

Políticas de Combustíveis no Brasil: Modelo de Equilíbrio Parcial para o Bem-Estar Social e Emissões de Gases de Efeito Estufa

Henrique dos Santos Maxir¹; Madhu Khanna²; Mirian Rumenos Piedade Bacchi³

Resumo: A política de biocombustíveis RenovaBio, de 2017, e o novo sistema de precificação dos combustíveis fósseis anunciada pela Petrobras em 2016, modificaram a estrutura do mercado brasileiro de combustíveis. Tais mudanças buscam reduzir os impactos ambientais de ambos tipos de combustíveis, levando em consideração os efeitos para os produtores e consumidores. Desta forma, este artigo tem como objetivo formular um modelo de equilíbrio parcial considerando estas novas políticas, mostrando os efeitos isolados e conjuntos sobre bem-estar social e nível de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Brasil. Especificamente, pretende-se mostrar as principais relações matemáticas e a formação dos preços. Os resultados mostram que para o cenário RenovaBio há uma relação direta entre o mercado internacional de petróleo e os preços do etanol e do biodiesel, que por sua vez, impactam o setor de açúcar e soja. No cenário *First-Best*, no qual o governo aplica um imposto sobre as emissões de GEE, verifica-se que o preço do açúcar será afetado pelo preço internacional do petróleo, e os preços da gasolina A, diesel A e etanol hidratado aumentarão de acordo com a intensidade de emissões de GEE.

Palavras-chave: biodiesel; etanol; bem-estar social; emissões de GEE; RenovaBio

Abstract: The biofuel policy RenovaBio, from 2017, and the new pricing system of fossil fuels announced by Petrobras in 2016, transformed the structure of the Brazilian fuel market.

¹ Doutorando em Economia Aplicada na ESALQ/USP, Piracicaba, Brasil. E-mail: henriquemaxir@usp.br

² Professora do Department of Agricultural and Consumer Economics (ACE), University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA. E-mail: khanna1@illinois.edu

³ Professora do Departamento de Economia, Administração e Sociologia Rural (LES) da ESALQ/USP, Piracicaba, Brasil. E-mail: mrpbacch@usp.br

These changes aim to reduce the environmental impacts of both type of fuels, taking into account effects for producers and consumers. Therefore, this article aims to create a model of partial equilibrium considering these new policies, showing separately and jointly the effects to social welfare and the level of Greenhouse Gas (GHG) emissions in Brazil. Specifically, we aim to show the main equations and the price formation. The results show that in RenovaBio scenario there is a direct relationship between prices of oil from international market, ethanol and biodiesel, which affect the sectors of sugar and soybeans. On the other hand, the First Best scenario, which the government apply a tax on GHG emissions, imply that sugar price will be affected by the international oil price, and the prices of gasoline A, diesel A and hydrated ethanol will increase according to intensity of GEE emissions.

Keywords: biodiesel; ethanol; social welfare; GHG emissions; RenovaBio

1. Introdução

O mercado brasileiro de combustíveis sofreu profundas mudanças nos últimos anos. A coexistência dos mercados de combustíveis fósseis e biocombustíveis em país em desenvolvimento é um importante estudo de caso.

Desde a década de 1950, o governo brasileiro e a Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) tiveram papel fundamental no processo de tomada de decisões e no delineamento de políticas sobre o setor de petróleo e seus derivados (Vieira Filho; Fishlow, 2017). Na metade da década de 1970, a indústria de biocombustíveis, principalmente de etanol obtido da cana-de-açúcar, começou a ser estruturada como resultado da necessidade de substituição dos combustíveis fósseis (Moraes; Zilberman, 2014). Nos anos 1990, o monopólio da Petrobras na indústria petrolífera foi extinto e o mercado de etanol foi desregulamentado (Brasil, 1997; Moraes; Zilberman, 2014). Nos anos 2000, a agenda sobre os combustíveis no Brasil passou

a ter novos fatores que contribuíram para a expansão do consumo e da produção, tanto dos biocombustíveis como dos combustíveis fósseis, como a introdução dos veículos *flex fuel* e a descoberta de novas reservas de petróleo, o Pré-Sal (Rodrigues; Bacchi, 2017; ANP, 2017). Em 2004, a indústria de biodiesel foi impulsionada a partir do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), que em poucos anos determinou a mistura obrigatória de biodiesel no diesel proveniente do petróleo (Pousa et al., 2007; Oliveira; Coelho, 2017).

Em 2010, leis sobre o segmento de petróleo determinaram os direitos e o funcionamento da forma de exploração do Pré-Sal, assim como os mecanismos de transbordamento das receitas originárias de tais reservas para a sociedade (Brasil, 2010a, 2010b, 2010c; ANP, 2017). Em julho de 2017, a Petrobras, que por muitos anos reduziu artificialmente os preços dos combustíveis fósseis como da gasolina A (pura) e do diesel A (puro), começou a exercer uma nova política de precificação, deixando que os preços nacionais acompanhassem os preços internacionais. Ainda em 2017, o governo aprovou o Plano Nacional do Biocombustíveis (RenovaBio), uma política que busca expandir a produção de biocombustíveis e contribuir para a redução dos Gases de Efeito Estufa (GEE).

Segundo Hira e Oliveira (2009), considerando todas as tecnologias e energias renováveis, os biocombustíveis são substitutos viáveis para o petróleo, o caso do etanol no Brasil é um modelo de sucesso que serve de base para diversos países em desenvolvimento. O bom desempenho do setor de etanol no país mostra que é possível estabelecer uma trajetória baseada em baixa dependência por petróleo. Além disso, a emergência do setor de biodiesel representa uma oportunidade para futuros investimentos (Oliveira; Coelho, 2017).

A literatura ressalta diversos benefícios privados a partir do uso de combustíveis fósseis e externalidades positivas resultantes da produção e consumo de biocombustíveis. De acordo com Hira e Oliveira (2009), existem vantagens na utilização de derivados de

petróleo como combustíveis, pois: são menos corrosivos para os motores; possuem maior teor energético por unidade; têm menor temperatura de ignição; e geram diversos outros subprodutos, como plásticos e fertilizantes. Entretanto, as desvantagens são: maior nível de emissões de poluentes; se ocorrer algum tipo de vazamento, são nocivos ao meio ambiente; envolvem investimentos expressivos na exploração e no desenvolvimento; e, em muitos casos, demandam uma rede extensa de dutos para o transporte e distribuição.

No Brasil, o etanol de cana-de-açúcar apresenta baixa pegada de carbono se comparado com outras matérias primas provenientes da agricultura (Moraes; Zilberman, 2014). Pousa et al. (2007) enfatizam que o biodiesel apresenta características ambientais e sociais favoráveis, pois são: (i) biodegradáveis; (ii) obtidos de fontes renováveis; (iii) adequados para os motores, apresentando boa lubrificação, o que contribui para o aumento da vida útil; (iv) menos nocivos, com menores taxas de poluição a partir da combustão; e (v) representam uma boa opção para a indústria de óleo vegetal. Oliveira e Coelho (2017) ressaltam que o biodiesel é menos tóxico, as emissões de CO₂ são reduzidas em 69,3% se comparado com o diesel. Neste sentido, os benefícios do uso dos biocombustíveis e a preocupação dos formuladores de políticas com a redução das emissões dos GEE podem ser internalizados através do RenovaBio, que estabelece que os ofertantes de combustíveis fósseis comprem créditos de carbono emitidos pelo setor de biocombustíveis (Brasil, 2017).

Para o mercado de combustíveis fósseis, a Lei 9.478 determina que a Petrobras não é mais monopolista no Brasil, e sim a União. Entretanto, a estrutura de mercado ainda está muito próxima do caso de monopólio, há uma concentração dos direitos de propriedade de exploração e produção de petróleo e seus derivados. No nível de refino, por exemplo, em 2017, a parcela de mercado da Petrobras foi de 98,64% (ANP, 2018). Estes fatores colocam a Petrobras como um monopólio *de facto*, contribuindo significativamente para a formação

dos preços dos combustíveis fósseis no Brasil. Para Khanna, Nuñez e Zilberman (2016), no Brasil, houve por muitos anos a existência de um *cap* aplicado no preço do petróleo pela Petrobras, ou seja, um subsídio implícito para manter os preços da gasolina A e diesel A livres de volatilidade, resultando em uma trajetória quase que linear destes preços ao nível das refinarias no período anterior ao novo sistema de precificação. Adicionalmente, a mudança da Petrobras na forma de ajuste dos preços dos derivados do petróleo, a qual considera os preços internacionais, indica que a política prévia de precificação não era adequada para o fluxo de caixa da companhia, visto que, segundo Moraes e Zilberman (2014), nos últimos anos a empresa precisou importar gasolina A com preço internacional maior que o exercido em território nacional.

Portanto, este artigo tem como objetivo desenvolver um modelo matemático que descreva os efeitos das políticas de combustíveis fósseis e biocombustíveis adotadas no Brasil, mostrando a formação de preços, os impactos para o bem-estar social e o nível de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE). Especificamente, pretende-se ampliar o modelo de equilíbrio parcial proposto por Khanna, Nuñez e Zilberman (2016), expandindo para os setores de diesel, biodiesel e soja e introduzindo o novo o sistema de precificação de combustíveis fósseis e a política do RenovaBio.

2. Aspectos Teóricos

2.1. Novas Políticas no Mercado de Combustíveis no Brasil

Em junho de 2017, a Petrobras estabeleceu uma nova política de precificação dos combustíveis fósseis, principalmente da gasolina e do diesel vendidos em suas refinarias. Desde de julho de 2017, o preço do diesel e da gasolina são ajustados com maior frequência, sendo mensal, semanal ou até mesmo diária. Esta política foi discutida desde outubro de 2016, quando o Grupo Executivo de Mercado e Preços (GEMP) da Petrobras ressaltou que

os ajustes de preços no período pré-política não eram suficientes para acompanhar o aumento da volatilidade da taxa de câmbio (R\$/US\$) e dos preços internacionais do petróleo e seus derivados (Petrobras, 2017). O novo sistema de precificação pondera dois fatores (Petrobras, 2016): 1) a paridade com o mercado internacional, considerando taxas de frete de navios petroleiros, o custo de transporte interno e taxas portuárias; e 2) uma margem em relação a produção e comercialização, buscando remunerar os riscos como a volatilidade da taxa de câmbio, os preços de estadias portuárias e margem de lucro. Portanto, os preços nunca serão fixados abaixo da paridade internacional.

Para o setor de biocombustíveis, o Ministério de Minas e Energia (MME) propôs em dezembro de 2016 o RenovaBio. A estrutura do RenovaBio contou com contribuições do governo e do setor produtivo. O primeiro documento relacionado a esta política foi disponibilizado para consulta pública entre fevereiro e março de 2017. Em julho de 2017, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) aprovou as diretrizes e encaminhou, na forma de projeto de Lei, para a avaliação na Câmara de Deputados e para o Senado brasileiro, que aprovaram em novembro e dezembro de 2017, respectivamente (MME, 2018).

O presidente do Brasil, Michel Temer, sancionou o RenovaBio como a Lei 13.576 de 26 de dezembro de 2017 (Brasil, 2017; 2018). Os objetivos do RenovaBio são: A) contribuir para que o Brasil atinja os compromissos firmados no Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UN, 2015); B) aumentar a eficiência energética, reduzindo as emissões de GEE no setor de biocombustíveis; C) expandir a produção e garantir a oferta regular dos biocombustíveis; e D) melhorar a competitividade de diferentes tipos de biocombustíveis no mercado brasileiro (Brasil, 2017).

Segundo Brasil (2017), existem seis instrumentos no RenovaBio: 1) Meta de redução de emissões de GEE: considera no mínimo 10 anos a partir do estabelecimento do

RenovaBio; 2) Crédito de Descarbonização (CBIO): a emissão primária de CBIOs será realizada na forma escritural de acordo com o volume de biocombustível produzido, importado e comercializado pelo agente autorizado pela ANP, ou seja, a quantidade de CBIO será definida de acordo com a Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA), que será estabelecida pelo Certificado da Produção Eficiente de Biocombustíveis (CPEB); 3) CPEB: será concedido para os produtores e importadores de biocombustíveis que atingirem os níveis requeridos de aumento da eficiência e de produtividade baseado no ciclo de vida⁴. Portanto, serão comparados o teor energético e o nível de emissões da produção de biocombustíveis em relação aos combustíveis fósseis equivalentes; 4) Misturas obrigatórias de biocombustíveis em combustíveis fósseis: Lei 13.033 para a mistura de 27% de etanol anidro para cada unidade de gasolina A e a Lei 13.263, para a mistura de 10% de biodiesel para cada unidade de diesel A (Brasil, 2016); 5) Incentivos fiscais, financeiros e de crédito; e 6) Ações que levam em conta o Acordo de Paris.

A Figura A1 no Apêndice I mostra o fluxo de funcionamento do RenovaBio. Primeiro, os produtores e importadores de biocombustíveis fazem o requerimento de seus CBIOs de acordo com o volume produzido, importado ou vendido. Segundo, através da RenovaCalc é obtido o valor do ciclo de vida do produto, o qual é usado pela Firma Inspectora para avaliar se está de acordo com a NEEA. Terceiro, se a NEEA estiver no nível adequado, o produtor ou importador recebe o CPEB e, finalmente, pode obter os CBIOs. Quarto, os produtores utilizam uma instituição financeira (escrituradores) para disponibilizar os CBIOs no mercado de capitais para serem comercializados.

⁴ De acordo com Brasil (2017), o ciclo de vida considera os consecutivos estágios de produção de determinado produto, desde a produção da matéria prima até a disposição final. Oliveira e Coelho (2017), enfatizam que a mensuração do ciclo de vida é uma ferramenta que permite quantificar os efeitos ambientais relacionados ao uso de recursos naturais e energia para produzir um bem, permitindo estimar os danos ao meio ambiente acumulados ao longo de toda a cadeia produtiva.

Os ofertantes de combustíveis fósseis precisam compensar as emissões de GEE geradas pelos seus produtos através da compra de CBIOS. A meta anual (ou cota) de emissões de GEE permitida para cada ofertante de combustíveis fósseis é calculada proporcionalmente a sua parcela de mercado sobre o volume comercializado no ano anterior. A ANP terá papel importante no RenovaBio, a agência reguladora supervisionará: 1) a Firma Inspetora, responsável por conceder os CBIOS para os ofertantes de biocombustíveis; 2) os CPEBs; 3) os ofertantes primários, produtores e importadores; 4) e o cumprimento das metas individuais dos ofertantes de combustíveis fósseis (EPE, 2018).

3. Metodologia

3.1. Pressupostos do Modelo Matemático de Equilíbrio Parcial: Produção e Consumo para o Caso do RenovaBio

Seja um consumidor representativo que demanda: ge = conjunto de produtos composto por gasolina C e etanol; kb = conjunto composto por diesel C, biodiesel e outros produtos do petróleo; s = açúcar; sb = soja para alimentação. Assumindo que ge é um conjunto de produtos: g = gasolina pura (gasolina A); h = etanol hidratado; a = etanol anidro. O conjunto kb é formado por: k = diesel puro (diesel A); b = biodiesel; op = outros produtos de petróleo. O etanol hidratado (h), o etanol anidro (a), o açúcar para consumo doméstico (s^n) e para exportação (s^x) são obtidos da cana-de-açúcar (sc):

$$sc = \tau_a a + \tau_h h + \tau_s (s^n + s^x) \quad (1)$$

onde, τ_a = coeficiente técnico que indica o quanto de cana-de-açúcar é necessário para cada unidade de etanol anidro; τ_h = coeficiente técnico sobre a quantidade de cana-de-açúcar para produzir uma unidade de etanol anidro; τ_s = coeficiente técnico de unidades de cana-de-açúcar para produzir uma unidade de açúcar. O etanol e a gasolina são substitutos, de forma que φ_g representa a razão da capacidade energética entre ambos, em que o etanol (hidratado ou anidro) possui teor energético menor que a gasolina A, ou seja, $\varphi_g < 1$.

No Brasil, a principal matéria-prima utilizada para produzir biodiesel é a soja (sb):

$$sb = \tau_{sb}b + sb^n + sb^x \quad (2)$$

onde, τ_{sb} = coeficiente técnico de soja para produzir uma unidade de biodiesel; sb^n = consumo doméstico de soja para alimentação; e sb^x = exportações de soja. Diesel A e biodiesel são complementares. O teor energético dos produtos derivados do petróleo é dado por dois fatores: φ_k = a razão entre o fator energético de biodiesel e diesel, em que $\varphi_k < 1$; e φ_{op} = a razão entre o fator energético de outros produtos de petróleo e diesel.

O Brasil é tomador de preços no mercado internacional de petróleo, sendo o preço deste combustível dado por \bar{p}_o^w . A gasolina pura (g), o diesel puro (k) e outros produtos de petróleo (op) são obtidos da oferta doméstica de petróleo (o) e por meio de importações (o^x) (quando há excesso de produção, há exportações, o que é denotado por $-o^x$).

$$o = \gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x \quad (3)$$

Em que, γ_g = taxa de conversão de gasolina para energia em óleo equivalente; γ_k = taxa de conversão de diesel para energia em óleo equivalente; γ_{op} = taxa de conversão de outros produtos de petróleo para energia em óleo equivalente. As funções de demanda de ge , kb , s e sb são negativamente inclinadas em suas formas inversas. A área abaixo de cada função de demanda é dada por:

$$\int_0^{ge} (\alpha_{ge} + \beta_{ge} ge) dge \quad (4)$$

$$\int_0^{kb} (\alpha_{kb} + \beta_{kb} kb) dkb \quad (5)$$

$$\int_0^{s^n} (\alpha_{s^n} + \beta_{s^n} s^n) ds^n \quad (6)$$

$$\int_0^{s^x} (\alpha_{s^x} + \beta_{s^x} s^x) ds^x \quad (7)$$

$$\int_0^{sb^n} (\alpha_{sb^n} + \beta_{sb^n} sb^n) dsb^n \quad (8)$$

$$\int_0^{sb^x} (\alpha_{sb^x} + \beta_{sb^x} sb^x) dsb^x \quad (9)$$

onde, α 's são os interceptos e os β 's as inclinações das funções de demanda (elasticidades). As funções de oferta são positivamente inclinadas. A área abaixo da função de oferta de petróleo (10) representa os custos de produção dos combustíveis fósseis, a área embaixo da função de oferta de cana-de-açúcar (10) é o custo de produção de etanol (anidro e hidratado) e açúcar e área debaixo da curva de oferta de soja (12) é o custo de produção de biodiesel e soja. Os α 's são os interceptos e os β 's as elasticidades das relações de oferta.

$$\int_0^o (\alpha_o + \beta_o o) do \quad (10)$$

$$\int_0^{sc} (\alpha_{sc} + \beta_{sc} sc) dsc \quad (11)$$

$$\int_0^{sb} (\alpha_{sb} + \beta_{sb} sb) dsb \quad (12)$$

Assumindo tecnologias de produção do tipo Leontief, então: z_g = custo de produção de uma unidade de gasolina; z_k = custo para produzir uma unidade de diesel; z_{op} = custo de produção de uma unidade de outros produtos de petróleo; z_h = custo de processamento de uma unidade de etanol hidratado; z_a = custo de processamento de uma unidade de etanol anidro; z_b = custo de processamento de biodiesel; z_s = custo de processamento de uma unidade de açúcar; e z_{sb} = custo de produção uma unidade de soja.

Existem duas políticas de mistura obrigatória no mercado brasileiro de combustíveis. A primeira é a adição de etanol anidro na gasolina pura, definida a partir de θ , o percentual de etanol anidro na gasolina A, formando uma unidade de gasolina C. A segunda é a mistura de biodiesel no diesel A, em que o percentual de mistura obrigatória do biodiesel no diesel A é ϕ , resultando em uma unidade de diesel C. Portanto:

$$\frac{1 - \theta}{\theta} g = a \quad (13)$$

$$\frac{1 - \phi}{\phi} k = b \quad (14)$$

O governo brasileiro impõe impostos sobre os combustíveis fósseis e renováveis, definidos como: t^g = imposto sobre gasolina; t^k = imposto sobre o diesel; t^{op} = imposto

sobre outros produtos do petróleo; t^h = imposto sobre etanol hidratado; t^a = imposto sobre etanol anidro; e t^b = imposto sobre biodiesel. Entretanto, em diversos momentos foi adotada uma política de redução artificial dos preços dos combustíveis fósseis por meio de um *cap*, subsídio sobre o preço nacional de petróleo (Khanna; Nuñez; Zilberman, 2016), o qual é modelado como t^o .

A política do RenovaBio é tomada como uma receita adicional para os produtores de biocombustíveis (etanol hidratado, anidro e biodiesel) e um custo extra para os produtores de combustíveis fósseis (gasolina A, diesel A e outros produtos do petróleo). Seja p^{cbio} o preço do CBIO, r^{cbio} a receita total dos CBIOs e c^{cbio} o custo total dos CBIOs:

$$r^{cbio} = p^{cbio}(h + a + b) \quad (15)$$

$$c^{cbio} = p^{cbio}(g + k + op) \quad (16)$$

Assumindo condições de equilíbrio de mercado, não-negatividade e que o excedente do consumidor para todos estes bens é aditivo, a escolha entre combustíveis fósseis, biocombustíveis, açúcar e soja é dada pelo seguinte problema de otimização do bem-estar social:

$$\begin{aligned} \max_{g,k,op,a,h,b,s^n,s^x, sb^n, sb^x, o^x} & \int_0^{ge} (\alpha_{ge} + \beta_{ge} ge) dge + \int_0^{kb} (\alpha_{kb} + \beta_{kb} kb) dkb \quad (17) \\ & + \int_0^{s^n} (\alpha_{s^n} + \beta_{s^n} s^n) ds^n + \int_0^{s^x} (\alpha_{s^x} + \beta_{s^x} s^x) ds^x \\ & + \int_0^{sb^n} (\alpha_{sb^n} + \beta_{sb^n} sb^n) dsb^n + \int_0^{sb^x} (\alpha_{sb^x} + \beta_{sb^x} sb^x) dsb^x + \bar{p}_o^w o^x \\ & + t^o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op) - \int_0^o (\alpha_o + \beta_o o) do - \int_0^{sc} (\alpha_{sc} + \beta_{sc} sc) dsc \\ & - \int_0^{sb} (\alpha_{sb} + \beta_{sb} sb) dsb - z_g g - z_k k - z_{op} op - z_h h - z_a a - z_b b \\ & - z_s(s^n + s^x) - z_{sb}(sb^n + sb^x) - t^g g - t^k k - t^{op} op - t^h h - t^a a - t^b b \\ & - p^{cbio}(g + k + op) + p^{cbio}(h + a + b) \end{aligned}$$

Sujeito a:

$$ge = g + \varphi_g h + \varphi_g a \quad (18)$$

$$kb = k + \varphi_k b + \varphi_{op} op \quad (19)$$

$$sc = \tau_a a + \tau_h h + \tau_s (s^n + s^x) \quad (20)$$

$$sb = \tau_{sb} b + sb^n + sb^x \quad (21)$$

$$o = \gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x \quad (22)$$

$$\frac{1-\theta}{\theta} g = a \quad (23)$$

$$\frac{1-\phi}{\phi} k = b \quad (24)$$

O Lagrangeano do problema é dado por:

$$\begin{aligned} L_1 = & \int_0^{g+\varphi_g h+\varphi_g a} (\alpha_{ge} + \beta_{ge} ge) dge + \int_0^{k+\varphi_k b+\varphi_{op} op} (\alpha_{kb} + \beta_{kb} kb) dkb \quad (25) \\ & + \int_0^{s^n} (\alpha_{s^n} + \beta_{s^n} s^n) ds^n + \int_0^{s^x} (\alpha_{s^x} + \beta_{s^x} s^x) ds^x \\ & + \int_0^{sb^n} (\alpha_{sb^n} + \beta_{sb^n} sb^n) dsb^n + \int_0^{sb^x} (\alpha_{sb^x} + \beta_{sb^x} sb^x) dsb^x + \bar{p}_o^w o^x \\ & + t^o (\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op) - \int_0^{\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x} (\alpha_o + \beta_o o) do \\ & - \int_0^{\tau_a a + \tau_h h + \tau_s (s^n + s^x)} (\alpha_{sc} + \beta_{sc} sc) dsc - \int_0^{\tau_{sb} b + sb^n + sb^x} (\alpha_{sb} + \beta_{sb} sb) dsb \\ & - z_g g - z_k k - z_{op} op - z_h h - z_a a - z_b b - z_s (s^n + s^x) - z_{sb} (sb^n + sb^x) \\ & - t^g g - t^k k - t^{op} op - t^h h - t^a a - t^b b - p^{cbio} (g + k + op) \\ & + p^{cbio} (h + a + b) + \lambda_g \left[\frac{1-\theta}{\theta} g - a \right] + \lambda_k \left[\frac{1-\phi}{\phi} k - b \right] \end{aligned}$$

Sendo $\lambda_g > 0$ o preço sombra associado ao mandato de mistura do etanol anidro com a gasolina A e $\lambda_k > 0$ o preço sombra da política de mistura de biodiesel com diesel A.

3.2. Pressupostos do Modelo Matemático de Equilíbrio Parcial: Nível Socialmente

Ótimo de Produção e Consumo (*First-Best*)

A política caracterizada como *First-Best* para o nível de consumo de combustíveis, açúcar e soja é obtida a partir das seguintes pressuposições: i) o Brasil possui poder de mercado no comércio internacional de açúcar para definir preços; ii) o país possui poder de mercado no mercado internacional de soja; iii) o *cap* referente ao preço do petróleo é retirado; iv) não há mistura obrigatória de etanol anidro na gasolina A, portanto, o mercado opera apenas com etanol hidratado; v) não há política de mistura obrigatória de biodiesel

com diesel A, implicando na não existência de um mercado de biodiesel; vi) não há impostos sobre os combustíveis fósseis e renováveis; e vii) não há a política do RenovaBio.

Para contabilizar os efeitos das externalidades negativas, é adicionado no modelo o Dano Social Marginal (DSM) causado pelas emissões de GEE e o nível de emissões por unidade e tipo de combustível: σ_o = emissões de GEE por unidade de petróleo; σ_h = emissões de GEE por unidade de etanol hidratado; σ_{sb} = emissões de GEE por unidade de soja; σ_s = emissões de GEE por unidade de açúcar; ε^m = valor do DSM devido as emissões de GEE. Os coeficientes σ_h e σ_s contabilizam as emissões derivadas do cultivo da cana-de-açúcar e σ_{sb} considera as emissões da produção de soja. As emissões agregadas de GEE são:

$$\sigma_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) + \sigma_h h + \sigma_s(s^n + s^x) + \sigma_{sb}(sb^n + sb^x) \quad (26)$$

O Lagrangeano (L_2) do planejador social é:

$$\begin{aligned} L_2 = & \int_0^{g+\varphi_g h} (\alpha_{ge} + \beta_{ge} ge) dge + \int_0^{k+\varphi_{op} op} (\alpha_{kb} + \beta_{kb} kb) dkb + \int_0^{s^n} (\alpha_{s^n} + \beta_{s^n} s^n) ds^n \\ & + \int_0^{s^x} (\alpha_{s^x} + \beta_{s^x} s^x) ds^x + \int_0^{sb^n} (\alpha_{sb^n} + \beta_{sb^n} sb^n) dsb^n \\ & + \int_0^{sb^x} (\alpha_{sb^x} + \beta_{sb^x} sb^x) dsb^x + \bar{p}_o^w o^x - \int_0^{\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x} (\alpha_o + \beta_o o) do \\ & - \int_0^{\tau_h h + \tau_s(s^n + s^x)} (\alpha_{sc} + \beta_{sc} sc) dsc - \int_0^{sb^n + sb^x} (\alpha_{sb} + \beta_{sb} sb) dsb - z_g g \\ & - z_k k - z_{op} op - z_h h - z_s(s^n + s^x) - z_{sb}(sb^n + sb^x) \\ & - \varepsilon^m[\sigma_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) + \sigma_h h + \sigma_s(s^n + s^x) + \sigma_{sb}(sb^n + sb^x)] \end{aligned} \quad (27)$$

4. Resultados e Discussões

4.1. Resultados para o Modelo de Produção e Consumo com o RenovaBio

Utilizando as condições Kuhn-Tucker para solução de interior, tem-se as derivadas parciais de (L_1) (Apêndice II). A partir da equação (A.11) do Apêndice II, verifica-se que o preço do petróleo é dado pelo preço internacional (28) e, conseqüentemente, o nível de produção de petróleo é determinado por fatores externos, e não por políticas domésticas.

$$\bar{p}_o^w = \alpha_o + \beta_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) \quad (28)$$

O preço da gasolina C (p^{ge}) é definido como a média ponderada do preço da gasolina A e do etanol anidro (29). O mandato de mistura é modelado como um subsídio *ad valorem* no consumo de etanol, $-\lambda_g$, e um imposto *ad valorem* no consumo de gasolina $+(1-\theta)\lambda_g/\theta$.

$$p^{ge} g + p^{ge} \varphi_g a \quad (29)$$

Das equações (A.1), (A.5) e (28) é possível determinar p^{ge} . A primeira parcela de (29) é dada por (30), composta pelo preço internacional do petróleo excluindo-se o *cap* mais os custos de produção da gasolina A, os impostos aplicados sobre a gasolina A, o preço do CBIO e o imposto *ad valorem* $+(1-\theta)\lambda_g/\theta$.

$$p^{ge} g = \left[(p_o^w - t^o)\gamma_g + z_g + t^g + p^{cbio} + \frac{(1-\theta)\lambda_g}{\theta} \right] g \quad (30)$$

Se o custo marginal da cana-de-açúcar é (31), então, a segunda parcela de (29) é dada por (32), ou seja, o custo marginal da cana-de-açúcar e o custo de processamento mais impostos do etanol anidro, excluindo-se preço do CBIO e o subsídio implícito $-\lambda_g$. Portanto, p^{ge} é dado por (33):

$$P^{sc} = \alpha_{sc} + \beta_{sc}(\tau_a a + \tau_h h + \tau_s(s^n + s^x)) \quad (31)$$

$$p^{ge} \varphi_g a = [P^{sc} \tau_a + z_a + t^a - p^{cbio} - \lambda_g] a \quad (32)$$

$$p^{ge} = \frac{\left[(p_o^w - t^o)\gamma_g + z_g + t^g + p^{cbio} + \frac{(1-\theta)\lambda_g}{\theta} \right] g + [P^{sc} \tau_a + z_a + t^a - p^{cbio} - \lambda_g] a}{g + \varphi_g a} \quad (33)$$

O preço do etanol hidratado (p^h) depende do preço internacional do petróleo, dos custos e impostos da gasolina A, do preço do CBIO adquirido pelos ofertantes de gasolina A e o imposto sobre gasolina devido a mistura. Além disso, depende do preço da cana-de-açúcar, dos custos de processamento e impostos do etanol hidratado, menos o preço CBIO e o subsídio *ad valorem* $-\lambda_g$. Para observar a formação deste preço, considera-se o teor energético equivalente de etanol hidratado em termos de gasolina (34), e o teor energético do combustível misturado (35), então P^h é dado por (36), que pode ser reescrito como (37):

$$p^h = \varphi_g P^{ge} \quad (34)$$

$$(1 - \theta) + \theta \varphi_g \quad (35)$$

$$p^h(1 - \theta) + P^h \theta \varphi_g \quad (36)$$

$$p^h \quad (37)$$

$$= \frac{\varphi_g \left\{ \left[(p_o^w - t^o) \gamma_g + z_g + t^g + p^{cbio} + \frac{(1 - \theta) \lambda_g}{\theta} \right] (1 - \theta) + [P^{sc} \tau_h + z_h + t^h - p^{cbio} - \lambda_g] \theta \right\}}{(1 - \theta) + \theta \varphi_g}$$

O custo marginal para a soja é dado por (38):

$$P^{sb} = \alpha_{sb} + \beta_{sb} (\tau_{sb} b + sb^n + sb^x) \quad (38)$$

O preço do diesel C é a média ponderada do preço do diesel A e do preço do biodiesel, considerando suas respectivas parcelas para cada unidade do combustível (39). A partir das equações (A.2), (A.6), (39), (40) e (41) é possível verificar que a primeira parcela de P^{kb} , dada em (42), depende do preço internacional do petróleo menos o *cap*, do custo de produção do diesel A, do imposto sobre o diesel A, do preço do CBIO e do imposto *ad valorem* $+(1 - \phi) \lambda_k / \phi$. A segunda parcela de P^{kb} depende do preço da soja, do custo de processamento do biodiesel, do imposto sobre biodiesel, do preço do CBIO e de $-\lambda_k$, o subsídio implícito.

$$P^{kb} k + P^{kb} \varphi_k b \quad (39)$$

$$P^{kb} k = \left[(p_o^w - t^o) \gamma_k + z_k + t^k + p^{cbio} + \frac{(1 - \phi) \lambda_k}{\phi} \right] k \quad (40)$$

$$P^{kb} \varphi_k b = [P^{sb} \tau_{sb} + z_b + t^b - p^{cbio} - \lambda_k] b \quad (41)$$

$$P^{kb} = \frac{\left[(p_o^w - t^o) + z_k + t^k + p^{cbio} + \frac{(1 - \phi) \lambda_k}{\phi} \right] k + [P^{sb} \tau_{sb} + z_b + t^b - p^{cbio} - \lambda_k] b}{k + \varphi_k b} \quad (42)$$

É interessante observar o preço do açúcar, assim como o preço do etanol hidratado, também depende do preço internacional de petróleo, há uma relação entre estes preços devido os benefícios marginais de se transformar cana-de-açúcar em açúcar e etanol conjuntamente, o que pode ser observado a seguir. Utilizando a equação (A.7) obtém-se o preço do açúcar no mercado doméstico (43). Resolvendo (A.4) e (A.7) para o custo marginal da cana-de-açúcar (31), tem-se (44). De (A.4) e (45) obtém-se (46):

$$P^{sn} = \alpha_{sc} \tau_s + \beta_{sc} \tau_s (\tau_a a + \tau_h h + \tau_s (s^n + s^x)) + z_s \quad (43)$$

$$p^{sc} = \frac{P^{s^n} - z_s}{\tau_s} \quad (44)$$

$$\varphi_g P^{ge} = P^{sc} \tau_h + z_h + t^h - p^{cbio} \quad (45)$$

$$\varphi_g P^{ge} = (P^{s^n} - z_s) \frac{\tau_h}{\tau_s} + z_h + t^h - p^{cbio} \quad (46)$$

Portanto, de acordo com (33), (37) e (46), se o preço da gasolina C aumenta, devido um aumento do preço internacional do petróleo, o preço do açúcar aumentará também. Por outro lado, da equação (A.9), observa-se que o preço doméstico da soja é (47). Resolvendo (A.6) e (A.9) para (47), então o preço de oferta da soja é (48). De (A.6) e (49), obtém-se (50), que mostra que se o preço internacional do petróleo aumentar, o preço do diesel C cresce, o que reflete no acréscimo do preço da soja.

$$P^{sb^n} = \alpha_{sb} + \beta_{sb}(\tau_{sb}b + sb^n + sb^x) + z_{sb} \quad (47)$$

$$P^{sb} = P^{sb^n} - z_{sb} \quad (48)$$

$$\varphi_k P^{kb} = P^{sb} \tau_{sb} + z_b + t^b - p^{cbio} - \lambda_k \quad (49)$$

$$\varphi_k P^{kb} = (P^{sb^n} - z_{sb}) \tau_{sb} + z_b + t^b - p^{cbio} - \lambda_k \quad (50)$$

4.2. Resultados para o Modelo *First-Best*

O nível de produção e consumo dos bens selecionados será determinado pelo custo marginal e pelo custo das externalidades negativas associadas ao valor do DSM das emissões de GEE. Da equação (A.20) do Apêndice III, tem-se que o preço do petróleo será maior e seu consumo sofrerá redução devido a imposição da taxa sobre as emissões.

$$\bar{p}_o^w = \alpha_o + \beta_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) + \varepsilon^m \sigma_o \quad (51)$$

De (A.12), o preço de *ge* (gasolina A, pois não há mistura com etanol anidro) será determinado pelo preço internacional do petróleo, considerando o valor do imposto sobre o nível de emissões $\varepsilon^m \sigma_o \gamma_g$, e o custo de produção da gasolina A, como mostra (52). A partir de (A.13), verifica-se que o mesmo ocorre para o preço de *kb* (diesel A, pois não existe mercado de biodiesel neste cenário), como representado em (53). E de (A.15), tem-se que o etanol será taxado de acordo com a sua intensidade de emissões, $\varepsilon^m \sigma_h$, como em (54).

$$P^{ge} = \gamma_g \bar{p}_o^w + z_g \quad (52)$$

$$P^{kb} = \gamma_k \bar{p}_o^w + z_k \quad (53)$$

$$\varphi_g P^{ge} = P^{sc} \tau_h + z_h + \varepsilon^m \sigma_h \quad (54)$$

Utilizando (A.16) se obtém (55), que inserindo em (54) e substituindo P^{ge} de (52) resulta em (56). Portanto, em (56) verifica-se que o preço do açúcar está relacionado com o preço internacional do petróleo.

$$P^{sc} = \frac{P^{sn} - z_s - \varepsilon^m \sigma_s}{\tau_s} \quad (55)$$

$$\varphi_g \gamma_g \bar{p}_o^w + z_g = (P^{sn} - z_s - \varepsilon^m \sigma_s) \frac{\tau_h}{\tau_s} + z_h + \varepsilon^m \sigma_h \quad (56)$$

4.3. Cenários

O modelo proposto permite definir diferentes estratégias para os setores de combustíveis fósseis e biocombustíveis para o caso brasileiro. A partir das equações (25) e (27), associadas às políticas *RenovaBio* e *First-Best*, respectivamente, é possível traçar cenários relaxando algumas pressuposições ou combinando-as, como mostra a Tabela 1. Para a comparação entre os efeitos das diversas políticas sugere-se sempre contrastar o cenário Base com um alternativo. Ademais, ressalta-se que há possibilidade de estimar cenários para diferentes políticas para anos específicos, baseando-se em períodos anteriores ou projeções futuras.

Evidentemente, a calibração depende de: i) estimativas das elasticidades da demanda e oferta dos bens considerados, o que pode ser encontrado em literatura especializada; ii) quantidade produzida, consumida e exportada dos produtos, que está disponível nos principais relatórios dos respectivos setores; iii) preços dos bens analisados, presente nos sites de agências reguladoras, associações e centros de pesquisa; iv) valores dos impostos/subsídios, disponível nos sites do governo; e vi) taxas de conversão para o teor energético específico, encontrado em centros de pesquisa sobre o assunto.

Tabela 1. Cenários

Políticas	Descrição
A. Base	Mercado competitivo, não há nenhum tipo de intervenção do governo.
B. Etanol	Considera apenas a mistura obrigatória de etanol anidro na gasolina A.
C. Biodiesel	Inclui apenas o percentual obrigatório de biodiesel no diesel A.
D. Etanol e Biodiesel	Assume a presença de mistura obrigatória de etanol anidro na gasolina A e biodiesel no diesel A.
E. Impostos	Considera somente a imposição de impostos aplicados pelo governo.
F. Cap - subsídio	Contabiliza exclusivamente o subsídio indireto aplicado pela Petrobras no preço do petróleo, segundo Khanna, Nuñez e Zilberman (2016).
G. Status Quo 2013	Políticas vigentes em 2013, ou seja, a adição da políticas D, E e F. Segundo Khanna, Nuñez e Zilberman (2016) em 2013 havia um <i>cap</i> no preço do petróleo por parte da Petrobras.
H. Status Quo 2018	Políticas vigentes em 2018, período posterior ao anúncio da Petrobras sobre o aumento da frequência dos ajustes nos preços dos combustíveis fósseis, eliminando o <i>cap</i> . Neste cenário são incluídas as políticas D e E.
I. <i>First-Best</i>	Admite somente a cobrança de um imposto aplicado pelo governo sobre as emissões de GEE com o objetivo de abater os Danos Sociais Marginais (DSM) da poluição.
J. RenovaBio	Incorpora o custo adicional dos CBIOS para os fornecedores de combustíveis fósseis e a receita extra dos CBIOS para os ofertantes de biocombustíveis, além de considerar as políticas D e E.

Fonte: preparado pelos autores

5. Conclusão

Este artigo propôs um modelo matemático de equilíbrio parcial para o mercado brasileiro de combustíveis, observando os seus transbordamentos para outros dois mercados, o de açúcar e de soja. A partir das especificações de um modelo para a política do RenovaBio e de outro incorporando uma política do tipo *First-Best*, foi possível especificar duas funções bem-estar social e derivar as principais condições.

Para o cenário RenovaBio foi observado que o preço internacional do petróleo tem papel relevante, pois determina o preço da gasolina C e do diesel C no mercado doméstico, assim como o preço do etanol e biodiesel, afetando o nível de produção de açúcar e soja e seus preços. Além disso, no cenário *First-Best*, a inclusão de um imposto como forma de abater as externalidades negativas das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) mostra que os preços da gasolina A, diesel A e etanol hidratado serão taxados de acordo com a

intensidade de emissões de GEE, e que o preço do açúcar será afetado pelo preço internacional do petróleo.

Espera-se que os modelos apresentados sirvam de base para outros modelos sobre o setor de combustíveis no Brasil. Por fim, como pesquisa futura sugere-se a calibragem de cenários com dados reais a partir do auxílio de *softwares* específicos de otimização, buscando-se avaliar os efeitos das políticas de combustíveis no Brasil.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a Capes pela bolsa de Doutorado de Demanda Social entre 03/2016 a 07/2018 e a bolsa do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE-Capes) de 08/2018 a 01/2019, além do apoio do Instituto Escolhas por meio da bolsa de doutorado da Cátedra de Economia e Meio Ambiente concedida para 03/2018 a 02/2019.

7. Referências

ANP. 2017. **O Pré-Sal**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa/2-uncategorised/4076-o-pre-sal>. Acessado em: 10 de out. de 2018.

ANP. 2018. **Biodiesel**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel>. Acessado em: 05 de out. de 2018.

Brasil. 1997. **Lei Nº 9.478, de 6 de agosto de 1997**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9478.htm. Acessado em: 10 de out. de 2018.

Brasil. 2010a. **Lei Nº 12.351, de 22 de dezembro de 2010**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112351.htm. Acessado em: 08 de out. de 2018.

Brasil. 2010b. **Lei Nº 12.276, de 30 de junho de 2010**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12276.htm. Acessado em: 08 de out. de 2018.

Brasil. 2010c. **Lei Nº 12.304, de 2 de agosto de 2010**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12304.htm. Acessado em: 11 de out. de 2018

Brasil. 2016. **Lei Nº 13.263, de 23 de março de 2016**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2016/Lei/L13263.htm#art1. Acessado em: 05 de out. de 2018.

- Brasil. 2017. **Lei Nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13576.htm. Acessado em: 05 de out. de 2018.
- Brasil. 2018. **Decreto Nº 9.308, de 15 de março de 2018**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9308.htm. Acessado em: 21 de ago. de 2018.
- EPE. 2018. **Publicações**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/>. Acessado em: 24 de set. de 2018.
- Hira, A. Oliveira, L.G. 2009. No substitute for oil? How Brazil developed its ethanol industry. **Energy Policy**, 37: 2450-2456.
- Khanna, M. Nuñez, H.; Zilberman, D. 2016. Who pays and who gains from fuel policies in Brazil? **Energy Economics**, 54: 133-143.
- MME. 2018. **Publicações e indicadores**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores>. Acessado em: 20 de jan. de 2019.
- Moraes, M.A.F.D.; Zilberman, D. 2014. **Production of Ethanol from Sugarcane in Brazil: From State Intervention to a Free Market**. 221 p. DOI 10.1007/978-3-319-03140-8.
- Oliveira, F.C., Coelho, S.T. 2017. History, evolution, and environmental impact of biodiesel in Brazil: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 75: 168-179.
- Petrobras. 2016. **Adotamos nova política de preços de diesel e gasolina**. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/adotamos-nova-politica-de-precos-de-diesel-e-gasolina.htm>. Acessado em: 29 de set. de 2018.
- Petrobras. 2017. **Revisão da política de preços de diesel e gasolina**. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/revisao-da-politica-de-precos-de-diesel-e-gasolina.htm>. Acessado em: 29 de set. de 2018.
- Petrobras. 2018. **Fatos e Dados**. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/>. Acessado em: 15 de out. de 2018.
- Pousa, G.P.A.G.; Santos, A.L.F; Suarez, P.A.Z. 2007. History and policy of biodiesel in Brazil. **Energy Policy**, 35: 5393-5398.
- Rodrigues, L.; Bacchi, M.R.P. 2017. Analyzing light fuel demand elasticities in Brazil using cointegration techniques. **Energy Economics**, 63: 322-331.
- United Nations (UN). 2015. **Paris Agreement**. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Acessado em: 28 de set. de 2018.
- Vieira Filho, J.E.R.; Fishlow, A. 2017. **Agricultura e indústria no Brasil: inovação e competitividade**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 1ed. Brasília, Brasil.

8. Apêndices

Apêndice I: Funcionamento do RenovaBio

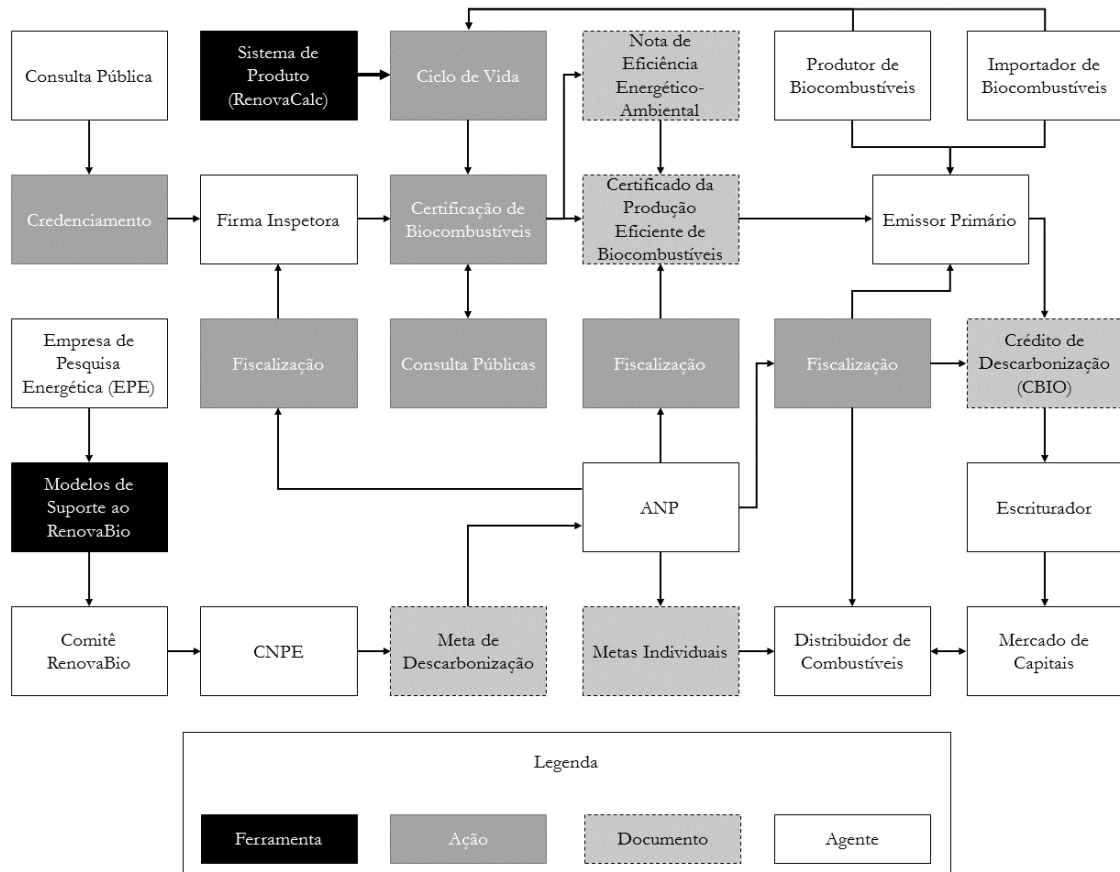


Figura A1. Fluxograma do RenovaBio

Fonte: adaptado de EPE (2018)

Apêndice II: Condições de primeira ordem da equação (25), o modelo de produção e consumo com o RenovaBio

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_1}{\partial g} &= \alpha_{ge} + \beta_{ge}(g + \varphi_g h + \varphi_g a) + t^o \gamma_g - \alpha_o \gamma_g - \beta_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) \gamma_g - z_g \\ &\quad - t^g - p^{cbio} + \frac{(1-\theta)\lambda_g}{\theta} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_1}{\partial k} &= \alpha_{kb} + \beta_{kb}(k + b\varphi_k + op\varphi_{op}) + t^o \gamma_k - \alpha_o \gamma_k - \beta_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) \gamma_k - z_k \\ &\quad - t^k - p^{cbio} + \frac{(1-\phi)\lambda_k}{\phi} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_1}{\partial op} &= \alpha_{kb}\varphi_{op} + \beta_{kb}\varphi_{op}(k + \varphi_k b + \varphi_{op} op) + \alpha_{op} + \beta_{op} op + t^o \gamma_{op} \\ &\quad - \alpha_o \gamma_{op} - \beta_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) \gamma_{op} - z_{op} - t^{op} - p^{cbio} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_1}{\partial h} &= \alpha_{ge}\varphi_g + \beta_{ge}\varphi_g(g + \varphi_g h + \varphi_g a) - \alpha_{sc}\tau_h - \beta_{sc}(\tau_a a + \tau_h h + \tau_s(s^n + s^x))\tau_h - z_h \\ &\quad - t^h + p^{cbio} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_1}{\partial a} &= \alpha_{ge}\varphi_g + \beta_{ge}\varphi_g(g + \varphi_g h + \varphi_g a) - \alpha_{sc}\tau_a - \beta_{sc}(\tau_a a + \tau_h h + \tau_s(s^n + s^x))\tau_a - z_a \\ &\quad - t^a + p^{cbio} - \lambda_g = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_1}{\partial b} &= \alpha_{kb}\varphi_k + \beta_{kb}\varphi_k(k + b\varphi_k + op\varphi_{op}) - \alpha_{sb}\tau_{sb} - \beta_{sb}(\tau_{sb} b + sb^n + sb^x)\tau_{sb} - z_b - t^b \\ &\quad + p^{cbio} - \lambda_k = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\partial L_1}{\partial s^n} = \alpha_{s^n} + \beta_{s^n} s^n - \alpha_{sc}\tau_s - \beta_{sc}\tau_s(\tau_a a + \tau_h h + \tau_s(s^n + s^x)) - z_s = 0 \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\partial L_1}{\partial s^x} = \alpha_{s^x} + \beta_{s^x} s^x - \alpha_{sc}\tau_s - \beta_{sc}\tau_s(\tau_a a + \tau_h h + \tau_s(s^n + s^x)) - z_s = 0 \quad (\text{A.8})$$

$$\frac{\partial L_1}{\partial sb^n} = \alpha_{sb^n} + \beta_{sb^n} sb^n - \alpha_{sb} - \beta_{sb}(\tau_{sb} b + sb^n + sb^x) - z_{sb} = 0 \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{\partial L_1}{\partial sb^x} = \alpha_{sb^x} + \beta_{sb^x} sb^x - \alpha_{sb} - \beta_{sb}(\tau_{sb} b + sb^n + sb^x) - z_{sb} = 0 \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{\partial L_1}{\partial o^x} = p_o^w - \alpha_o - \beta_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) = 0 \quad (\text{A.11})$$

Apêndice III: Condições de primeira ordem da equação (27), o modelo *First-Best*

$$\frac{\partial L_2}{\partial g} = \alpha_{ge} + \beta_{ge}(g + \varphi_g h + \varphi_g a) - \alpha_o \gamma_g - \beta_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) \gamma_g - z_g - \varepsilon^m \sigma_o \gamma_g \quad (\text{A.12})$$

$$= 0$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial k} = \alpha_{kb} + \beta_{kb}(k + b \varphi_k + op \varphi_{op}) - \alpha_o \gamma_k - \beta_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) \gamma_k - z_k \quad (\text{A.13})$$

$$- \varepsilon^m \sigma_o \gamma_k = 0$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial op} = \alpha_{kb} \varphi_{op} + \beta_{kb} \varphi_{op}(k + \varphi_k b + \varphi_{op} op) - \alpha_o \gamma_{op} - \beta_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) \gamma_{op} \quad (\text{A.14})$$

$$- z_{op} - \varepsilon^m \sigma_o \gamma_{op} = 0$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial h} = \alpha_{ge} \varphi_g + \beta_{ge} \varphi_g(g + \varphi_g h + \varphi_g a) - \alpha_{sc} \tau_h - \beta_{sc}(\tau_h h + \tau_s(s^n + s^x)) \tau_h - z_h - \varepsilon^m \sigma_h \quad (\text{A.15})$$

$$= 0$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial s^n} = \alpha_{s^n} + \beta_{s^n} s^n - \alpha_{sc} \tau_s - \beta_{sc} \tau_s(\tau_a a + \tau_h h + \tau_s(s^n + s^x)) - z_s - \varepsilon^m \sigma_s = 0 \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial s^x} = \alpha_{s^x} + \beta_{s^x} s^x - \alpha_{sc} \tau_s - \beta_{sc} \tau_s(\tau_a a + \tau_h h + \tau_s(s^n + s^x)) - z_s - \varepsilon^m \sigma_s = 0 \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial sb^n} = \alpha_{sb^n} + \beta_{sb^n} sb^n - \alpha_{sb} - \beta_{sb}(\tau_{sb} b + sb^n + sb^x) - z_{sb} - \varepsilon^m \sigma_{sb} = 0 \quad (\text{A.18})$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial sb^x} = \alpha_{sb^x} + \beta_{sb^x} sb^x - \alpha_{sb} - \beta_{sb}(\tau_{sb} b + sb^n + sb^x) - z_{sb} - \varepsilon^m \sigma_{sb} = 0 \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial o^x} = \bar{p}_o^w - \alpha_o - \beta_o(\gamma_g g + \gamma_k k + \gamma_{op} op + o^x) - \varepsilon^m \sigma_o = 0 \quad (\text{A.20})$$