

Política Ambiental Ótima e Ciclo Econômico: A Importância do Setor Energético em um Modelo E-DSGE

Yuri Cesar de Lima e Silva*
Departamento de Economia - UFRR
PIMES/UFPE

Marcelo Eduardo Alves da Silva
Departamento de Economia - UFPE
PIMES/UFPE

Resumo

Este artigo analisa a relação entre o ciclo econômico e a adoção de uma política ambiental ótima ampla, que considera além de impostos sobre emissões, uma estrutura de impostos e subsídios no setor energético. Utilizamos um modelo ambiental de equilíbrio geral dinâmico e estocástico (E-DSGE) calibrado com os dados da economia brasileira para encontrar as trajetórias ótimas das alíquotas da política ambiental ampla. Além disso, analisamos o comportamento dinâmico das variáveis do modelo em resposta a choques de produtividade e implementamos uma análise de bem-estar para diferentes alternativas de políticas. Os resultados mostram que a adoção de uma política ambiental ampla é vantajosa para o Brasil, uma vez que, no equilíbrio, o modelo obtém alíquotas ótimas positivas, além de possuírem um caráter dinâmico pro-cíclico, em praticamente todos os casos. A avaliação de bem-estar mostrou que a política ambiental ampla gerou níveis de bem-estar social superiores a todas as alternativas concorrentes.

Palavras-Chaves: Ciclo Econômico. Política Ambiental Ótima. E-DSGE.

Classificação JEL: Q43, Q58, E32.

Abstract

This paper analyzes the relationship between the economic cycle and the adoption of a broad optimum environmental policy, which considers in addition to taxes on emissions, a structure of taxes and subsidies in the energy sector. We used an environmental dynamic and stochastic general equilibrium model (E-DSGE) calibrated with data from the Brazilian economy to find the optimum trajectories of aliquots of the broad environmental policy. In addition, we analyzed the dynamic behavior of the model variables in response to productivity shocks and implemented a welfare analysis for different policy alternatives. The results show that the adoption of a broad environmental policy is advantageous for Brazil, once that in equilibrium, the model obtains optimal positive aliquots, besides having a pro-cyclical dynamic character, in almost all cases. The welfare assessment showed that the broad environmental policy has generated higher levels of social welfare than all competing alternatives.

Keywords: Economic Cycle. Optimum Environmental Policy. E-DSGE.

JEL Code: Q43, Q58, E32

Área 4 - MACROECONOMIA E CRESCIMENTO ECONÔMICO

*O autor gostaria de agradecer ao Instituto Escolhas pelo apoio e contribuição útil neste estudo.

1 Introdução

O aumento na velocidade do aquecimento global e a acelerada degradação do meio ambiente provocados por emissões antrópicas de gases do efeito estufa (GEE) trouxeram para o centro do debate internacional a necessidade da criação de políticas capazes de combater esse fenômeno. Uma possível explicação para este evento provém do fato dos agentes econômicos não internalizarem os efeitos das emissões dos GEE, passando a tomar decisões coletivamente ineficientes. Nesses casos, pode ser justificada a intervenção do governo para combater essa falha de mercado.

A introdução de uma política ambiental de cunho fiscal como, por exemplo, a utilização de um imposto sobre emissões, para combater a ineficiência de mercado gerada por estas, já foi amplamente discutida na literatura e é bem aceito que esse tipo de intervenção pode gerar benefícios para o bem-estar dos agentes. Atualmente, para cumprir as metas de redução das emissões acordadas nas Conferências Climáticas Internacionais, como o Acordo de Paris (COP-21)¹, grande parte dos países signatários convergiram no comprometimento da estratégia de migração para uma matriz energética mais “limpa”, buscando encontrar políticas que induzam a substituição de fontes energéticas que utilizam a queima de combustíveis fósseis por fontes renováveis alternativas².

O estudo dos problemas ambientais não é recente na ciência econômica, modelos microeconômicos de equilíbrio parcial (e.g. [Newell & Pizer \(2008\)](#); [Babiker et al. \(2005\)](#)), modelos do tipo insumo-produto de equilíbrio geral computável (e.g. [Viguier et al. \(2003\)](#); [Babiker et al. \(2003\)](#)) e modelos macroeconômicos de crescimento (e.g. [Brock & Taylor \(2005\)](#)) já foram utilizados com essa finalidade. Entretanto, apenas mais recentemente, questões sobre as relações entre as políticas ambientais e os ciclos econômicos passaram a ser investigadas por modelos macroeconômicos de curto prazo. Com isso, os modelos ambientais de equilíbrio geral dinâmicos e estocásticos (E-DSGE³) passaram a ajudar na geração de informações úteis sobre os efeitos de curto prazo na economia da adoção de políticas ambientais (e.g. [Fischer & Springborn \(2011\)](#); [Heutel \(2012\)](#); [Angelopoulos et al. \(2013\)](#); [Annicchiarico & Dio \(2015\)](#); [Leal et al. \(2015\)](#); [Niua et al. \(2018\)](#))⁴.

Contudo, até o presente momento, os modelos E-DSGE não trataram explicitamente o setor energético. Portanto, desconsideraram que uma política de mitigação de emissões pode conter algum tipo de instrumento que induza a substituição de fontes energéticas ligadas à combustíveis fósseis por fontes não poluentes. Como relatado anteriormente, este fato já vem sendo amplamente discutido nas Conferências Climáticas Internacionais e este artigo pretende contribuir no preenchimento dessa lacuna ao analisar, em um modelo E-DSGE com um setor energético explicitamente modelado, a relação entre o ciclo econômico e a adoção de uma política ambiental ampla, que considera não só os impostos sobre emissões, mas também a utilização de impostos e subsídios no setor energético.

Tipicamente, nos modelos E-DSGE, as emissões são tratadas apenas como um subproduto da produção de bens. De fato, os dados evidenciam uma correlação positiva entre a produção de bens e as emissões de GEE. No entanto, essa correlação pode ser, na maior parte, explicada pela dependência de combustíveis fósseis nas matrizes energéticas dos países. Dados para o Brasil, por exemplo, revelam que as emissões provenientes da atividade produtiva são tão correlacionadas com a produção quanto com o uso de energia não renovável, como pode ser visualizado na Figura (1). Tais fatos oferecem suporte à introdução de um setor energético em um modelo E-DSGE, permitindo um melhor entendimento da relação entre uma política ambiental mais ampla e o ciclo econômico.

Portanto, este trabalho contribui com essa discussão ao analisar a relação entre o ciclo econômico

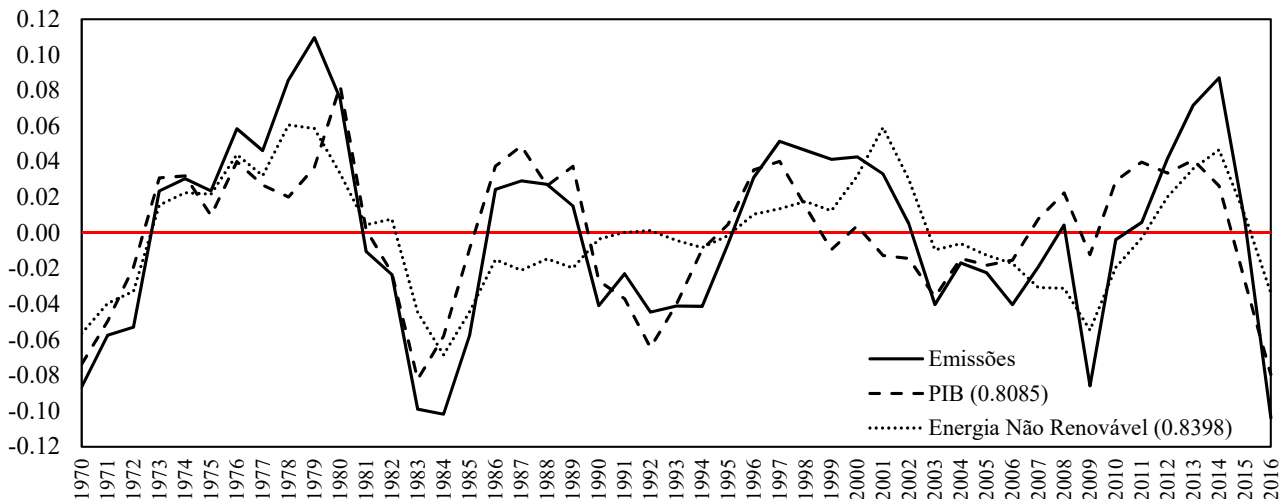
¹A 21ª Conferência das Partes (COP-21) é o mais recente passo no esforço global para combater as alterações climáticas. As metas vinculadas ao acordo de Paris buscam manter um aumento da temperatura global neste século abaixo de 2 graus Celsius com relação aos níveis pré-industriais e gerar esforços para limitar esse aumento em 1,5 graus Celsius. Até o presente momento 167 países submeteram metas nacionais de redução de GEE na atmosfera.

²Ver as Contribuições Internacionais Nacionalmente Determinadas - INDC no site: <http://unfccc.int/focus/indc_portal/items/8766.php>.

³Sigla para Environmental Dynamic Stochastic General Equilibrium.

⁴Para um bom resumo desses dos primeiros trabalhos na área ver [Fischer & Heutel \(2013\)](#).

Figura 1: Componente cíclico das séries das emissões, do PIB e da energia não renovável na matriz energética do Brasil entre 1970 e 2016.



Fonte: As emissões são do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa – SEEG. O PIB é do Sistema de Séries Temporais do Banco Central do Brasil e a energia não renovável do Balanço Energético Nacional do Ministério de Minas e Energia do Brasil.

Nota: 1) Foi aplicado o filtro de Hodrick-Prescott (HP) nas séries para separar os componentes de tendência dos componentes cíclicos. 2) Os valores entre parênteses na legenda correspondem à correlação entre a variável e as emissões (após a utilização do filtro HP).

e a adoção de uma política ambiental ótima ampla (no sentido de Ramsey), que considera além de impostos sobre emissões, uma estrutura de impostos e subsídios no setor energético. Até onde vai nosso conhecimento, algo inédito na literatura. Para isso será utilizado um modelo E-DSGE que irá diferir de um modelo RBC (*Real Business Cycle*) clássico pelas introduções de: i) um setor energético produtor de energia renovável e não renovável, possibilitando aos agentes a escolha (e possível substituição) da fonte de energia que irão utilizar; ii) uma estrutura ambiental em que os agentes privados consideram a qualidade do meio ambiente um bem público (que aumenta sua utilidade), mas que eles degradam no processo produtivo (através das emissões) e não internalizam os seus efeitos; e iii) uma política ambiental ampla de cunho fiscal em que o governo cobra impostos sobre emissões e sobre o preço da energia não renovável enquanto concede subsídios no preço da energia renovável.

O modelo é calibrado com dados da economia brasileira e é utilizado para calcular as trajetórias ótimas das alíquotas da política ambiental ampla, que maximiza o bem-estar social (no sentido de Ramsey). Além disso, analisamos o comportamento dinâmico das variáveis do modelo em resposta a choques de produtividades, dando ênfase aos resultados do setor energético, que se constitui como a novidade em relação aos modelos disponíveis até o momento. Por fim, implementamos uma análise de bem-estar de diferentes alternativas de políticas (Schmitt-Grohé & Uribe, 2007).

Os resultados mostram que a adoção de uma política ambiental ampla é vantajosa para o Brasil, uma vez que, no equilíbrio, o modelo obtém alíquotas ótimas positivas para o subsídio sobre a energia renovável e para os impostos sobre energia não renovável e sobre emissões e, quando comparada a outras alternativas de políticas ambientais mais restritas ou mesmo a não adoção de nenhuma política ambiental, apresentou maiores níveis de produção e consumo, menores níveis de emissões e estoque de poluição e maiores níveis de bens estar social. As simulações mostram ainda que, na presença de choques de produtividade, as alíquotas apresentam trajetórias pró-cíclicas, com exceção da alíquota do imposto sobre emissões que é contracíclica na presença de um choque de produtividade do setor de energia renovável. No caso do setor energético, os resultados mostram que, com a política ambiental, os choques de produtividade reduzem a utilização de energia não renovável no curto prazo, diminuindo as emissões de GEE para um dado nível de produção, menos para o caso de choques no setor de

energia não renovável, que acontece o oposto. Por fim, a avaliação de bem-estar mostrou que a política ambiental ampla gerou níveis de bem-estar social superiores a todos as políticas concorrentes (mais restritas), entre eles a alternativa sem nenhum tipo de política ambiental. Portanto, os resultados evidenciam a importância de uma política ambiental ampla que considere além de impostos sobre emissões, uma estrutura tributária ativa no setor energético.

Este artigo está relacionado à literatura que trata a questão ambiental no contexto de modelos DSGE. Os primeiros modelos E-DSGE se propuseram a discutir quais os melhores instrumentos de política ambiental. O trabalho de [Angelopoulos et al. \(2010\)](#) mostrou que, quando a fonte da incerteza é econômica, a utilização de impostos sobre emissões nunca são menos eficientes que as demais alternativas testadas (considerando o nível de bem-estar). Já no trabalho desenvolvido por [Fischer & Springborn \(2011\)](#) as metas de intensidade se mostraram mais eficientes. Mais recentemente, [Annicchiarico & Dio \(2015\)](#) usaram um modelo novo keynesiano com rigidez nominal de preços para analisar os efeitos da adoção de políticas ambientais alternativas sob incerteza real e nominal. Seus resultados mostraram que o bem-estar é superior com uma política tributária, desde que o grau de rigidez de preços não seja muito alto. Caso contrário, o bem-estar tende a ser maior sob uma política de permissões.

Uma outra parcela da literatura se dedicou a compreender a relação entre os impostos ótimos e os ciclos econômicos. Estes trabalhos buscaram entender se um imposto ótimo sobre emissões teria um caráter pró-cíclico ou contracíclico. A grande maioria deles concluiu que o imposto ótimo seria pró-cíclico, são exemplos desses estudos [Heutel \(2012\)](#), [Angelopoulos et al. \(2013\)](#) e [Leal et al. \(2015\)](#). Uma exceção é o trabalho de [Lintunen & Vilmi \(2013\)](#) que encontra algumas possibilidades do imposto ótimo ter um comportamento contracíclico.

Por outro lado, existem trabalhos que se dedicaram a estudar aspectos relacionados ao setor energético nos modelos DSGE ([Tumen et al. \(2016\)](#); [Blazquez et al. \(2017\)](#); [Atallaa et al. \(2017\)](#); [Argentiero et al. \(2018\)](#)). Entretanto, a ligação entre a literatura do setor energético e a literatura ambiental, discutida anteriormente, ainda é pouco explorada. O primeiro trabalho a trilhar esse caminho foi o de [Dissou & Karnizova \(2016\)](#). Porém, a justificativa dos autores para a introdução da política ambiental está vinculada a fatores exógenos e não a dinâmica interna do modelo. Neste artigo, buscamos solucionar esta dificuldade seguindo mais de perto a estrutura ambiental presente na literatura clássica ([Angelopoulos et al. \(2010\)](#); [Heutel \(2012\)](#); [Angelopoulos et al. \(2013\)](#)).

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma: na segunda seção, apresentamos a metodologia utilizada, onde descrevemos o modelo, apresentando seu equilíbrio competitivo e o desenho da política fiscal ótima (equilíbrio de Ramsey), além de discutir as estratégias de calibração dos parâmetros. Na seção seguinte, apresentamos os resultados e realizamos as discussões sobre eles. Na última seção, delineamos as conclusões do trabalho.

2 Metodologia

2.1 Modelo

A economia é composta por famílias, firmas de bens finais, firmas do setor de energia e governo. As famílias consistem de um contínuo de agentes idênticos, que vivem infinitamente. A função de utilidade é composta de consumo de bens finais não energéticos, consumo de energia (renovável e não renovável), estoque de qualidade ambiental e lazer. Famílias consomem (bens finais não energéticos e energia), poupam (estando sujeitos a um custo de ajustamento no investimento), e ofertam trabalho. Famílias são proprietárias das firmas.

Para produzir o bem final não energético, as firmas utilizam capital, trabalho e energia (renovável e não renovável) como insumos de produção. Por sua vez, para produzirem energia renovável e não renovável, as firmas do setor energético utilizam apenas capital como insumo em uma função de produção linear.

Ao utilizarem energia não renovável as famílias e firmas produtoras de bens finais não energéticos emitem gases poluentes que prejudicam a qualidade do meio ambiente e causam danos à produção de bens. Dessa forma, o efeito negativo da poluição é introduzido no modelo de duas formas: a) diretamente na função utilidade através da variável de qualidade do meio ambiente; e b) na função de produção através da função de dano da produção proveniente da poluição.

Os agentes privados julgam o meio ambiente um bem público, não internalizando os efeitos de suas ações sobre ele. Com o objetivo de melhorar o resultado econômico, o governo impõe uma política ambiental ampla, cobrando impostos sobre emissões e utilização de energia não renovável e concedendo subsídios à utilização de energia renovável.

Os agentes buscam otimizar suas escolhas em resposta à política do governo. Dessa forma, para reduzir o pagamento de impostos, as firmas investem na geração de tecnologias de abatimento, capazes de reduzir a relação emissão/produto para um dado nível de utilização de energia não renovável (fonte primária da poluição). Além disso, famílias e firmas podem substituir parte de sua fonte energética “suja” por energia renovável não poluente. Na Figura 2 pode-se visualizar a estrutura do modelo.

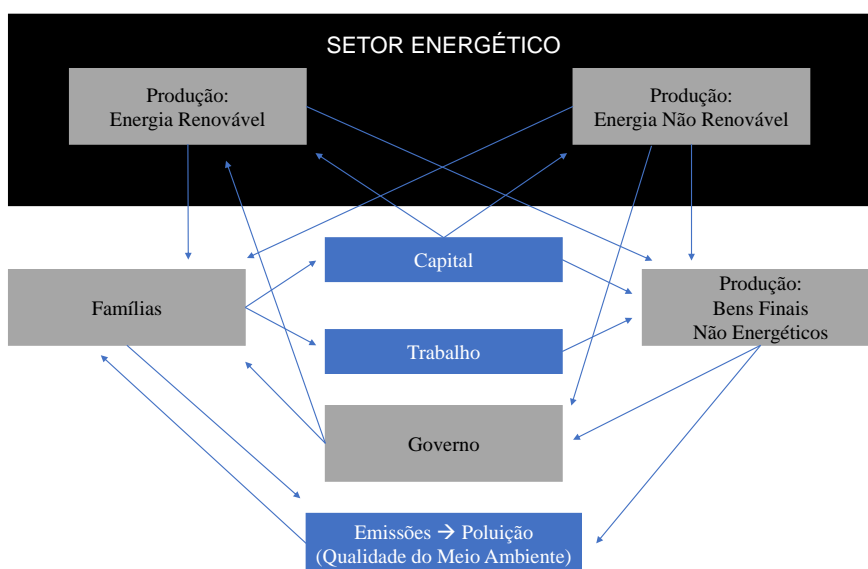


Figura 2: Estrutura do modelo.

Nesta seção, serão apresentados o equilíbrio competitivo do modelo e a proposta de política tributária ótima (problema de Ramsey), onde o planejador social benevolente tem como objetivo maximizar o bem-estar das famílias sujeito a aumentar as receitas recebidas por meio da tributação, considerando as reações de equilíbrio competitivo dos consumidores e das firmas. Graças às externalidades impostas pela poluição, não se espera que o primeiro teorema do bem-estar seja satisfeito, sendo a política fiscal ótima um *second-best*.

2.1.1 Famílias

Existe um contínuo de famílias indexadas por $j \in (0, 1)$, que maximizam a utilidade intertemporal sujeitas a uma restrição orçamentária. A preferência da família j é dada por:

$$U = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left[\frac{(Z_t)^{1-\varphi}}{1-\varphi} + q \frac{(Q_{t-1})^{1-\eta}}{1-\eta} - l \frac{(L_t)^{1+\omega}}{1+\omega} \right] \quad (1)$$

onde, $0 < \beta < 1$ é o fator de desconto subjetivo das famílias, Z_t é o consumo agregado, Q_{t-1} é a qualidade do meio ambiente no final do período $t - 1$, $0 < q < 1$ e $0 < l < 1$ são os pesos dado, respectivamente, à qualidade do meio ambiente e ao trabalho, relativos aos outros fatores que compõe

a utilidade das famílias e L_t denota as horas destinadas ao trabalho. Enquanto que $\varphi > 0, \eta > 0$ e $\omega > 0$ são os inversos das elasticidades de substituição intertemporal do consumo, da qualidade do meio ambiente e das horas trabalhadas, respectivamente.

O consumo agregado Z_t é um agregador CES do consumo de energia E_t^C e do consumo de bens finais não energéticos C_t , da seguinte forma:

$$Z_t = \left[(1 - s_C)(E_t^C)^{\frac{\theta_z - 1}{\theta_z}} + s_C(C_t)^{\frac{\theta_z - 1}{\theta_z}} \right]^{\frac{\theta_z}{\theta_z - 1}}$$

onde θ_z é a elasticidade de substituição intertemporal entre o consumo de energia e o consumo de bens finais não energéticos e $0 \leq s_C \leq 1$ indica a parcela de gastos com bens finais não energéticos na cesta de bens de consumo das famílias. Por sua vez, E_t^C é um agregador CES do consumo de energia renovável E_t^{RC} e o consumo de energia não renovável E_t^{NRC} :

$$E_t^C = \left[(1 - s_R)(E_t^{NRC})^{\frac{\theta_e - 1}{\theta_e}} + s_R(E_t^{RC})^{\frac{\theta_e - 1}{\theta_e}} \right]^{\frac{\theta_e}{\theta_e - 1}}$$

onde θ_e é a elasticidade de substituição intertemporal entre o consumo de energia renovável e o consumo de energia não renovável e $0 \leq s_R \leq 1$ indica a parcela de gastos com energia renovável na cesta de bens de consumo energético das famílias.

A família representativa escolhe os níveis de consumo de bens finais, energia renovável, energia não renovável, oferta de trabalho, títulos públicos e investimento em capital para maximizar (1) sujeito à seguinte restrição orçamentária:

$$\begin{aligned} C_t + (1 - \vartheta_t^{ER})P_t^{ER}E_t^{RC} + (1 + \tau_t^{ENR})P_t^{ENR}E_t^{NRC} + I_t^Y + I_t^R + I_t^{NR} + (1 + r_{t-1}^B)B_{t-1} \\ = B_t + w_t L_t + r_t^Y K_{t-1}^Y + r_t^R K_{t-1}^R + r_t^{NR} K_{t-1}^{NR} + T_t + \Pi_t \end{aligned} \quad (2)$$

em que, P_t^{ER} e P_t^{ENR} são, respectivamente, os preços da energia renovável e da energia não renovável, em termos do bem final, que é o numerário. Enquanto que ϑ_t^{ER} e τ_t^{ENR} são as alíquotas de subsídio sobre P_t^{ER} e imposto sobre P_t^{ENR} , respectivamente. Já, I_t^Y, I_t^R e I_t^{NR} , são os montantes de investimento em capital do setor de bens finais não-energéticos, de energia renovável e de energia não renovável, respectivamente. Por sua vez, B_t são títulos de um período emitidos pelo governo e r_{t-1}^B é a taxa de juros que remunera esses títulos, w_t é a renda proveniente do trabalho (salário), K_{t-1}^Y, K_{t-1}^R e K_{t-1}^{NR} , são os estoques de capital no fim do período $t - 1$ e r_t^Y, r_t^R e r_t^{NR} , são as rendas do capital para cada um dos 3 setores citados anteriormente. Por fim, T_t e Π_t são, respectivamente, as transferências *lump-sum* feitas pelo governo para as famílias e os lucros distribuídos pelas diversas firmas da economia aos seus proprietários.

O capital evolui de acordo com:

$$I_t^i = K_t^i - (1 - \delta)K_{t-1}^i + \frac{\Phi}{2}(K_t^i - K_{t-1}^i)^2 \quad (3)$$

para $i = Y, R, NR$. Onde, o último termo refere-se a um custo de ajustamento do capital, $0 \leq \delta \leq 1$ é a taxa de depreciação do capital e $\Phi > 0$ é um parâmetro de captura do custo de ajustamento do investimento.

Portanto, o problema das famílias consiste em maximizar a utilidade intertemporal descontada (1) sujeito à restrição orçamentária (2), a lei de evolução do capital (3) e a condição de solvência (*No-Ponzi-Game Condition*) abaixo:

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \frac{B_{t+j+1}}{\prod_{s=0}^j (1 + r_s^B)} \quad (4)$$

As condições de equilíbrio para a escolha das sequências $\{C_t, E_t^{RC}, E_t^{NRC}, L_t, B_t, K_t^Y, K_t^R, K_t^{NR}\}_{t=0}^{\infty}$ resultantes do problema de maximização, são:

$$\lambda_t = (Z_t)^{-\varphi} (s_C) \left(\frac{Z_t}{C_t} \right)^{\frac{1}{\theta_z}} \quad (5)$$

$$\lambda_t (1 + \tau_t^{ENR}) P_t^{ENR} = (Z_t)^{-\varphi} (1 - s_C) \left(\frac{Z_t}{E_t^C} \right)^{\frac{1}{\theta_z}} (1 - s_R) \left(\frac{E_t^C}{E_t^{NRC}} \right)^{\frac{1}{\theta_e}} \quad (6)$$

$$\lambda_t (1 - \vartheta_t^{ER}) P_t^{ER} = (Z_t)^{-\varphi} (1 - s_C) \left(\frac{Z_t}{E_t^C} \right)^{\frac{1}{\theta_z}} (s_R) \left(\frac{E_t^C}{E_t^{NRC}} \right)^{\frac{1}{\theta_e}} \quad (7)$$

$$(L_t)^\omega = w_t \lambda_t \quad (8)$$

$$1 = \beta E_t \left[\left(\frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \right) (1 + r_t^B) \right] \quad (9)$$

$$1 + \Phi(K_t^i - K_{t-1}^i) = \beta E_t \left\{ \left(\frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \right) [r_{t+1}^i + (1 - \delta) + \Phi(K_{t+1}^i - K_t^i)] \right\} \quad (10)$$

para $i = Y, R, NR$. Onde λ_t é o multiplicador de Lagrange associado a restrição orçamentária (2).

2.1.2 Estrutura Ambiental

A estrutura ambiental do modelo obedece a seguinte lógica: a utilização de energia não renovável, tanto pelas firmas como pelas famílias, é a fonte primária de emissões domésticas de poluentes. Esta, por sua vez, é gerada tanto pelas emissões domésticas quanto pelas emissões provenientes de outros países.

No modelo, a poluição gera danos à produção dos bens finais (Nordhaus, 2007; Heutel, 2012; Leal et al., 2015) e também reduz a qualidade do meio ambiente local, afetando diretamente a saúde dos agentes. Esse efeito é refletido pela redução da utilidade das famílias (Angelopoulos et al., 2013).

As emissões domésticas totais (e_t) são dadas pela soma das emissões geradas na produção de bens finais não energéticos e no consumo, como segue:

$$e_t = e_t^Y + e_t^C$$

onde e_t^Y são as emissões geradas pelas firmas de bens finais e e_t^C são as emissões geradas pelo consumo de energia não renovável pelas famílias.⁵

O modelo captura a ideia de que emissões são um subproduto da produção de bens, no entanto, diferentemente de Heutel (2012), que não possui um setor energético, as emissões geradas pela produção de bens depende da intensidade do uso de energia não renovável. Portanto, para um mesmo nível de produção, as emissões serão tanto maiores quanto maior for, proporcionalmente, o uso de energia não renovável, como segue:

$$e_t^Y = (1 - \mu) \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{1-\gamma^Y} \quad (11)$$

onde μ_t é a fração que as firmas decidem reduzir das emissões, dado a política ambiental e o custo de abatimento, E_t^{RY} e E_t^{NRY} são, respectivamente, a utilização de energia renovável e não renovável na produção de bens finais não energéticos (Y_t) e $(1 - \gamma^Y)$ é a elasticidade das emissões provenientes da produção de bens finais em relação ao produto.

⁵Note que a energia renovável também pode ser utilizada como insumo de produção nas firmas que produzem bens finais não energéticos e utilizada para consumo pelas famílias, mas, neste caso, não gera emissões.

As emissões geradas pelo consumo de energia não renovável pelas famílias (e_t^C) são dadas por:

$$e_t^C = (E_t^{NRC})^{1-\gamma^C} \quad (12)$$

onde $(1 - \gamma^C)$ é a elasticidade das emissões provenientes do consumo em relação à energia não renovável consumida pelas famílias.

Por sua vez, a evolução do estoque de poluição (X_t) no final do período t é ditada pela seguinte equação:

$$X_t = \phi_x X_{t-1} + e_t + e_t^{row} \quad (13)$$

onde, $\phi_x \in (0, 1)$ mensura o grau de persistência da poluição e e_t^{row} denota as emissões do resto do mundo, que são assumidas constantes e iguais ao seu valor de estado estacionário.⁶ Por fim, como indicado na equação 1, a utilidade dos agentes é afetada pela qualidade do meio ambiente disponível no início de cada período. À despeito da sua importância, nós assumimos uma forma reduzida para descrever sua evolução ao longo do tempo, conforme a seguir:

$$Q_t = (1 - \phi_q)\bar{Q} + \phi_q Q_{t-1} - \gamma_x (\ln X_t - \ln X_{t-1}) \quad (14)$$

onde, \bar{Q} corresponde à qualidade do meio ambiente no estado estacionário, o parâmetro $\phi_q \in (0, 1)$ mede o grau de persistência da qualidade do meio-ambiente, $(\ln X_t - \ln X_{t-1})$ corresponde à taxa de crescimento do estoque de poluição, e $\gamma_x > 0$ denota a elasticidade da qualidade do meio ambiente com respeito ao crescimento do estoque de poluição.⁷

2.1.3 Produção de Bens Finais Não Energéticos

Com o objetivo de maximizar seus lucros, em cada período, as firmas tomam os salários (w_t), a taxa de remuneração do capital (r_t^Y) e os preços da energia renovável (P_t^{ER}) e não renovável (P_t^{ENR}) como dados, alugam capital (K_{t-1}^Y) e trabalho (L_t) das famílias, além de escolherem a fração de redução das emissões (μ_t) e comprarem energia renovável (E_t^{RY}) e não renovável (E_t^{NRY}) do setor energético. A função lucro da firma representativa é:

$$\Pi_t^Y = Y_t - w_t L_t - r_t^Y K_{t-1}^Y - (1 - \vartheta_t^{ER}) P_t^{ER} E_t^{RY} - (1 - \tau_t^{ENR}) P_t^{ENR} E_t^{NRY} - \tau_t^e e_t^Y - AC_t^Y \quad (15)$$

onde, τ_t^e é a alíquota de imposto cobrada sobre as emissões.

Nesta configuração, as receitas são provenientes exclusivamente da produção e os custos são derivados do pagamento de imposto sobre as emissões, do aluguel do capital, do pagamento dos salários, da compra de energia e das despesas com tecnologia de abatimento, a qual será descrita mais à frente.

Os bens finais não energéticos são produzidos de acordo com a tecnologia:

$$Y_t = [1 - (d_2 X_t^2 + d_1 X_t + d_0)] A_t^Y (L_t)^{\alpha_L} (E_t^{RY})^{\alpha_R} (E_t^{NRY})^{\alpha_{NR}} (K_{t-1}^Y)^{\alpha_K} \quad (16)$$

onde, $d(X) = [1 - (d_2 X_t^2 + d_1 X_t + d_0)]$ representa a função quadrática de dano à produção proveniente da poluição, A_t^Y representa a produtividade total dos fatores no setor de bens finais não energéticos, α_K denota o peso do capital na função de produção, α_L , α_R e α_{NR} são os respectivos pesos do trabalho, da energia renovável e da energia não renovável na produção de bens finais não energéticos. A função exibe retornos constantes a escala e, portanto, $\alpha_K + \alpha_L + \alpha_R + \alpha_{NR} = 1$.

No modelo, à medida que a renda aumenta e as firmas decidem aumentar o percentual de redução das emissões (μ_t), mais recursos são gastos com tecnologia de abatimento (Nordhaus, 2008; Heutel,

⁶Numa versão futura do artigo, pretendemos modelar as emissões do resto do mundo como um processo estocástico exógeno ao país doméstico.

⁷Por simplicidade, assumimos que $\gamma_x = 1$.

2012). Portanto, a função que representa o custo com tecnologia de abatimento é definida como:

$$AC_t^Y = Y_t \theta_1 \mu_t^{\theta_2} \quad (17)$$

onde, θ_1 mede o menu de alternativas tecnológicas existentes e θ_2 mostra o grau de não linearidade nos custos para cortes de emissões mais profundos.

As firmas escolhem as sequências $\{L_t, K_t^Y, E_t^{RY}, E_t^{NRY}, \mu_t\}_{t=0}^{\infty}$ para maximizar seu lucro. As condições de equilíbrio resultantes do problema de maximização do lucro das firmas são:

$$w_t L_t = \alpha_L Y_t - \tau_t^e (1 - \mu_t) (1 - \gamma^Y) \alpha_L \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{1-\gamma^Y} - \alpha_L Y_t \theta_1 \mu_t^{\theta_2} \quad (18)$$

$$r_t^Y K_{t-1}^Y = \alpha_K Y_t - \tau_t^e (1 - \mu_t) (1 - \gamma^Y) \alpha_K \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{1-\gamma^Y} - \alpha_K Y_t \theta_1 \mu_t^{\theta_2} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} (1 - \vartheta_t^{ER}) P_t^{ER} E_t^{RY} &= \alpha_R Y_t + \tau_t^e (1 - \mu_t) Y_t^{1-\gamma^Y} \left[\frac{E_t^{NRY} E_t^{RY}}{(E_t^{NRY} + E_t^{RY})^2} \right] \\ &\quad - \tau_t^e (1 - \mu_t) (1 - \gamma^Y) \alpha_R \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{1-\gamma^Y} - \alpha_R Y_t \theta_1 \mu_t^{\theta_2} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} (1 + \tau_t^{ENR}) P_t^{ENR} E_t^{NRY} &= \alpha_{NR} Y_t + \tau_t^e (1 - \mu_t) Y_t^{1-\gamma^Y} \left[\frac{(E_t^{NRY})^2}{(E_t^{NRY} + E_t^{RY})^2} \right] \\ &\quad - \tau_t^e (1 - \mu_t) [(1 - \gamma^Y) \alpha_{NR} + 1] \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{1-\gamma^Y} - \alpha_{NR} Y_t \theta_1 \mu_t^{\theta_2} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\tau_t^e \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{-\gamma^Y} = \theta_1 \theta_2 \mu_t^{\theta_2 - 1} \quad (22)$$

2.1.4 Produção de Energia Renovável

As firmas do setor de energia renovável alugam capital (K_{t-1}^R) das famílias e, considerando a taxa de remuneração desse capital (r_t^R), maximizam a seguinte função lucro:

$$\Pi_t^R = P_t^{ER} E_t^R - r_t^R K_{t-1}^R \quad (23)$$

A tecnologia de produção utilizada é uma função linear, como segue:

$$E_t^R = A_t^R K_{t-1}^R \quad (24)$$

onde, A_t^R denota a produtividade total dos fatores no setor de energia renovável. Da solução do problema das firmas é possível obter:

$$r_t^R = P_t^{ER} A_t^R \quad (25)$$

Em outras palavras, o capital deve ser empregado até que o produto marginal da última unidade seja igual ao seu preço.

2.1.5 Produção de Energia Não Renovável

As firmas do setor de energia não renovável também alugam capital (K_{t-1}^{NR}) das famílias e consideram a taxa de remuneração do capital (r_t^{NR}) para maximizar sua função lucro:

$$\Pi_t^{NR} = P_t^{ENR} E_t^{NR} - r_t^{NR} K_{t-1}^{NR} \quad (26)$$

A tecnologia de produção utilizada idêntica as firmas do setor de energia renovável, como segue:

$$E_t^{NR} = A_t^R K_{t-1}^{NR} \quad (27)$$

onde, A_t^{NR} representa a produtividade no setor de energia não renovável. Da solução do problema das firmas, é possível obter a condição usual:

$$r_t^{NR} = P_t^{ENR} A_t^{NR} \quad (28)$$

Portanto, o capital é empregado até que o produto marginal da última unidade seja igual ao seu preço.

2.1.6 Governo

O governo utiliza parte de sua receita para subsidiar o preço da energia renovável e o restante transfere de volta para as famílias. No modelo, a receita tributária é proveniente dos impostos sobre emissões e sobre o preço da energia não renovável. Além disso, o governo também pode obter receitas financeiras negociando títulos de um período. Considerando B_t o endividamento do governo com o setor privado no período t , a restrição orçamentária do governo é dada por:

$$T_t + \vartheta_t^{ER} P_t^{ER} (E_t^{RC} + E_t^{RY}) + (1 + r_{t-1}^B) B_{t-1} = B_t + \tau_t^{ENR} P_t^{ENR} (E_t^{NRC} + E_t^{NRY}) + \tau_t^e e_t^Y \quad (29)$$

Consideramos os ganhos de juros sobre os títulos públicos isentos de impostos, o que é inofensivo para o intercâmbio de títulos entre o governo e o setor privado.

2.1.7 Processos Exógenos

O modelo contém choques exógenos de produtividade total dos fatores em cada um dos setores produtivos, que assumem a forma de um processo autorregressivo log-linear, como segue:

$$\ln A_t^i = \rho_{A(i)} \ln A_{t-1}^i + \varepsilon_t^i \quad (30)$$

Onde, ε_t^i é um choque com distribuição idêntica e independente, com variância $\rho_{A(i)}$, com $i = Y, R, NR$.

2.1.8 Condições de Equilíbrio de Mercado e Agregações

A condição de equilíbrio no mercado de bens finais não energético exige que a produção de bens finais satisfaça a seguinte condição:

$$Y_t = C_t + I_t^Y + I_t^R + I_t^{NR} + AC_t \quad (31)$$

As condições de equilíbrio no setor energético requer que, em ambos os setores (energia renovável e não renovável), a quantidade total exigida pelas famílias e pelas firmas seja igual à produção:

$$E_t^R = E_t^{RC} + E_t^{RY} \quad (32)$$

$$E_t^{NR} = E_t^{NRC} + E_t^{NRY} \quad (33)$$

Além disso, assumimos as seguintes agregações na seção de resultados:

$$I_t = I_t^Y + I_t^R + I_t^{NR} \quad (34)$$

$$K_t = K_t^Y + K_t^R + K_t^{NR} \quad (35)$$

$$e_t = e_t^C + e_t^Y \quad (36)$$

2.2 Equilíbrio Competitivo Descentralizado

Dados os processos estocásticos ε_t^{AY} , ε_t^{AR} , ε_t^{ANR} e as condições iniciais de A_0^Y , A_0^R , A_0^{NR} , Q_0 , X_0 , K_0^Y , K_0^R , K_0^{NR} , o equilíbrio competitivo do modelo é formado por uma sequência de preços $\{w_t, r_t^B, r_t^Y, r_t^R, r_t^{NR}, P_t^{ER}, P_t^{ENR}\}_{t=0}^\infty$ e por uma sequência de alocações $\{Y_t, C_t, E_t^R, E_t^{RC}, E_t^{RY}, E_t^{NR}, E_t^{NRC}, E_t^{NRY}, L_t, K_t^Y, K_t^R, K_t^{NR}, I_t^Y, I_t^R, I_t^{NR}, T_t, B_t, Q_t, X_t, e_t, e_t^C, e_t^Y, e_t^{row}, AC_t^Y, \mu_t, A_t^Y, A_t^R, A_t^{NR}\}_{t=0}^\infty$ tal que:

1. Dados os preços, a alocação $\{C_t, E_t^{RC}, E_t^{NRC}, L_t, K_t^Y, K_t^R, K_t^{NR}, I_t^Y, I_t^R, I_t^{NR}, B_t, Q_t, X_t, e_t^C, e_t^Y, e_t^{row}\}_{t=0}^\infty$ resolve o problema das famílias.
2. Dados os preços, a alocação $\{Y_t, E_t^{RY}, E_t^{NRY}, L_t, K_t^Y, e_t^Y, AC_t^Y, \mu_t, A_t^Y\}_{t=0}^\infty$ resolve o problema das firmas produtoras de bens finais não energéticos.
3. Dados os preços, a alocação $\{E_t^R, K_t^R, A_t^R\}_{t=0}^\infty$ resolve o problema das firmas produtoras energia renovável.
4. Dados os preços, a alocação $\{E_t^{NR}, K_t^{NR}, A_t^{NR}\}_{t=0}^\infty$ resolve o problema das firmas produtoras energia não renovável.
5. Para cada período de tempo, os mercados de bens finais não energéticos, de energia renovável, de energia não renovável, de trabalho e de capital estejam em equilíbrio. Como os mercados de trabalho e de capital já se encontram em equilíbrio implicitamente, é necessário apenas o equilíbrio no mercado de bens finais não energético, de energia renovável e de energia não renovável, respectivamente, como segue:

$$C_t + I_t^Y + I_t^R + I_t^{NR} + AC_t = [1 - (d_2 X_t^2 + d_1 X_t + d_0)] A_t^Y (L_t)^{\alpha_L} (E_t^{RY})^{\alpha_R} (E_t^{NRY})^{\alpha_{NR}} (K_{t-1}^Y)^{\alpha_K} \quad (37)$$

$$E_t^{RC} + E_t^{RY} = A_t^R K_{t-1}^R \quad (38)$$

$$E_t^{NRC} + E_t^{NRY} = A_t^{NR} K_{t-1}^{NR} \quad (39)$$

2.3 Política Fiscal Ótima - Equilíbrio de Ramsey

No problema de Ramsey, o planejador social benevolente define a política governamental e a alocação factível que maximiza (1) considerando as escolhas ótimas dos agentes privados (equações 5-10), a equação de evolução da poluição (13) e da qualidade do meio ambiente (14). Assim, dados os processos estocásticos ε_t^{AY} , ε_t^{AR} , ε_t^{ANR} e as condições iniciais de A_0^Y , A_0^R , A_0^{NR} , Q_0 , X_0 , K_0^Y , K_0^R , K_0^{NR} , o problema de Ramsey é escolher o equilíbrio competitivo que maximiza a função utilidade (1). Portanto, o equilíbrio competitivo de Ramsey é formado por uma sequência de alocações $\{Y_t, C_t, E_t^R, E_t^{RC}, E_t^{RY}, E_t^{NR}, E_t^{NRC}, E_t^{NRY}, L_t, K_t^Y, K_t^R, K_t^{NR}, I_t^Y, I_t^R, I_t^{NR}, T_t, B_t, Q_t, X_t, e_t, e_t^C, e_t^Y, e_t^{row}, AC_t^Y, \mu_t, A_t^Y, A_t^R, A_t^{NR}\}_{t=0}^\infty$, uma sequência de preços $\{w_t, r_t^B, r_t^Y, r_t^R, r_t^{NR}, P_t^{ER}, P_t^{ENR}\}_{t=0}^\infty$ e uma política governamental $\{T_t, B_t, \tau_t^{ENR}, \vartheta_t^{ER}, \tau_t^e\}_{t=0}^\infty$, tal que:

1. Dados os preços e a política governamental, a alocação resolve o problema das famílias, das firmas de bens finais e das firmas do setor energético.

2. Dados os preços e a alocação, a política governamental satisfaz a sequência de restrições orçamentárias do governo (29).
3. Para cada período de tempo, os mercados de bens finais não energéticos, de energia renovável, de energia não renovável, de trabalho e de capital estejam em equilíbrio.

2.4 Calibração

Na definição dos valores dos parâmetros do modelo, nós seguimos duas estratégias: (i) escolhemos valores usualmente utilizados na literatura relacionada e (ii) utilizamos valores dos parâmetros em consonância com os dados da economia brasileira.

No primeiro caso, nós seguimos [Leal et al. \(2015\)](#) e definimos o fator de desconto das famílias $\beta = 0,98$, o inverso da elasticidade de substituição intertemporal do consumo $\varphi = 2$, o grau de persistência da poluição $\phi_x = 0.9979$, os parâmetros da função de custo de mitigação $\theta_1 = 0,0418$ e $\theta_2 = 2,8$ e os coeficientes da função de dano da poluição. A taxa de depreciação do capital corresponde à $\delta = 0,025$, o que dá uma taxa de depreciação anual de 10%, valor típico da literatura.

Na definição dos parâmetros relacionados à qualidade do meio ambiente, como o inverso da elasticidade de substituição intertemporal do meio ambiente, nós seguimos [Angelopoulos et al. \(2013\)](#) e definimos $\eta = 2$. Além disso, utilizamos os mesmos valores para o peso relativo da qualidade do meio ambiente na utilidade das famílias $q = 0,4$ e o grau de persistência da qualidade do meio ambiente $\phi_q = 0,9$. Sem perda de generalidade, nós assumimos que o valor, no estado estacionário, do índice de qualidade do meio ambiente é igual a 1.

Os valores das elasticidades de substituição entre energia e bens finais $\theta_z = 0.4$ e entre energia renovável e não renovável $\theta_e = 0.5$ foram retirados de [Tumen et al. \(2016\)](#). Por outro lado, o inverso da elasticidade de substituição intertemporal do trabalho $\omega = 2$ e o peso relativo do trabalho na utilidade das famílias $l = 2,9$ foram tomados de [Souza-Sobrinho \(2011\)](#). Por fim, por simplicidade, nós definimos o valor para a persistência dos choques de produtividade total dos fatores em cada setor em 0,95. A Tabela 1 mostra os valores utilizados em todos os parâmetros do modelo.

Os demais parâmetros foram calibrados utilizando dados disponíveis para o Brasil. As parcelas de gastos com bens finais na cesta de consumo das famílias⁸, $s_C = 0,9$, e de energia renovável na cesta de bens energéticos⁹, $s_R = 0,44$, foram retiradas da Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008-2009 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Por sua vez, o valor utilizado na elasticidade das emissões do setor de bens finais em relação ao produto, $\varepsilon_{e,Y} = (1 - \gamma^Y) = 1,0230$, foi calculado através de uma regressão linear das emissões de CO_2 com relação ao PIB do Brasil. Os dados de emissões e PIB estão em periodicidade anual e correspondem ao período entre 1971 e 2016. As emissões brutas de CO_2 estão em toneladas e são disponibilizados pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa¹⁰, já o PIB está em Reais de 2017 e foi disponibilizado pelo Sistema de Séries Temporais do Banco Central do Brasil¹¹.

Como não estão disponíveis dados de emissões provenientes apenas das famílias, não foi possível calcular a elasticidade das emissões das famílias em relação ao uso da energia não renovável $(1 - \gamma^C)$. Por simplicidade, decidimos definir esse valor em 1, tornando as emissões das famílias linearmente dependente do uso de energia não renovável, o que parece ser uma aproximação razoável.

Por seu turno, a participação do trabalho ($\alpha_L = 0.5$) na função de produção de bens finais foi retirada das Contas Nacionais de 2014 do IBGE, enquanto que as participações da energia renovável

⁸Utilizamos as despesas com energia elétrica, gás doméstico, transporte urbano, gasolina, álcool e outras despesas com transporte como proporção das despesas totais.

⁹Utilizamos as despesas com álcool e energia elétrica como proporção das despesas com a cesta energética (energia elétrica, gás doméstico, gasolina e álcool.)

¹⁰Disponível em <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission>.

¹¹Disponível em <<https://www3.bcb.gov.br/sgspub>>.

Tabela 1: Valores dos parâmetros do modelo

Parâmetro	Definição	Valor
β	Fator de desconto subjetivo das famílias	0.9800
φ	Inverso da elasticidade de substituição intertemporal do consumo	2.0000
η	Inverso da elasticidade de substituição da qualidade do meio ambiente	2.0000
ω	Inverso da elasticidade de substituição das horas trabalhadas	2.0000
q	Peso relativo da qualidade do meio ambiente na utilidade das famílias	0.4000
l	Peso relativo do trabalho na utilidade das famílias	2.9000
s_C	Parcela de gastos com bens finais na cesta de consumo	0.9000
s_R	Parcela de gastos com energia renovável na cesta de bens energéticos	0.4400
θ_z	Elasticidade de substituição entre energia e bens finais	0.4000
θ_e	Elasticidade de substituição entre energia renovável e energia não renovável	0.5000
δ	Taxa de depreciação do capital	0.0250
Φ	Parâmetro do custo de ajustamento do investimento	10.000
α_L	Participação do trabalho na função de produção de bens finais	0.5000
α_R	Participação da energia renovável na produção de bens finais	0.0522
α_{NR}	Participação da energia não renovável na produção de bens finais	0.0678
ϕ_x	Grau de persistência da poluição	0.9979
γ_x	Elasticidade da qualidade do meio ambiente em relação ao estoque de poluição	1.0000
ϕ_q	Grau de persistência da qualidade do meio ambiente	0.9000
\bar{Q}	Índice de qualidade do meio ambiente no estado estacionário	1.0000
$1 - \gamma^Y$	Elasticidade das emissões do setor de bens finais em relação ao produto	1.0230
$1 - \gamma^C$	Elasticidade das emissões das famílias em relação a energia não renovável	1.0000
θ_1	Coefficiente da função de custo de mitigação	0.0418
θ_2	Expoente da função de custo de mitigação	2.8000
d_0	Intercepto da função de dano da poluição	-2.97E-03
d_1	Coefficiente da função de dano da poluição	-2.16E-06
d_2	Coefficiente da função de dano da poluição	9.26E-09
ρ_{AY}	Persistência do choque de produtividade do setor de bens finais	0.9500
ρ_{AR}	Persistência do choque de produtividade do setor de energia renovável	0.9500
ρ_{ANR}	Persistência do choque de produtividade do setor de energia não renovável	0.9500

($\alpha_R = 0.0522$) e da energia não renovável ($\alpha_{NR} = 0.0678$), foram calculadas considerando a relação entre a participação da energia secundária no consumo intermediário do PIB (0.12) proveniente das Contas Nacionais de 2014 e a participação das energias renováveis (0.435) e não renováveis (0.565) na oferta interna de energia disponíveis no Balanço Energético Nacional de 2014 do Ministério de Minas e Energia do Brasil.

3 Resultados

Nesta seção, discutimos as respostas ótimas da política ambiental ampla de Ramsey a choques na produtividade total dos fatores nos três setores da economia. Inicialmente, comparamos os efeitos de choques isolados em cada um dos setores com os efeitos de um choque de produtividade global, que ocorre em todos os setores ao mesmo tempo. Posteriormente, comparamos as respostas para três diferentes opções de política ambiental. A primeira considera a política ambiental ampla completa, como descrito anteriormente; a segunda, contém apenas o imposto sobre emissões, descartando a estrutura de política fiscal do setor energético; e na terceira, o governo não utiliza nenhum imposto ou subsídio. Por fim, realizamos uma análise de bem-estar comparando a política ambiental ampla (presença dos três instrumentos tributários) com políticas alternativas, que possuem apenas um dos instrumentos tributários de forma isolada, e com a alternativa de nenhum imposto ou subsídio.

3.1 Política Ótima

Da solução do problema de Ramsey, nós obtemos os valores ótimos da política ambiental no estado estacionário. Estes valores estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores ótimos das variáveis de política ambiental no estado estacionário

Variável	Definição	Valor
ϑ^{ER}	Alíquota de subsídio sobre energia renovável	0.00977
τ^{ENR}	Alíquota de imposto sobre energia não renovável	0.04199
τ^e	Alíquota de imposto sobre Emissões	0.00789

Portanto, como impacto da poluição sobre a produção é maior que o custo de mitigação da política ambiental, observamos que o governo adota uma taxa de imposto positiva sobre as emissões, impondo um nível de mitigação maior que zero para as firmas ($\mu = 0.15578$), assim como acontece em [Heutel \(2012\)](#) e [Leal et al. \(2015\)](#). Por outro lado, como o uso de energia não renovável, por parte das famílias e firmas, está gerando um nível de emissões capaz de impactar mais negativamente a produção e a qualidade do meio ambiente do que aumentar o nível de bem-estar dos agentes via consumo (direta ou indiretamente através dos bens finais), o governo impõe uma alíquota de imposto positivo sobre o preço desse tipo de energia. Por fim, para que a política ambiental não reduza significativamente o nível de consumo de energia e de bens finais não energéticos o governo estabelece um subsídio nos preços da energia não renovável, que pode ser usada como substituta da energia poluente, mas sem gerar danos a produção e/ou ao meio ambiente.

Portanto, os resultados do equilíbrio estático já demonstram que é vantajoso adotar uma política ambiental ampla que contemple além de um mecanismo de restrição de emissões, uma estratégia explícita de substituição de fontes energéticas poluentes por fontes renováveis alternativas.

Em complemento, para investigar a dinâmica das respostas diante de choques tecnológicos, produzimos choques positivos de 1% na produtividade total dos fatores em cada um dos três setores do modelo. Em todos os casos, o período de tempo utilizado nos experimentos é de um trimestre e cem períodos foram simulados.

No primeiro experimento, produzimos um choque de produtividade global, ou seja, que atinge os três setores ao mesmo tempo e comparamos as respostas com os choques isolados em cada um dos setores. Utilizamos funções de impulso-resposta para captar os desvios percentuais das variáveis do modelo em relação aos seus valores de estado estacionário após o impacto dos choques.

Por sua vez, no segundo experimento analisamos as respostas para políticas ambientais distintas. Para isso, simulamos o nosso modelo com três alternativas distintas para o aparato tributário utilizado pelo governo. No primeiro caso consideramos o aparato fiscal completo, como no caso simulado anteriormente. No segundo caso, o governo utiliza apenas o imposto sobre emissões, desconsiderando a utilização de uma política no setor energético. E, no terceiro caso, o governo não utiliza nenhum dos impostos ou subsídios presentes nos casos anteriores. Neste caso, utilizamos os valores das funções de impulso-resposta em nível para que as diferenças relacionadas ao estado estacionário de cada uma das opções possam ser adequadamente visualizadas.

3.2 Funções de Respostas à Impulsos

3.2.1 Respostas à Impulsos dos Choques de Produtividade

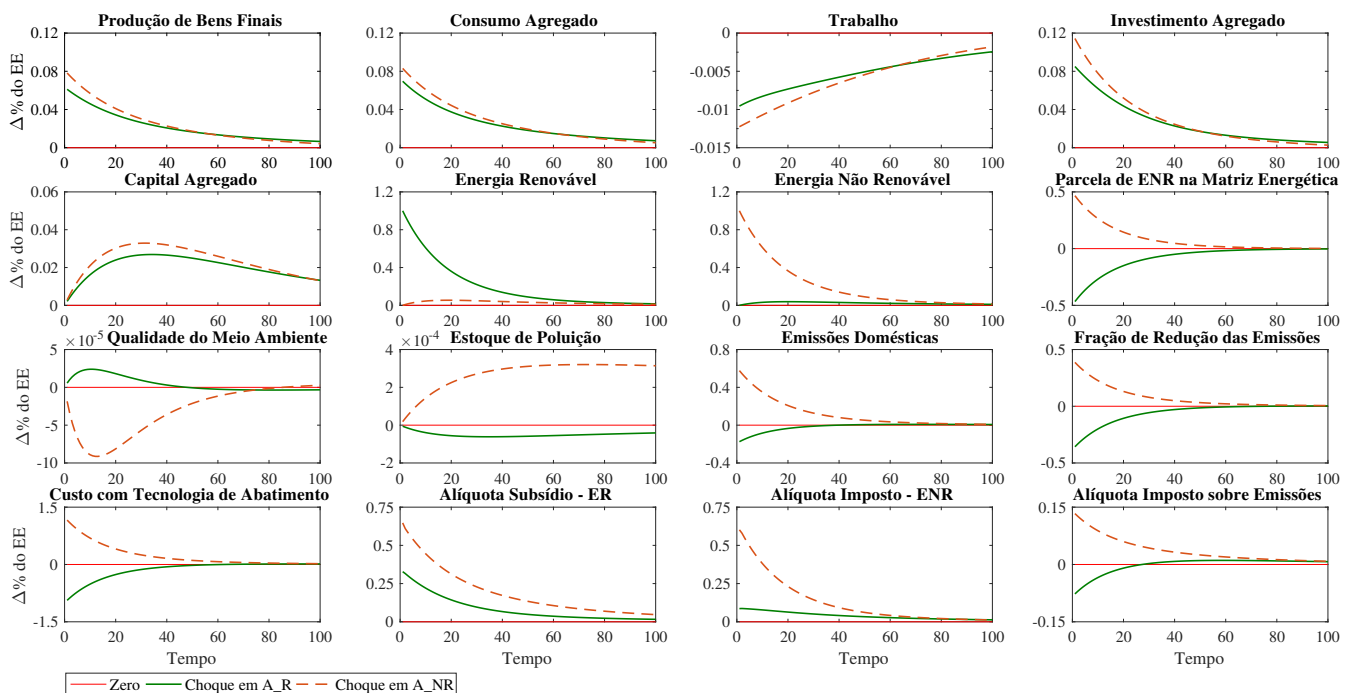
Na Figura 3 podemos visualizar as respostas para as principais variáveis do modelo a choques de produtividade específicos dos setores de energia não renovável (linha tracejada laranja) e de energia renovável (linha sólida verde).

No caso do choque no setor de energia não renovável, podemos perceber que com um aumento de 1% na produtividade, temos um aumento de mesma magnitude na produção deste setor, fazendo com que o seu preço (relativo aos bens finais) e a produtividade marginal do capital caiam, ficando mais vantajoso investir nos setores de bens finais e de energia renovável. Desta forma, temos um aumento no estoque de capital destes dois setores e uma redução no capital do setor de energia não renovável, aumentando o nível de investimento e o estoque de capital agregados da economia. Além disso, como o preço da energia não renovável diminui e ela serve de insumo para a produção de bens finais, a produção e o consumo dos bens produzidos neste último setor aumentam. Portanto,

dado o aumento do consumo de energia não renovável pelas famílias, temos um aumento no nível de consumo agregado. Com o aumento da sensação de riqueza, os agentes reduzem suas ofertas de horas trabalhadas, aumentando os salários (efeito renda maior que efeito substituição).

Com relação as questões ambientais, percebemos que com o aumento da utilização de energia não renovável temos um aumento das emissões das firmas e das famílias, fazendo com que o estoque de poluição suba e a qualidade do meio ambiente seja prejudicada. Com isso, o governo impõe impostos sobre as emissões e sobre o preço da energia não renovável com o intuito de reduzir os efeitos danosos dessa externalidade na produção e na qualidade do meio ambiente. Em resposta a política do governo, as firmas aumentem seu nível de mitigação, o que em conjunto com o aumento da produção de bens finais, aumenta o custo com tecnologia de abatimento. Por fim, o governo impõe um subsídio sobre o preço da energia renovável, ajudando a aumentar os níveis deste tipo de energia, entretanto, não forte o suficiente para fazer com que a parcela de energia não renovável na matriz energética deixe de aumentar.

Figura 3: Respostas à impulsos na produtividade dos setores de energia renovável e não renovável



Notas: 1) Nos gráficos: ER = Energia Renovável; ENR = Energia Não Renovável; $\Delta\%$ do EE = Variação Percentual do Estado Estacionário. 2) Na legenda: A_R = Produtividade total dos fatores do setor de energia renovável e A_NR = Produtividade total dos fatores do setor de energia não renovável.

No tocante ao choque de produtividade no setor de energia renovável, observamos que as variáveis econômicas possuem comportamentos muito similares aos relatados no choque anterior. Portanto, observamos um aumento na produção do setor de energia renovável, fazendo com que o preço desta energia reduza e, pelos mesmos caminhos discutidos anteriormente, tenhamos um aumento dos níveis de consumo, investimento e estoque de capital agregados, assim como uma redução da oferta de trabalho.

Por sua vez, os impactos nas variáveis ambientais e no resultado do setor energético são bastante distintos. Com relação ao setor energético, observamos que com a redução do preço da energia renovável, as famílias e firmas aumentam a utilização desta fonte energética e, como a energia não renovável praticamente não sai do seu nível de estado estacionário, temos uma queda na participação da fonte poluente na matriz energética.

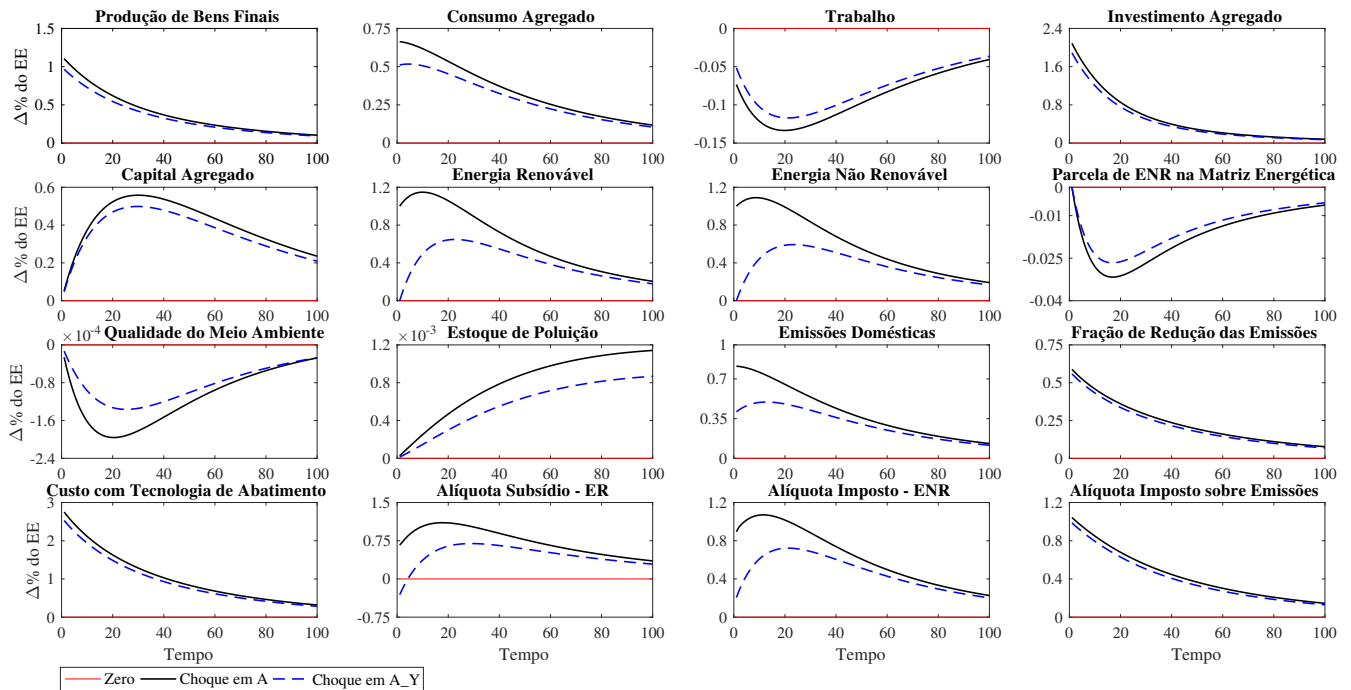
Este fato faz com que as emissões domésticas totais reduzam, induzindo a uma redução no estoque de poluição e melhorando a qualidade do meio ambiente. Este conjunto de resultados ambientais positivos fazem com que o impacto da poluição na produção e na qualidade do meio ambiente se

torne baixo o suficiente para que o governo reduza a alíquota do imposto sobre emissões. Com isso, as firmas reduzem seu nível de mitigação e, mesmo com o aumento na produção de bens finais, o custo com tecnologia de abatimento reduz. Além disso, observamos que estes bons resultados ambientais não são suficientes para que o governo abandone a política de indução do setor energético para uma matriz energética mais “limpa”. Portanto, vemos que a alíquota de imposto sobre o preço da energia não renovável e o subsídio sobre o preço da energia renovável aumentam. Entretanto, estes aumentos são significativamente inferiores aos ocasionados após um choque no setor de energia não renovável que gera uma tensão ambiental muito mais complexa.

Por sua vez, na Figura 4 podemos observar as respostas para os choques de produtividade específico do setor de bens finais (linha tracejada azul) e de produtividade global (linha sólida preta).

Como o setor de bens finais representa grande parte da economia do modelo ($\sim 85\%$ do PIB), observamos que as respostas das variáveis ao choque global seguem em grande parte os padrões das respostas do choque daquele setor. No que diz respeito as variáveis econômicas tradicionais, observamos que os dois casos geram resultados bastante similares aos discutidos nos choques anteriores. Portanto, encontramos aumento da produção do setor de bens finais, aumento do consumo, do investimento e do capital agregados e redução das horas trabalhadas.

Figura 4: Respostas à impulsos na produtividade total dos fatores global e no setor de bens finais



Notas: 1) Nos gráficos: ER = Energia Renovável; ENR = Energia Não Renovável; $\Delta\%$ do EE = Variação Percentual do Estado Estacionário. 2) Na legenda: A = Produtividade total dos fatores global e A_Y = Produtividade total dos fatores do setor de bens finais.

Entretanto, com relação ao setor energético, observamos algumas diferenças nas magnitudes dos impactos. Isso pode ser explicado pelo fato de que, na ocorrência de um choque de produtividade global, temos aumentos simultâneos nas produtividades do setor de bens finais e do setor energético, fazendo com que tenhamos um aumento na produção de energia muito mais intenso (efeito direto do aumento na produtividade do setor energético) do que no caso de um choque de produtividade específico do setor de bens finais, em que observamos apenas um efeito secundário de reação da produção energética. Com isso, observamos que o governo adota uma política ambiental no setor energético mais dura no caso do choque global, adotando maiores valores para as alíquotas imposta aos preços da energia (seja de imposto ou de subsídio) quando comparados aos valores adotados no choque específico do setor de bens finais.

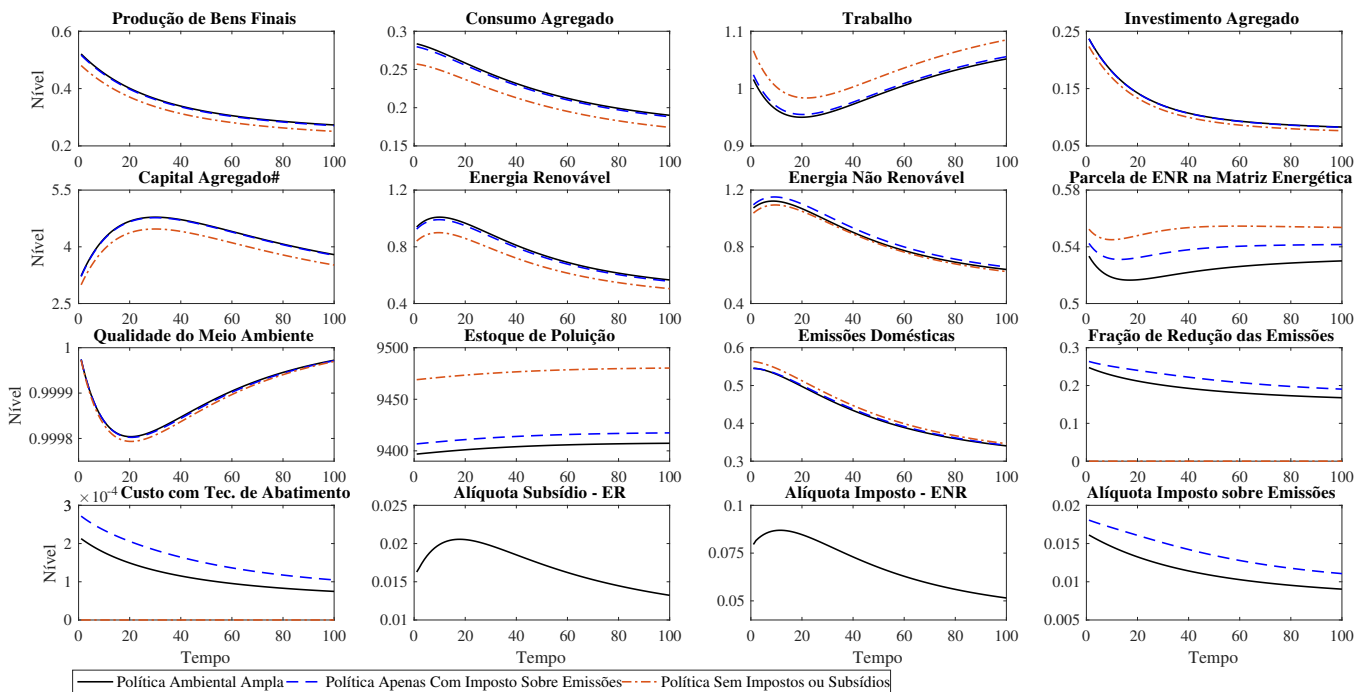
Além disso, como o choque de produtividade global aumenta a produção de energia não renovável em magnitude maior que a observada no choque do setor de bens finais, temos um nível de emissões

domésticas totais maior e, por consequência, um aumento da poluição e uma queda na qualidade do meio ambiente mais intensos no caso de um choque global. Entretanto, é importante perceber que o governo adota uma política de restrição direta das emissões muito similar nos dois casos, fazendo com que a política do setor energético seja de suma importância para reduzir os resultados ambientais negativos discutidos anteriormente.

3.2.2 Políticas Ambientais Distintas

Nesta seção iremos comparar as respostas das principais variáveis do modelo a um choque de produtividade global, similar ao discutido anteriormente, para três alternativas distintas de política ambiental. Buscamos compreender quais as principais dissimilaridades entre a política ambiental ampla discutida até aqui, uma política ambiental em que o governo não utiliza o aparato fiscal no setor energético e uma política em que o governo não adota nenhuma política ambiental.

Figura 5: Respostas à impulsos na produtividade total dos fatores global para políticas ambientais distintas



Nota: ER = Energia Renovável e ENR = Energia Não Renovável.

Os resultados revelam que o caso sem impostos, apresenta resultados piores para as variáveis econômicas, temos menores níveis de produção, consumo, estoque de capital, investimento, utilização de energia e horas de lazer. Além disso, percebemos que, como não temos nenhum tipo de política ambiental, as firmas não possuem incentivos para mitigar as emissões e, por isso, não gastam nada com tecnologia de abatimento. Desta forma, mesmo utilizando um nível menor de energia não renovável, a economia gera mais emissões do que nos outros casos, apresentando, conseqüentemente, níveis de estoque de poluição mais elevados e piores níveis de qualidade do meio ambiente.

Por sua vez, no caso da política que utiliza apenas do imposto sobre as emissões, percebemos resultados econômicos bastante similares aos retratados no caso da política ambiental ampla. Por outro lado, constatamos que no setor energético, a política ambiental mais restrita é compatível com um nível maior de energia não renovável e um nível menor de energia renovável, quando comparado com a política ambiental ampla, isso se deve ao fato de não existir nenhum incentivo capaz de conduzir a matriz energética em direção à fontes mais “limpas”. Assim, quando observamos a questão ambiental, percebemos que no caso da política restrita, mesmo que as firmas gastem mais com

tecnologia de abatimento e apresentem níveis mais elevados de mitigação, os níveis de emissões são mais elevados, gerando maiores níveis de poluição e uma ligeira queda na qualidade do meio ambiente.

3.3 Avaliação de Bem-Estar de Políticas Ambientais Alternativas

Nesta seção, avaliamos os resultados de bem-estar de cinco alternativas distintas de política ambiental. A primeira delas se refere à proposta de política ambiental ampla, que conta com os três instrumentos tributários discutidos anteriormente. Este caso servirá de base de comparação para as demais políticas alternativas. Na segunda política, o governo adota apenas o imposto sobre emissões; na terceira, apenas o imposto sobre o preço da energia não renovável; na quarta, apenas o subsídio sobre o preço da energia renovável; e, por fim, na última, o governo não utiliza nenhum dos impostos ou subsídios anteriores.

A avaliação comparativa consiste em computar a perda de bem-estar das políticas ambientais alternativas em relação à política ambiental ampla (Schmitt-Grohé & Uribe, 2007).

Para isso, considere que a política ambiental ampla é denotada por w e que a política alternativa é denotado por a . Definimos o bem-estar associado ao equilíbrio de Ramsey, relativo a política ampla no período 0 como:

$$V_0^w = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t U \left[Z(C_t^w, E_t^w), Q_{t-1}^w, L_t^w \right]$$

onde, C_t^w , E_t^w , Q_{t-1}^w e L_t^w denotam, respectivamente, o consumo de bens finais, o consumo de energia, a qualidade do meio ambiente e as horas trabalhadas no caso da política ampla.

De forma similar, definimos o bem-estar condicional associado ao equilíbrio de Ramsey da política alternativa como:

$$V_0^a = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t U \left[Z(C_t^a, E_t^a), Q_{t-1}^a, L_t^a \right]$$

Por fim, considere λ como o custo de bem-estar de uma política alternativa distinta da política ambiental ampla. Portanto, podemos definir λ como a fração do consumo de bens finais que uma família estaria disposta a desistir com a adoção da política ampla para estar tão bem sob a política alternativa quanto estaria sob a política ampla. Assim, a definição formal implícita de λ é:

$$V_0^a = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t U \left[Z((1 - \lambda)C_t^w, E_t^w), Q_{t-1}^w, L_t^w \right]$$

Além disso, computamos as médias dos valores do consumo de bens finais, do estoque de poluição e das emissões para 100 períodos após a ocorrência de um choque de produtividade global. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Avaliação de bem-estar para distintas políticas ambientais

Política Ambiental	$100 \times \lambda$	Média Consumo	$\Delta\%$	Média Poluição	$\Delta\%$	Média Emissões	$\Delta\%$
Ampla	-	0.2266	-	9403.99	-	0.4226	-
Apenas com imposto sobre emissões	1.3754	0.2242	-1.0617	9413.96	0.1060	0.4251	0.5752
Apenas com imposto sobre P^{ENR}	7.6157	0.2139	-5.6065	9450.75	0.4973	0.4284	1.3702
Apenas com subsídio sobre P^{ER}	10.5364	0.2086	-7.9212	9474.48	0.7496	0.4328	2.4110
Sem impostos ou subsídios	11.0187	0.2078	-8.2962	9476.62	0.7724	0.4340	2.6858

Nota: $\Delta\%$ = Variação percentual da média da variável no caso da política alternativa em comparação a média no caso da política ampla.

Os resultados demonstram que a política ambiental ampla atinge níveis de bem-estar superiores a todas as outras alternativas de política. A política que utiliza apenas impostos sobre emissões é a que apresentou resultados mais próximos da política ampla. Nesta primeira política alternativa,

os agentes deveriam abrir mão de aproximadamente 1,4% do consumo de bens finais na presença de uma política ampla para estar tão bem quanto estaria no caso da política que utiliza apenas impostos sobre emissões. Além disso, percebemos que a média do consumo é pouco mais de 1% menor no caso da política alternativa na presença de um choque de produtividade global, além de existirem aumentos de aproximadamente 10% no estoque de poluição e de aproximadamente 0,58% nas emissões. As demais políticas apresentam resultados ainda piores do ponto de vista do bem-estar e das médias das variáveis analisadas. A alternativa onde o governo não utiliza nenhum dos impostos ou subsídios é relativamente pior que todas as outras, necessitando que os agentes abram mão de mais de 11% do consumo de bens finais para que estejam tão bem na política sem impostos quanto estariam na política ampla. Além disso, observamos uma queda do consumo médio após o choque de produtividade global de mais de 8%, enquanto que temos aumentos em torno de 0,77% no estoque de poluição e de mais 2,5% nas emissões.

4 Conclusão

Neste artigo, discutimos a relação entre o ciclo econômico e a adoção de uma política ambiental ótima ampla, que considerou além de impostos sobre emissões, uma estrutura de impostos e subsídios no setor energético. Particularmente, calibramos um modelo E-DSGE com os dados da economia brasileira e resolvemos o problema de Ramsey para encontrar as trajetórias ótimas das alíquotas da política ambiental ampla. Além disso, analisamos o comportamento dinâmico das variáveis do modelo em resposta a choques de produtividade, comparamos essas respostas para diferentes propostas de políticas ambientais e implementamos uma análise de bem-estar para um conjunto de diferentes alternativas de políticas.

Os resultados mostraram que no equilíbrio ótimo as alíquotas da política ambiental ampla são positivas e possuem um caráter dinâmico pro-cíclico, com exceção da alíquota do imposto sobre emissões que é contracíclica na presença de um choque de produtividade do setor de energia renovável. As simulações mostram ainda que os choques de produtividade reduzem a utilização de energia não renovável no curto prazo, diminuindo as emissões de GEE para um dado nível de produção, menos para o caso de choques no setor de energia não renovável, que acontece o oposto.

Por outro lado, quando comparamos a política ambiental ampla com uma estratégia de política mais restrita (apenas impostos sobre emissões), percebemos que mesmo que as firmas gastem mais com tecnologia de abatimento e apresentem níveis mais elevados de mitigação, os níveis de emissões serão mais elevados no caso da política mais restrita, gerando maiores níveis de poluição e deterioração da qualidade do meio ambiente. Além disso, a avaliação de bem-estar mostrou que a política ambiental ampla gerou níveis de bem-estar superiores a todas as políticas alternativas concorrentes (mais restritas).

O nosso estudo é o primeiro a utilizar um modelo E-DSGE para discutir a relação entre o ciclo econômico e a adoção de uma política ambiental ótima ampla, que considera além de impostos sobre emissões, uma estrutura de impostos e subsídios no setor energético. A aplicação para o Brasil dá suporte para que os *policy makers* possam discutir a possibilidade da adoção de uma política ambiental ampla no país. Haja vista que os resultados oferecidos aqui ajudam a entender as relações entre essa política e o ciclo econômico, ajudando-os a tomar suas decisões com um caráter mais racional.

Referências

- Angelopoulos, K., Economides, G., & Philippopoulos, A. (2010). What is the best environmental policy? taxes, permits and rules under economic and environmental uncertainty. *CESifo Working Paper, 2980*, 1–31.
- Angelopoulos, K., Economides, G., & Philippopoulos, A. (2013). First-and second-best allocations under economic and environmental uncertainty. *International Tax and Public Finance, 20*, 360–280.

- Annicchiarico, B. & Dio, F. (2015). Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new keynesian model. *Journal of Environmental Economics and Management*, 69, 1–21.
- Argentiero, A., Bollino, C., Micheli, S., & Zopounidis, C. (2018). Renewable energy sources policies in a bayesian dsge model. *Renewable Energy*, 120, 60–68.
- Atallaa, T., Blazqueza, J., Hunta, L., & Manzano, B. (2017). Prices versus policy: An analysis of the drivers of the primary fossil fuel mix. *Energy Policy*, 106, 536–546.
- Babiker, M., Reilly, J., & Jacoby, H. (2003). The kyoto protocol and developing countries. *Energy Policy*, 28, 525–538.
- Babiker, M., Reilly, J., & Jacoby, H. (2005). Does uncertainty justify intensity emission caps. *Resource and Energy Economics*, 27, 343–353.
- Blazquez, J., Martin-Moreno, J., Perez, R., & Ruiz, J. (2017). Fossil fuel price shocks and co2 emissions: the case of spain. *The Energy Journal*, 38, 161–176.
- Brock, W. & Taylor, M. S. (2005). Economic growth and the environment: A review of theory and empirics (chapter 28). In P. Aghion & S. Durlauf (Eds.), *Handbook of Economic Growth* (pp. 1749–1821). Elsevier B.V.
- Dissou, Y. & Karnizova, L. (2016). Emissions cap or emissions tax? a multi-sector business cycle analysis. *Journal of Environmental Economics and Management*, 79, 169–188.
- Fischer, C. & Heutel, G. (2013). Environmental macroeconomics: environmental policy, business cycles, and directed technical change. *Annual Review of Resource Economics*, 5, 197–210.
- Fischer, C. & Springborn, M. (2011). Emissions targets and the real business cycle: intensity target versus caps or taxes. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62, 352–366.
- Heutel, G. (2012). How should environmental policy respond to business cycle? optimal policy under persistent productivity shocks. *Review of Economic Dynamics*, 15, 244–264.
- Leal, R., Ely, R., Uhr, J., & Uhr, D. (2015). Ciclos econômicos e emissão de co2 no brasil: uma análise dinâmica para políticas ambientais ótimas. *Revista Brasileira de Economia*, 69, 53–73.
- Lintunen, J. & Vilmi, L. (2013). On optimal emission control - taxes, substitution an business cycles. *Bank of Finland Reseaech (Discussion Papers)*, 24, 1–30.
- Newell, R. & Pizer, W. (2008). Indexed regulation. *National Bureau of Economic Research*.
- Niua, T., Yaoa, X., Shaob, S., & Lic, D. (2018). Environmental tax shocks and carbon emissions: An estimated dsge model. *Structural Change and Economic Dynamics*, In Press.
- Nordhaus, W. D. (2007). A review of the stern review on the economics of climate change. *Journal of Economic Literature*, 45, 686–702.
- Nordhaus, W. D. A. (2008). *A question of balance: weighing the options on global warming policies*. New Haven, USA: Yale University Press.
- Schmitt-Grohé, S. & Uribe, M. (2007). Optimal simple and implementable monetary and fiscal rules. *Journal of Monetary Economics*, 54, 1702–1725.
- Souza-Sobrinho, N. (2011). The role of interest rates in the brazilian business cycles. *Revista Brasileira de Economia*, 65, 315–336.
- Tumen, S., Unalmis, D., Unalmis, I., & Unsal, D. (2016). Taxing fossil fuels under speculative storage. *Energy Economics*, 53, 64–75.
- Viguiier, L., Babiker, M., & Reilly, J. (2003). The costs of the kyoto protocol in the european union. *Energy Policy*, 31, 393–483.