto o restante do processo, mais elaborado, é 20% mais caro,

3. Cenário de produção do etanol 2G com mark-up reduzido (denominado “2GMU”): igual ao cenário de produção do etanol 2G, mas considerando um mark-up menor, de 5%, de forma a verificar como o barateamento da tecnologia 2G afetaria os resultados.

4. Cenário de produção do etanol 2G com desenvolvimento do comércio internacional de biocombustíveis (denominado “2GCI”): assume as mesmas hipóteses tecnológicas do cenário 2G, porém inclui a possibilidade de aumentos na exportação brasileira de etanol pela maior capacidade de substituição deste biocombustível por aqueles produzidos nos países importadores.

Os resultados foram agrupados em: energia elétrica e biocombustíveis, sendo este último subdividido em demanda doméstica de etanol, produção e comércio internacional do etanol brasileiro, produção de biocombustíveis no mundo e uso da terra.

4.1. Resultados de oferta e demanda de biocombustíveis

O primeiro resultado de interesse do presente estudo diz respeito à projeção da demanda pelo etanol no Brasil. O modelo projeta que a demanda brasileira pelo etanol hidratado sofre pequena variação ao longo do período nos quatro cenários estudados conforme pode ser verificado na Tabela 1. No cenário de referência essa demanda cresce de 0,46 Exajoules (EJ)¹ em 2015 para 1,53 EJ em 2050. Esse aumento é consequência da evolução da frota de automóveis flex-fuel no país ao longo do tempo, bem como do aumento gradativo mais pronunciado do preço do petróleo e seus derivados em relação ao preço do etanol. No cenário 2G, com a entrada da nova tecnologia há um consumo superior em 2,3% em relação ao cenário de referência REF no ano de 2050, o que indica que a tecnologia se torna competitiva e permite uma leve ampliação da oferta do biocombustível, reduzindo seu preço e causando esta pequena elevação de demanda. Verifica-se no cenário 2GMU que, quando o mark-up é inferior e, portanto, a tecnologia se torna mais barata, há maior demanda pelo produto do que nos cenários anteriores, reforçando que o diferencial do preço do produto consegue elevar a demanda, mesmo que modestamente, sendo um crescimento de 1,4% em relação ao cenário 2G e 3,9% de crescimento em relação ao cenário REF no ano de 2050. No cenário 2GCI, a maior demanda pelas exportações brasileiras reduz a demanda doméstica em relação aos níveis projetados para os cenários 2G e 2GMU, contudo, a demanda continua superior em relação ao cenário REF em 1,8% em 2050. Esse resultado indica que o desenvolvimento do mercado internacional para as exportações brasileiras é capaz de diminuir apenas levemente a oferta doméstica.

Tabela 1 - Projeção da demanda nacional por etanol hidratado (EJ)

| Cenário | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| REF | 0,46 | 0,52 | 0,65 | 0,79 | 0,94 | 1,10 | 1,34 | 1,53 |
| 2G | 0,46 | 0,55 | 0,69 | 0,83 | 1,00 | 1,15 | 1,39 | 1,56 |
| 2GMU | 0,46 | 0,56 | 0,71 | 0,86 | 1,02 | 1,18 | 1,41 | 1,59 |
| 2GCI | 0,46 | 0,55 | 0,68 | 0,83 | 0,99 | 1,14 | 1,38 | 1,55 |

¹ Um Exajoule (EJ) equivale a 23.884.589,66 Toneladas Equivalente de Petróleo (TEP) e 277.777.777,78 Megawatt-hora.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Não há praticamente diferença na demanda pelo etanol anidro nos quatro cenários, como pode ser observado na Tabela 2. Isso ocorre porque o preço do etanol anidro diluído na Gasolina C acaba impactando em pouca redução no preço desta ao consumidor, sendo insignificante para determinar uma elevação na sua demanda nos cenários de maior produção de etanol, uma vez que o etanol anidro é consumido na forma de complemento perfeito da gasolina. Além disto, o modelo projeta o aumento na produção de petróleo no Brasil até 2030, com posterior declínio ao longo do tempo (Tabela 3). Esta redução de produção do petróleo indica que a elevação da escassez do produto traz impacto no aumento do seu preço. Isso significa que a Gasolina C, mistura da Gasolina A com o anidro, não sofre redução suficiente de preço ao consumidor final que estimule a elevação na sua demanda. A produção de gasolina A permanece ao longo do tempo sem diferenças nos quatro cenários e a proporção de etanol anidro incorporada à mistura da Gasolina C é mantida em 19% (em base energética) da mistura ao longo de todo o período simulado. Isso significa que o aumento da demanda pelo etanol anidro apenas acompanha o crescimento da frota total de veículos, porém, perdendo espaço para o consumo de etanol hidratado nos veículos de passeio. No cenário de referência, o consumo de gasolina C e de etanol anidro cresce aproximadamente 47% entre 2015 e 2050, enquanto o etanol hidratado possui sua demanda incrementada em 230%.

Verifica-se, portanto, que, se por um lado a tecnologia do etanol 2G não é capaz de compensar o contínuo aumento no preço dos derivados de petróleo de forma a estimular a demanda do etanol anidro, por outro há evidências de que tal tecnologia confere ao etanol hidratado maior competitividade frente à gasolina C. No cenário 2G, quando há viabilização da tecnologia, verificamos a leve ampliação da oferta do biocombustível com sua redução de preço, o que causa uma pequena elevação na demanda do produto. No cenário 2GMU, com a maior viabilização da tecnologia há também maior impacto na demanda do produto. Já no cenário 2GCI há leve diminuição da oferta doméstica devido ao desenvolvimento do mercado internacional para as exportações brasileiras.

Tabela 2 - Projeção da demanda nacional por etanol anidro (EJ)

| Cenário | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| REF | 0,31 | 0,33 | 0,37 | 0,40 | 0,42 | 0,43 | 0,44 | 0,46 |
| 2G | 0,31 | 0,33 | 0,37 | 0,39 | 0,42 | 0,43 | 0,44 | 0,46 |
| 2GMU | 0,31 | 0,33 | 0,37 | 0,39 | 0,41 | 0,42 | 0,44 | 0,47 |
| 2GCI | 0,31 | 0,33 | 0,37 | 0,40 | 0,42 | 0,43 | 0,44 | 0,46 |

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 3 - Evolução da produção brasileira de petróleo (EJ)

| Cenário | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| REF | 5,35 | 5,93 | 6,48 | 6,77 | 6,71 | 6,46 | 6,26 | 5,77 |
| 2G | 5,35 | 5,94 | 6,48 | 6,77 | 6,72 | 6,46 | 6,27 | 5,77 |
| 2GMU | 5,35 | 5,94 | 6,48 | 6,78 | 6,72 | 6,47 | 6,27 | 5,78 |
| 2GCI | 5,35 | 5,93 | 6,47 | 6,76 | 6,70 | 6,44 | 6,25 | 5,77 |

Fonte: Resultados da pesquisa.

A produção total de etanol pelo Brasil tem evolução similar nos cenários REF, 2G e 2GMU sofrendo elevação de aproximadamente 234% entre os anos de 2010 e 2050 (Tabela 4). Já no

cenário 2GCI há um incremento no volume produzido de 460%, ou seja, a demanda externa pelo produto com o livre comércio internacional possibilita um grande incremento na produção nacional de etanol (Tabela 5).

Tabela 4 – Evolução da produção brasileira de etanol (EJ)

| Cenário | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| REF | 0,66 | 0,85 | 0,96 | 1,14 | 1,31 | 1,51 | 1,67 | 1,94 | 2,15 |
| 2G | 0,66 | 0,85 | 0,99 | 1,17 | 1,35 | 1,56 | 1,72 | 1,98 | 2,19 |
| 2GMU | 0,66 | 0,85 | 1,00 | 1,19 | 1,38 | 1,59 | 1,75 | 2,01 | 2,21 |
| 2GCI | 0,66 | 0,87 | 1,06 | 1,34 | 1,66 | 2,27 | 2,87 | 3,27 | 3,68 |

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nos cenários REF, 2G e 2GMU, os EUA participam em 2010 importando 60% do volume total exportado pelo Brasil e em 2050 com 70% deste volume. A Europa participa com 27% em 2010 e 22% em 2050 e a Ásia com 13% e 8% nos anos de 2010 e 2050, respectivamente. No cenário 2GCI, as participações em 2050 dos EUA, Europa e Ásia são respectivamente 80%, 18% e 2%, ou seja, em números absolutos os três destinos têm elevação na participação do comércio do etanol, mas, em números relativos, o mercado que mais se beneficia do livre comércio é o dos EUA.

Tabela 5 – Evolução da exportação brasileira de etanol (EJ)

| Cenário | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| REF | 0,05 | 0,07 | 0,10 | 0,12 | 0,12 | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,16 |
| 2G | 0,05 | 0,07 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 0,16 |
| 2GMU | 0,05 | 0,07 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,16 |
| 2GCI | 0,05 | 0,09 | 0,18 | 0,28 | 0,44 | 0,86 | 1,30 | 1,45 | 1,66 |

Fonte: Resultados da pesquisa.

Verifica-se, portanto, que o Brasil tem capacidade em elevar a sua produção de etanol, porém, possui uma demanda doméstica limitada pelo produto, determinada pela projeção do tamanho da frota de veículos flex fuel no futuro. Com o livre comércio internacional, há possibilidade de maior demanda pelo produto e, conseqüentemente, maior produção, sendo que o país que mais se beneficiaria deste livre comércio seriam os EUA.

Nos cenários REF, 2G e 2GMU, a produção mundial de biocombustíveis mais do que dobra entre os anos de 2015 e 2050, sendo que o diferencial de produção final de biocombustíveis entre os três cenários estudados é pequeno, assim como vimos acontecer na produção brasileira (Tabela 6). Já no cenário onde foi considerado o livre comércio internacional (2GCI), há um maior incremento na produção mundial de biocombustíveis no período, porém bem inferior ao incremento de produção brasileira de etanol neste mesmo cenário. Esse resultado indica que, com o livre

comércio, parte do incremento da produção brasileira de etanol substitui os biocombustíveis produzidos em outros países devido à sua competitividade em preço.

Tabela 6 – Evolução da produção de biocombustíveis no mundo (EJ)

| Cenário | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| REF | 4,77 | 6,43 | 7,86 | 8,40 | 9,41 | 9,65 | 10,62 | 10,99 |
| 2G | 4,77 | 6,45 | 7,89 | 8,45 | 9,46 | 9,70 | 10,67 | 11,03 |
| 2GMU | 4,77 | 6,47 | 7,91 | 8,47 | 9,49 | 9,73 | 10,70 | 11,05 |
| 2GCI | 4,77 | 6,47 | 7,94 | 8,57 | 9,75 | 10,20 | 11,22 | 11,69 |

Fonte: Resultados da pesquisa.

4.2. Uso da terra

Em todos os cenários há aumento na área necessária para cultivo da cana-de-açúcar destinada ao etanol entre os anos de 2015 e 2050 para atender à demanda crescente pelo produto. No cenário 2G, verifica-se ser menor a área necessária para a produção do etanol que no cenário REF ao longo dos anos, o que significa que a maior produtividade do etanol 2G possibilita o incremento da produção de etanol por hectare. No cenário 2GMU, a redução da área necessária para a produção é ainda maior, ou seja, aumenta-se ainda mais a produtividade de etanol por hectare quando do menor custo da tecnologia 2G, devido à maior viabilidade de produção de etanol. (Tabela 7)

No cenário 2GCI, há expressivo aumento da área necessária para a produção de etanol. Temos, ao mesmo tempo, elevação do volume de etanol 2G e 1G dada a maior demanda internacional pelo etanol quando comparado ao cenário REF.

Nos cenários, o aumento de produtividade de etanol observado (agrícola + industrial) é de cerca de 2,7% ao ano. Tal produtividade ajuda na redução da área necessária para produção do etanol, seja 1G ou 2G, e contribui para manter a competitividade do etanol 1G frente ao 2G.

Tabela 7 - Uso da terra para a produção de cana-de-açúcar destinada à produção de etanol no Brasil (mil ha)

| Cenário | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| REF | 3.813 | 4.693 | 5.064 | 5.617 | 6.173 | 6.593 | 6.916 | 7.436 | 7.765 |
| 2G | 3.813 | 4.693 | 4.846 | 5.380 | 5.916 | 6.318 | 6.628 | 7.104 | 7.416 |
| 2GMU | 3.813 | 4.693 | 4.800 | 5.338 | 5.530 | 5.906 | 6.170 | 6.561 | 6.920 |
| 2GCI | 3.813 | 4.779 | 5.184 | 6.079 | 7.169 | 9.005 | 10.701 | 11.347 | 12.040 |

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nos cenários 2G, 2GMU e 2GCI as participações absolutas de etanol 2G no total de etanol produzido se elevam ao longo dos anos, porém, as participações relativas do etanol 2G se elevam até determinada data quando então se inicia seu recuo de participação percentual, devido, em parte, à maior competitividade do etanol 1G conferida pelo aumento de produtividade ocorrido durante o período (Gráfico 1). Esses resultados indicam que o crescimento da produtividade da terra é um importante parâmetro na determinação da competitividade relativa do etanol.

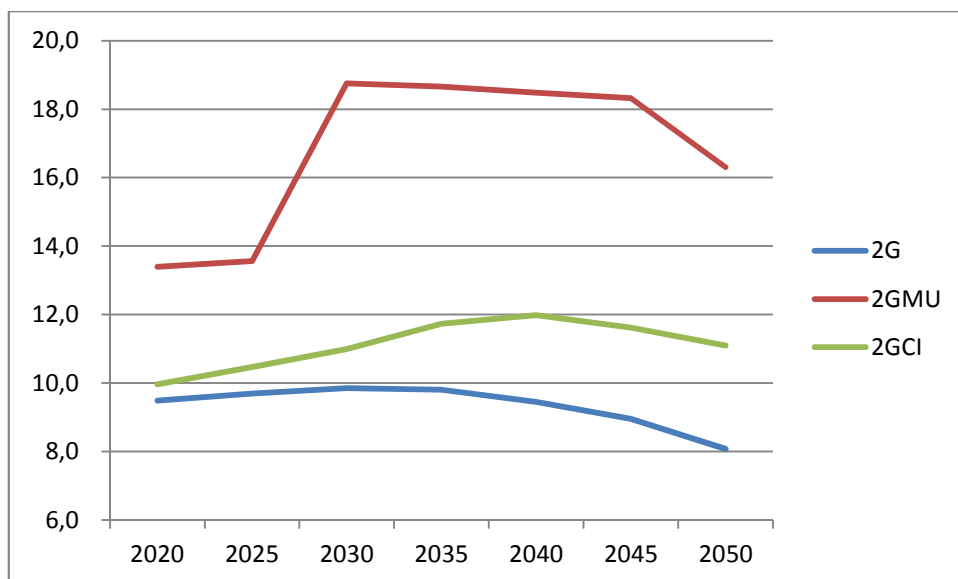


Gráfico 1 - Participações relativas do etanol 2G na produção total brasileira de etanol
Fonte: Resultados da pesquisa.

Verifica-se, portanto, que o advento do etanol 2G não se traduz em grande aumento na oferta, capaz de provocar mudanças estruturais importantes na demanda de combustíveis líquidos no país. Em parte esse resultado deve-se ao custo do etanol 2G, que é relativamente elevado, e, portanto, não permite que o avanço tecnológico seja traduzido em aumento expressivo da oferta capaz de reduzir o preço ao consumidor. Como consequência, a demanda de etanol sofre pequena expansão, já que tal redução no preço é impedida pela necessidade de cobrir os custos de produção. Porém, o etanol 2G permite liberar terras para outros cultivos. Dessa forma, um crescimento mais forte da produção do etanol 2G só aconteceria diante de uma maior demanda internacional pelo etanol, ou seja, possível apenas diante do desenvolvimento e liberalização do mercado mundial de etanol.

4.3. Energia elétrica e cogeração

O modelo EPPA projeta que a energia elétrica total demandada no país se eleva em torno de 108% entre os anos de 2010 e 2050, não apresentando diferenças significativas entre os cenários estudados.

A energia gerada pelo bagaço no cenário REF se eleva em 214% entre os anos de 2010 e 2050, por se mostrar como uma fonte com maior viabilidade, em média, que as demais fontes no longo prazo. A cogeração tem uma elevação de participação na energia total gerada de 1,3% no período, passando de 2,7% do total da energia gerada em 2010 para 4,0% em 2050. A energia gerada pela biomassa não foi a fonte com maior crescimento de participação no período, porém, verifica-se que as outras fontes que demonstraram maior crescimento entre 2010 e 2050 tem declínio de crescimento nos últimos anos ao passo que a cogeração de bagaço mantém uma constante elevação (Gráfico 2) demonstrando sua viabilidade sustentada frente às demais fontes.

No ano de 2013 o Brasil possuía cerca de 400 usinas de cana-de-açúcar operando, sendo que destas somente 170 usinas exportavam energia (UNICA, 2013), ou seja, apenas com investimentos nas usinas já existentes seria possível aproximadamente triplicar a cogeração de energia, isso sem levar em consideração as novas unidades possíveis de entrar em operação até o ano de 2050. Portanto, há evidências de que uma elevação de 214% na cogeração no longo prazo seja factível.

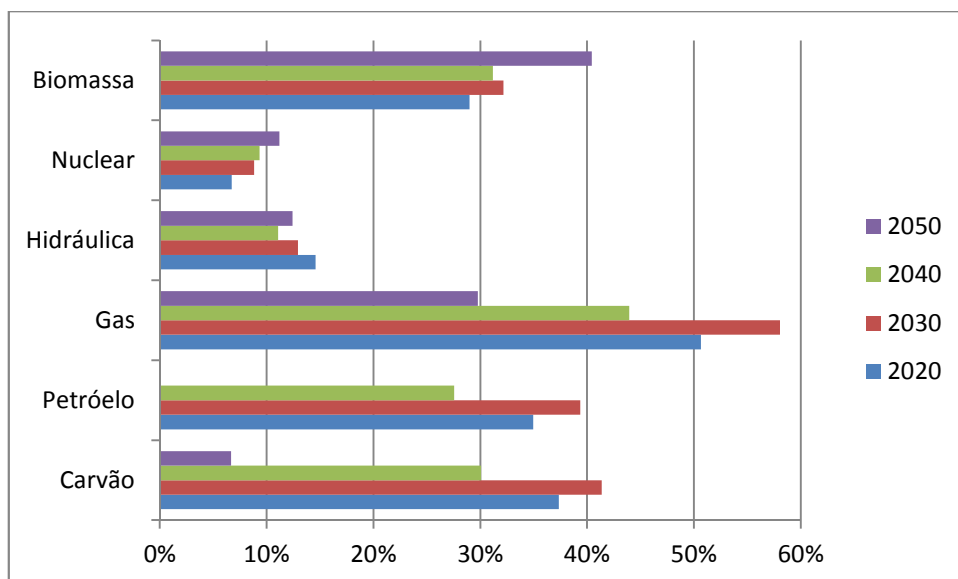


Gráfico 2 – Evolução do crescimento decenal por fonte de geração de energia elétrica (%)
 Fonte: Resultados da pesquisa.

Já no cenário 2G, a energia gerada pelo bagaço se eleva em 93% entre os anos de 2010 e 2050, crescimento bem menor frente à elevação de 214% no cenário REF, evidenciando a existência de uma forte competição pelo bagaço com a tecnologia de etanol 2G, o que reduz a cogeração.

No cenário 2GMU, há uma redução de 57% da cogeração proveniente do bagaço de cana-de-açúcar devido ao maior volume de etanol 2G viabilizado com a redução do mark-up da produção. Ainda neste cenário, durante duas décadas não há viabilidade de produção de geração de energia de bagaço, demonstrando quão forte pode ser a competição da tecnologia de produção de etanol 2G pelo uso do bagaço quando da redução dos seus custos de produção. No ano de 2050, a cogeração volta a ser viável devido à maior competitividade do etanol 1G com o etanol 2G, além de uma provável saturação da demanda de etanol no Brasil, tornando então novamente viável a cogeração de energia de bagaço.

No cenário 2GCI, temos uma elevação de cogeração de 89%, ou seja, abaixo dos 214% do cenário REF e também inferior aos 93% do cenário 2G, consequência da maior competição pelo bagaço, caso o comércio internacional de etanol se desenvolva. Importante notar que, apesar desse cenário, a princípio, significar aumento na competição pelo bagaço para a produção e exportação de etanol 2G, o estímulo que as exportações provocam é forte o bastante para provocar um grande crescimento do etanol de primeira geração, e com isso, o aumento na disponibilidade de bagaço, o que impede que a cogeração seja interrompida, com aconteceu no cenário 2GMU.

Em todos os cenários, a maior competitividade do etanol 1G pelo crescimento da produtividade da terra e industrial, além do esgotamento da demanda de etanol dentro do país, confere, a partir de 2040, maior taxa de crescimento da cogeração de energia pelo uso do bagaço. A evolução decenal das energias cogeras nos quatro cenários pode ser visualizada no Gráfico 3.

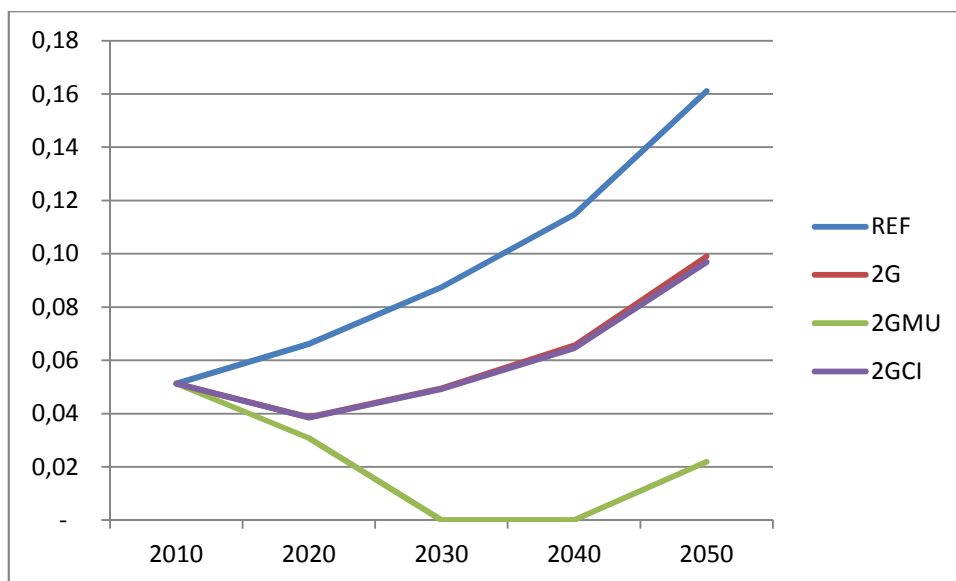


Gráfico 3 - Trajetória da produção de energia pela cogeração em EJ

Fonte: Resultados da pesquisa.

O uso do bagaço para energia elétrica se torna menos viável para os produtores quando do desenvolvimento do etanol 2G, considerando o aumento da demanda pelo etanol seja no mercado doméstico ou internacional, sendo que a elevação da competitividade do etanol 1G pode conferir maior lucratividade ao uso do bagaço para a cogeração de energia. Quanto mais competitivo se tornar o etanol 2G, menor a atratividade do uso do bagaço para a cogeração.

4.4 Produto Interno Bruto - PIB

Os modelos de equilíbrio geral permitem obter não apenas resultados sobre os setores e produtos objeto da investigação, mas também, os resultados sobre variáveis macroeconômicas. Considerando isso, é relevante observar se as diferentes trajetórias possíveis de uso do bagaço da cana-de-açúcar são capazes de provocar mudanças no PIB do país, ou se a importância do setor e de seus encadeamentos sobre outros setores produz impactos consideráveis sobre o produto agregado.

Nesse sentido, o modelo projeta que o PIB mundial cresce a uma taxa média de 2,639% ao ano entre o período de 2015 a 2050 no cenário de referência (REF), enquanto o Brasil apresenta crescimento médio de 2,964% ao ano no mesmo período.

No cenário 2G, o crescimento do Brasil é US\$ 4,4 bilhões superior ao obtido no cenário REF no ano de 2050 e o crescimento mundial US\$ 4,6 bilhões superior ao apresentado no cenário REF, ou seja, a tecnologia 2G traz consigo melhora no PIB brasileiro, que assimila quase todo crescimento mundial encontrado. O crescimento mundial anual do PIB nos dois cenários é de 2,639% ao ano entre os anos de 2015 e 2050 enquanto que no Brasil o crescimento anual passou de 2,964% no cenário REF para 2,967% ao ano no cenário 2G no período. A melhora no PIB está relacionada à introdução da tecnologia do etanol 2G, que significa a economia de recursos produtivos para atingir melhores níveis de produção, permitindo, dessa forma, um ganho de eficiência para a economia brasileira.

No cenário 2GMU, o crescimento do Brasil é US\$ 8,8 bilhões superior ao demonstrado no cenário REF no ano de 2050 e o crescimento mundial US\$ 9,2 bilhões superior ao apresentado no cenário REF no mesmo ano, ou seja, a tecnologia 2G demonstra melhorar ainda mais o PIB brasileiro com o aumento da competitividade da nova tecnologia devido ao seu menor custo de produção, e, portanto, maior eficiência no uso dos recursos escassos. O crescimento mundial anual

do PIB no cenário 2GMU é de 2,640% ao ano entre os anos de 2015 e 2050 enquanto que no Brasil o crescimento anual passou de 2,964% ao ano no cenário REF (ou passou de 2,967% ao ano no cenário 2G) para 2,970% ao ano no mesmo período.

No cenário 2GCI, o crescimento mundial em 2050 é US\$ 15,4 bilhões superior ao demonstrado no cenário REF enquanto que, no Brasil, há redução de US\$ 19,1 bilhões neste mesmo ano quando comparado ao cenário REF sendo que o crescimento mundial do PIB é de 2,640% ao ano, um pouco acima do 2,639% ao ano do cenário REF, e do Brasil 2,949% ao ano, ficando ligeiramente abaixo do crescimento verificado no cenário REF de 2,964% ao ano. Ainda em 2050, no cenário 2GCI verifica-se elevação de US\$ 30,9 bilhões no PIB dos EUA e elevação de US\$ 3,5 bilhões do PIB da Europa quando comparados ao cenário REF, ou seja, neste cenário o Brasil é o país que tem maior perda e os EUA e a Europa o maior ganho. Isto ocorre porque uma maior produção do etanol 2G para exportação necessita de mais fatores e insumos de produção, com desvio dos recursos econômicos disponíveis em outras atividades para a produção do biocombustível, o que prejudica os investimentos nessas outras atividades. Com isso, há uma redução na produção desses setores e consequente elevação nas importações dos produtos que deixaram de ser produzidos.

O PIB do Brasil projetado para 2050 é da ordem de US\$ 3,8 trilhões e, portanto, o impacto de US\$ 19,1 bilhões significa cerca de 0,5% do PIB naquele ano.

Esses resultados sugerem que as taxas anuais de crescimento quase não são afetadas pelos diferentes cenários, porém, é possível verificar que o ganho tecnológico do etanol 2G possibilita, em valores absolutos, um aumento no PIB, mesmo que pouco expressivo. Contudo, com a possibilidade de livre comércio internacional do etanol, o PIB brasileiro mostra-se ligeiramente inferior, o que indica que a forte especialização em uma commodity como o etanol atrai recursos produtivos de outros setores, reduzindo a produção e aumentando as importações desses, apesar da escala ser praticamente desprezível.

5. Conclusões

Existe uma enorme expectativa sobre o futuro desenvolvimento das fontes de energia renovável. Nesse contexto, o uso do bagaço da cana-de-açúcar nos próximos anos poderá ter utilização para produção do etanol 2G para atender a elevação da demanda de etanol, como poderá também servir como fonte de geração de energia renovável. Isso significa que o bagaço da cana-de-açúcar é um recurso comum tanto para a produção de etanol quanto para a produção de energia elétrica. Por outro lado, para que se viabilizem tanto a tecnologia do etanol 2G como a da cogeração, é necessário que os retornos dos investimentos sejam atrativos para suas produções, e, uma vez que ambas produções se utilizam do mesmo insumo bagaço, faz-se necessário verificar a evolução da utilização da biomassa pelas tecnologias. O presente estudo investigou a existência da competição entre o etanol 2G e a cogeração pela utilização do recurso comum às duas tecnologias que é o bagaço da cana-de-açúcar. Para tal, utilizou-se o modelo de equilíbrio geral computável EPPA adaptado de forma a incluir a tecnologia da produção de etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-de-açúcar e a cogeração de energia a partir desse mesmo resíduo. A literatura é carente de estudos sobre o tema, portanto, torna-se pertinente a presente investigação sobre o futuro da utilização da biomassa e seus impactos.

Os resultados do presente estudo indicam que o desenvolvimento do etanol de segunda geração (2G) deve gerar uma forte competição pela utilização do bagaço com a cogeração de energia elétrica, sendo que quanto maior for a competitividade da tecnologia 2G maior será a competição pelo bagaço. Projeta-se que, em um cenário de grande competitividade do etanol 2G, poderá haver falta de bagaço para a cogeração em determinados períodos.

Ainda, observa-se que não deve haver incremento significativo na demanda pelo etanol no mercado doméstico por conta do desenvolvimento do etanol 2G, uma vez que o aumento da

participação dos veículos flex-fuel na frota brasileira e a tendência de aumento no preço do petróleo e seus derivados ao longo do tempo já determinam uma demanda crescente pelo etanol de primeira geração. É importante considerar que o presente estudo não indica crescimento relevante dos veículos híbridos e elétricos na frota brasileira, que se mostram pouco atrativos ao consumidor em termos de relação custo-benefício. Nesse sentido, não são consideradas possíveis regulações futuras que imponham o aumento desses veículos na frota brasileira.

Outro resultado importante do presente estudo diz respeito à liberação de terras de cultivos de cana-de-açúcar para outras atividades quando do desenvolvimento do etanol 2G. Tal disponibilidade de áreas também ocorre devido aos ganhos de maior produtividade no cultivo da terra no longo prazo, após a demanda potencial aparentemente ser satisfeita. Ainda que pese essa hipótese da produtividade, sem o desenvolvimento do comércio de etanol, o impacto da produção de 2G no Brasil se daria mais sobre a liberação de área para outras culturas agrícolas, do que sobre o incremento da demanda doméstica, evitando assim argumentos de impactos indiretos sobre o uso da terra.

O aumento da produtividade da terra ao longo do tempo confere maior competitividade ao etanol 1G, diminuindo a participação relativa do etanol 2G no longo prazo, sem, contudo, impedir a elevação da sua produção em termos absolutos, e fazendo com que seja possível aumentar o volume de cogeração de energia. Isso significa que o aumento de produtividade do etanol 1G influencia em maior competitividade para a cogeração de energia frente ao etanol 2G na disputa pelo bagaço. É verificada também a elevação da geração de energia utilizando o bagaço no final do período indicando que parte da perda de competitividade relativa do etanol 2G é causada pela maior competição da cogeração pelo bagaço, ou seja, tanto a maior produtividade do etanol 1G quanto a maior competição da cogeração pelo bagaço influenciam na redução relativa da produção do etanol 2G.

No caso de um desenvolvimento do mercado internacional de etanol que permita o aumento das exportações do produto brasileiro, o etanol 2G apresenta substancial aumento na produção para atendimento da demanda externa. Neste caso, há aumento da área para produção de cana-de-açúcar como um todo e do etanol de primeira geração, aumentando o volume de bagaço disponível, sem comprometimento da produção de eletricidade pela cogeração. Esse resultado sugere que a expansão da produção brasileira de etanol até 2050 seria bem mais vigorosa no caso de desenvolvimento dos mercados internacionais para este produto, já que o potencial de expansão acelerada da demanda interna brasileira está restrito à participação dos veículos flex-fuel na frota de automóveis leves.

Os diferentes cenários de competição pelo uso do bagaço indicam poucos impactos sobre o PIB brasileiro, uma vez que a taxa anual de crescimento do produto agregado é praticamente a mesma em todos os cenários. Observa-se que o desenvolvimento tecnológico representado pelo etanol 2G traz um incremento de 0,003% ao ano no PIB. Esse resultado é condizente com as teorias de crescimento econômico, que consideram o avanço tecnológico o “motor” do crescimento. Contudo, no cenário de maior comércio internacional do etanol, há evidências de transferência dos fatores de produção de setores industriais e de serviços para a produção de etanol para exportação, sugerindo perdas nos termos de troca e alguma desindustrialização, apesar desses efeitos serem bastante modestos de 0,014% ao ano na taxa de crescimento do PIB nacional.

Referências Bibliográficas

BIRUR, D. K.; HERTEL, T. W.; TYNER, W. E. Impact of biofuel production on world agricultural markets: a computable general equilibrium analysis. *GTAP working paper*. n. 53. Center for Global Trade Analysis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2008. Disponível em: <<https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/4034.pdf>>. Acesso em 24nov. 2013.

BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A.; RAMAN, R. *GAMS: a user's guide*. Washington: GAMS Development Corporation, 1998.

DIMARANAN, B.; MCDOUGALL, R. *Global trade, assistance, and production: the GTAP 5 Data Base*. West Lafayette: Center for Global Trade Analysis, Purdue University, 2002.

GOLUB, A.; HERTEL, T. W.; LEE, H. Modeling Land-Use Change Impacts for Biofuels in the GTAP-BIO Framework. *Climate Change Economics*, v. 3, n. 3, 2012.

GURGEL, A. C. *Modelagem dinâmica de equilíbrio geral para o estudo de políticas climáticas*. 2011. 168 f. Tese (Livre Docência). – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2011a.

GURGEL, A. C. Impactos da política americana de estímulo aos biocombustíveis sobre a produção agropecuária e o uso da terra. *Rev. Econ. Sociol. Rural*, Brasília, v. 49, n. 1, mar. 2011b. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032011000100008&lng=en&nrm=iso> Acesso em 15 dez. 2013.

GURGEL, A. C.; CRONIN, T.; REILLY, J.; PALTSEV, S.; KICKLIGHTER, D.; MELILLO, J. Food, fuel, forests, and the pricing of ecosystem services. *American Journal of Agricultural Economics*. v. 93. n. 2, p. 342-348, 2011.

GURGEL, A. C.; REILLY, J. M.; PALTSEV, S.. Potential land use implications of a global biofuels industry. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, v. 5, n. 2, 2007.

HERTEL, T. *Global trade analysis: modeling and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

HERTEL, T. W., TYNER, W. E., BIRUR, D. K. Biofuels for all? Understanding the global impacts of multinational mandates. *GTAP working paper*. n. 51. Center for Global Trade Analysis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2008.

KEENEY, R.; HERTEL, T. W.; LEE, H. *The Indirect Land Use Impacts of United States Biofuel Policies: The Importance of Acreage, Yield, and Bilateral Trade Responses*, [S.l], [s.n], 2009.

LIMA, E. M. C. *Impactos de políticas climáticas internacionais sobre a economia brasileira*. 2011. 151f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2011.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E.; & SILVA, J. E. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and bioenergy*, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

MSANGI, S.; SULSER, T.; ROSEGRANT, M.; VALMONTE-SANTOS, R. Global Scenarios for Biofuels: Impacts and Implications for Food Security and Water Use. *10th Annual Conference on Global Economic Analysis*, West Lafayette, Indiana, 2007.

NAGAVAPARU, S. Brazilian ethanol: a gift or a threat to the environment and regional development? *Stanford Institute for Economic Policy Research Discussion*. Paper n. 07-39, Stanford University, Stanford, 2008.

OLIVIER, J. G. J.; BERDOWSKI, J. J. M. Global emissions sources and sinks. In: Berdowski, J.; Guicherit, R.; Heij, B. J. (Ed.). *The climate system*. Lisse: Balkema Publishers/Swets & Zeitlinger Publishers, 33-78, 2001. PALTSEV, S. *et al.* The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: version 4. *MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change*. Cambridge, 2005.

PIERMARTINI R.; TEH R. Demystifying Modeling Methods for Trade Policy. *WTO Discussion Papers*. n.10, 2005.

REILLY, J.; PALTSEV, S. Biomass energy competition for land. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. *Joint Program Report Series*. Cambridge, report 145, 2007.

REILLY, J.; CRONIN, T.; GURGEL, A.; SCHLOSSER, A.; MELILLO, J.; CAI, Y.; PALTSEV, S.; SOKOLOV, A.; KICKLIGHTER, D. Using Land To Mitigate Climate Change: Hitting the Target, Recognizing the Trade-offs. *Environmental Science & Technology*, v.46, n. 11, p. 5672-5679, 2012.

RUTHERFORD, T. F. Applied general equilibrium modeling with MPSGE as a GAMS subsystem: an overview of the modeling framework and syntax. *Computational Economics*, v.14 p. 1-46, 1999.

SADOULET, E.; DE JANVRY, A. *Quantitative development policy analysis*. Baltimore: The Johns Hopkins University, 1995.

SCARAMUCCI, J. A.; PERIN, C.; PULINO, P.; BORDONI, O. F. J. G.; CUNHA, M. P.; CORTEZ, L. A. B. Energy from sugarcane bagasse under electricity rationing in Brazil: a computable general equilibrium model. *Energy Policy* v. 34, n. 9, p. 986-992, 2006.

SHOVEN, J. B.; WHALLEY, J. *Applying general equilibrium*. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

TAHERIPOUR, F.; HERTEL, T. W.; TYNER, W. E.; BECKMAN, J. F.; BIRUR, D. K. Biofuels and their by-products: global economic and environmental implications. *Biomass and Bioenergy*, v. 34, n.3, p. 278-289, 2010.

UNICA – União da Indústria da Cana-de-açúcar. (2013). Disponível em: <<http://www.unica.com.br/>> 11 mai. 2013.

UNICA – União da Indústria da Cana-de-açúcar.(2010). Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética / [coordenação e organização Eduardo L. Leão de Sousa e Isaías de Carvalho Macedo] . -- São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010.

WING, S. I. Computable General Equilibrium Models and Their Use in Economy-Wide Policy Analysis. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, *Technical Note 6*, Cambridge, Massachusetts, 2004.