

Choques Energéticos e Ambientais 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

Utilizamos um modelo ambiental de equilíbrio geral dinâmico e estocástico (E-DSGE) com um setor energético diversificado para uma pequena economia aberta calibrado com os dados da economia brasileira e analisamos os impactos dos três tipos de choques energéticos padrões na literatura: choques negativos na oferta energética, choques na demanda por energia e choques específicos nos preços internacionais das fontes energéticas comercializáveis no exterior. Além disso, analisamos quais os impactos econômicos e ambientais de choques nas alíquotas da política ambiental e quais os impactos domésticos em um choque nas emissões do resto do mundo. Os resultados permitiram um entendimento mais adequado do setor energético na presença dos choques relatados. Podemos visualizar, por exemplo, que na presença de choques externos nos preços da energia não renovável, as famílias substituem uma parcela das fontes energéticas não renováveis por fontes energéticas renováveis ao invés de reduzir o uso de energia. Além disso, percebemos que existem prós e contras na utilização de cada uma das ferramentas da política ambiental, indicando que a utilização conjunta destes mecanismos podem trazer efeitos econômicos e ambientais mais positivo do que se eles forem utilizados individualmente.

Palavras-Chaves: E-DSGE. Choques energéticos. Política ambiental.

Classificação JEL: Q43, Q58, E32.

Abstract

We used a environmental dynamic and stochastic general equilibrium model (E-DSGE) with a diversified energy sector for a small open economy calibrated with data from the Brazilian economy and analyzed the impacts of the three types of standard energy shocks in the literature: negative supply energy shocks, shocks in the demand for energy and specific shocks in the international prices of energy sources tradable abroad. In addition, we analyzed the economic and environmental impacts of shocks in environmental policy rates and the domestic impacts of a shock on emissions from the rest of the world. The results allowed a better understanding of the energy sector in the presence of reported shocks. We can see, for example, that in the presence of external shocks in nonrenewable energy prices, households replace a portion of nonrenewable energy sources with renewable energy sources instead of reducing energy use. In addition, we see that there are pros and cons in using each of the environmental policy tools, indicating that the joint use of these mechanisms can bring more positive economic and environmental effects than if they are used individually.

Keywords: E-DSGE. Energy shocks. Environmental policy.

JEL Code: Q43, Q58, E32

Área 4 - Macroeconomia, Economia Monetária e Finanças

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

1 Introdução

No início do nosso século foram observadas novas elevações nos preços do petróleo, tão bruscas quanto as ocorridas na década de 1970, mas com causas e consequências completamente diferentes (Kilian, 2014). Conseqüentemente, a literatura econômica formatou uma grande agenda de pesquisa ao redor deste tema, com a utilização de metodologias empíricas (Peersman & Robays, 2012; Kilian & Murphy, 2012; Cunado et al., 2015) e teóricas (Medina & Soto, 2005; Bodenstein et al., 2012; Forni et al., 2015; Huynh, 2016).

Mais recentemente, problemas de natureza ambiental também passaram a fazer parte do leque de questões investigadas por estudos energéticos. Desde então, a ligação entre as dimensões ambiental e energética vem ganhando força e muitos autores passaram a considerá-la em seus trabalhos (Tumen et al., 2016; Blazquez et al., 2017; Argentiero et al., 2018; Niua et al., 2018).

Na prática, o que se observa é que alguns países estão buscando encontrar políticas que induzam a substituição de fontes energéticas fósseis por fontes renováveis mais limpas, buscando reduzir os efeitos negativos das emissões de gases poluentes. Tal fato fez com que outras fontes de energia, além do petróleo, passassem a ter mais relevância na composição das matrizes energéticas pelo mundo, fazendo com que os choques nos preços dessas novas possibilidades energéticas tenham também que ser considerados.

Este estudo pretende contribuir com essa literatura ao desenhar um modelo ambiental de equilíbrio geral dinâmico e estocástico (E-DSGE) para uma pequena economia aberta com um setor energético diversificado, com o objetivo de estudar os impactos de choques nas diferentes fontes energéticas e não apenas no petróleo, como vem sendo tradicionalmente feito na literatura da área até aqui.

Para efeitos comparativos, calibramos um modelo que considera apenas o petróleo como fonte energética e confrontamos esses resultados com os encontrados na nossa proposta, que possui o setor energético diversificado. Além disso, analisamos como choques de políticas ambientais e de emissões geradas por outros países afetam as variáveis investigadas.

Calibramos o modelo com os dados do Brasil. Nesse país, o percentual de petróleo na matriz energética vem se reduzindo ao longo dos anos. No início da década de 1970, esse combustível fóssil correspondia a mais de 50% da oferta interna de energia e atingiu seu menor valor (36,5%) em 2016. Entretanto, a substituição do petróleo na matriz energética não foi realizada por outra fonte de igual importância, mas sim, pelo surgimento de uma espécie de portfólio energético composto por várias fontes de energia renováveis e não renováveis. O portfólio energético do Brasil possui quatro fontes que se destacam e que, em conjunto, correspondem por cerca de 79% da oferta interna de energia do país, são elas: o petróleo e seus derivados (36,5%), os derivados da cana-de-açúcar (17,5%), a energia hidráulica (12,6%) e o gás natural (12,3%).

O país durante muito tempo teve uma forte dependência externa de petróleo, mas, recentemente, diminuiu essa dependência e nos últimos anos está se comportando como um exportador líquido. Por outro lado, o gás natural teve forte ascensão na participação da matriz energética no período posterior a década de 2000, mas parte desse aumento vem sendo suprido por importações. Buscamos desenhar um modelo de economia aberta para contemplar as relações dessas fontes energéticas com o comércio internacional.

No nosso modelo, consideramos duas premissas em relação aos preços das fontes energéticas: 1) no caso em que a energia possui relação com o mercado externo, consideramos que os preços são dados exogenamente. Nestes casos, consideramos que os choques domésticos não possuem intensidade suficiente para influenciar o mercado energético internacional, mas que os preços praticados nesse mercado podem ser responsáveis por uma parcela significativa das flutuações da economia doméstica; 2) no caso em que o setor externo não tem influência na produção da fonte energética, reconhecemos que os preços são endógenos em relação aos agregados macroeconômicos domésticos, como já vem sendo utilizado em grande parte dos modelos que tratam dos choques energéticos em economias grandes (Forni et al., 2015; Huynh, 2016).

Nós analisamos os três tipos de choques energéticos padrões na literatura, são eles: choques negativos na oferta energética, choques na demanda por energia e choques específicos nos preços internacionais das fontes energéticas comercializáveis no exterior. Os resultados mostram que, no caso de um choque negativo na oferta energética, a economia enfrentará um período de recessão, independente da fonte energética afetada. Entretanto, observamos que os canais de transmissão das fontes energéticas renováveis são distintos dos das fontes não renováveis. Já, no caso de um choque de demanda, as respostas são economicamente positivas quando o choque é proveniente do setor de bens finais *tradable* e, possuem resultados inversos a estes, quando o choque provém das firmas do setor *nontradable*. Por fim, observamos que os choques nos preços internacionais da energia estão vinculados à aumentos na produção doméstica e nos níveis de consumo e estoque de capital. Além disso, observamos que, como o preço da energia renovável fica relativamente mais barato, as famílias substituem uma parcela das fontes energéticas não renováveis por fontes energéticas renováveis. Finalmente, ao comparar os resultados do nosso modelo energético diversificado com o modelo mais restrito (com uma única fonte energética), observamos que as respostas econômicas do nosso modelo são bem menos voláteis do que no caso do modelo restrito.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma: na próxima seção, apresentamos o modelo. Na seguinte, discutimos as estratégias de calibração dos parâmetros. Na quarta seção, realizamos a apresentação e análise dos resultados. Na última seção, expomos nossas conclusões acerca do trabalho.

2 Modelo

Nós construímos um modelo ambiental, dinâmico e estocástico de equilíbrio geral (E-DSGE) para uma pequena economia aberta com um setor energético diversificado. O modelo é composto por famílias, firmas de bens finais, firmas do setor energético, governo, estrutura ambiental e setor externo.

As famílias consomem (bens finais não energéticos e energia), poupam, ofertam trabalho, além de serem proprietárias das firmas. O setor produtor de bens finais não energéticos é composto por dois tipos de firmas, as que além de ofertarem seus produtos no mercado doméstico, transacionam com o mercado internacional (*tradables*) e as que transacionam apenas no mercado doméstico (*non-tradables*).

Por sua vez, o setor energético é composto por quatro setores produtores de energia primária (hidráulica, cana-de-açúcar, petróleo e gás natural) e duas refinarias que transformam essa energia primária em energia final (renovável e não renovável) própria para ser utilizada pelas firmas de bens finais e pelas famílias. O subsetor de energia primária não renovável (petróleo e gás natural) está conectado ao mercado internacional, estando sujeito a choques nos preços dessas *commodities* energéticas.

Consideramos que, ao utilizarem energia não renovável, as famílias e firmas emitem gases poluentes que prejudicam a qualidade do meio ambiente e causam danos à produção de bens. Com o objetivo de melhorar o resultado econômico, o governo impõe uma política ambiental, 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 investindo 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).

2.1 Famílias

A economia é habitada por um grande número de famílias que consomem uma cesta de bens, Z_t , que por sua vez é composta pela cesta de consumo de bens finais não energéticos (C_t) e pela cesta

de consumo de energia (E_t^C), de acordo com o seguinte agregador com elasticidade de substituição constante (CES):

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

onde θ_z é a elasticidade de substituição intertemporal entre a cesta de consumo de energia e a cesta de consumo de bens finais não energéticos e s_C indica a parcela de gastos com a cesta de bens finais não energéticos no consumo das famílias.

A cesta de bens finais não energéticos é composta por bens negociáveis no comércio internacional (*tradables*), C_t^T , e bens não negociáveis no comércio internacional (*nontradables*), C_t^{NT} , de acordo com:

$$C_t = \left[(1 - s_T)(C_t^{NT})^{\frac{\theta_c - 1}{\theta_c}} + s_T(C_t^T)^{\frac{\theta_c - 1}{\theta_c}} \right]^{\frac{\theta_c}{\theta_c - 1}}$$

onde θ_c é a elasticidade de substituição intertemporal entre o consumo de bens *tradables* e o consumo de bens *nontradables* e s_T indica a parcela de gastos com bens *tradables* na cesta de bens finais não energéticos das famílias.

A cesta energética é composta por consumo de energia renovável (E_t^{RC}) e consumo de energia não renovável (E_t^{NRC}), de acordo com:

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

onde θ_e é a elasticidade de substituição intertemporal entre o consumo de energia renovável e o consumo de energia não renovável e s_R indica a parcela de gastos com energia renovável na cesta de bens energéticos das famílias.

A preferência da família representativa é dada por:

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

onde, β é o fator de desconto subjetivo das famílias; Z_t é a cesta agregada de consumo, discutida anteriormente; Q_{t-1} é a qualidade do meio ambiente no final do período $t - 1$; q é o peso dado à qualidade do meio ambiente relativo aos outros fatores que compõe a utilidade das famílias; φ e ω são coeficientes de aversão ao risco; e, $H(L_t^T, L_t^{NT})$ é:

$$H(L_t^T, L_t^{NT}) = l \frac{(L_t^T)^{1-\psi^T}}{1-\psi^T} + l \frac{(L_t^{NT})^{1-\psi^{NT}}}{1-\psi^{NT}}$$

em que, L_t^T , L_t^{NT} são as ofertas de horas de trabalho que as famílias disponibilizam, respectivamente, para os setores de *tradable* e *nontradable*; enquanto que, l é o peso dado ao tempo de lazer na utilidade das famílias, considerando que as famílias são dotadas de uma unidade de tempo que pode ser usado para trabalho ou lazer. Enquanto que ψ^T , ψ^{NT} são as elasticidades Frisch da oferta de trabalho para os respectivos setores listados anteriormente.

Assim, a família representativa escolhe os níveis de consumo de bens finais não energéticos, energia, oferta de trabalho, endividamento e investimento em capital para maximizar (1) sujeito a

seguinte restrição orçamentária:

$$\begin{aligned}
C_t^T + P_t^{NT} C_t^{NT} + (1 - \vartheta_t^{ER}) P_t^{ER} E_t^{RC} + (1 + \tau_t^{ENR}) P_t^{ENR} E_t^{NRC} + \sum_j I_t^j + (1 + r_{t-1}^D) D_{t-1} \\
= D_t + \sum_i (w_t^i L_t^i) + \sum_j (r_t^j K_{t-1}^j) + P_t^O O_t^Y + P_t^N N_t^Y + T_t + \Pi_t
\end{aligned} \tag{2}$$

para $i = T, NT$, que são os setores *tradable* e *nontradable*; e $j = T, NT, H, S$, que além desses, inclui os setores de energia primária hidráulica e derivada da cana-de-açúcar, respectivamente.

As variáveis P_t^{NT} , P_t^{ER} e P_t^{ENR} representam, respectivamente, os preços reais dos bens *nontradables*, da energia renovável e da energia não renovável, considerando que os preços dos bens *tradables* são o numerário da economia. Por sua vez, 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^j é o montante de investimento em capital do setor j . Por sua vez, D_t é o nível de dívidas em títulos internacionais e r_{t-1}^D , é a taxa de juros enfrentada pela economia nos mercados financeiros internacionais, w_t^i é a renda proveniente do trabalho no setor i , K_{t-1}^j é o estoque de capital no fim do período $t-1$ no setor j , r_t^j são as rendas do capital para o setor j . Já, P_t^O e P_t^N são os preços do petróleo e do gás natural, enquanto que O_t^Y e N_t^Y são as dotações domésticas destas fontes energéticas. 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 acionistas.

A evolução do capital está sujeita a um custo de ajustamento quadrático, de acordo com:

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

Onde, δ é a taxa de depreciação do capital e Φ é um parâmetro de captura do custo de ajustamento.

Portanto, o problema das famílias consiste em maximizar a utilidade intertemporal descontada (1) sujeito à restrição orçamentária (2) e a lei de evolução do capital (3).

2.1.1 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 poluentes¹. 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 (Heutel, 2012) 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 no consumo das famílias (e_t^C) e na produção de bens finais não energéticos dos setores *tradable* (e_t^T) e *nontradable* (e_t^{NT}), como segue:

$$e_t = e_t^C + e_t^T + e_t^{NT}$$

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

$$e_t^C = (E_t^{NRC})^{1-\gamma^C} \tag{4}$$

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

¹Note que as firmas produtoras de bens finais e as famílias também podem utilizar energia renovável, que não gera emissões.

Pelo lado das firmas, o modelo captura a ideia de que as emissões são um subproduto da produção de bens que depende diretamente 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:

$$e_t^i = (1 - \mu_i) \left(\frac{E_t^{NRi}}{E_t^{NRi} + E_t^{Ri}} \right) (Y_t^i)^{1-\gamma^i} \quad (5)$$

Onde, μ_t^i é a fração que as firmas decidem reduzir das emissões, dados a política ambiental e o custo de abatimento; E_t^{Ri} e E_t^{NRi} são, respectivamente, a utilização de energia renovável e não renovável na produção de bens finais não energéticos (Y_t^i); e, $(1 - \gamma^i)$ é a elasticidade das emissões provenientes da produção de bens finais em relação ao produto. Em todos os casos o subscrito $i = T, NT$ define que a informação é válida para os setores *tradable* e *nontradable*.

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

$$X_t = \phi_x X_{t-1} + e_t + e_t^{row} \quad (6)$$

onde, ϕ_x mensura o grau de persistência da poluição e e_t^{row} denota as emissões do resto do mundo.

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:

$$Q_t = (1 - \phi_q) \bar{Q} + \phi_q Q_{t-1} - \gamma_x (\ln X_t - \ln X_{t-1}) \quad (7)$$

onde, \bar{Q} corresponde à qualidade do meio ambiente no estado estacionário; o parâmetro ϕ_q 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, γ_x denota a elasticidade da qualidade do meio ambiente com respeito ao crescimento do estoque de poluição.

2.2 Setor Energético

O setor energético é composto por quatro subsetores produtores de energia primária e duas refinarias que transformam essa energia primária em energia final. Uma das refinarias produz energia renovável, empacotando as energias primárias renováveis, que são a energia hidráulica e a energia derivada da cana-de-açúcar, enquanto que a segunda refinaria produz energia não renovável, utilizando para isso petróleo e gás natural, que podem ser comprados no mercado doméstico ou importadas de outros países.

2.2.1 Energia Primária

As produções de energia hidráulica (H_t) e de energia derivada da cana-de-açúcar (S_t) são realizadas apenas domesticamente, e, por simplificação, utilizam apenas capital como insumo. As funções de produção utilizadas são lineares e idênticas, como pode ser visto a seguir:

$$H_t = A_t^H K_{t-1}^H \quad (8)$$

$$S_t^Y = A_t^S K_{t-1}^S \quad (9)$$

Onde A_t^H e A_t^S representam choques estacionários de eficiência do capital.

Por outro lado, as produções domésticas do petróleo (O_t^Y) e do gás natural (N_t^Y) são dadas através de dotações pertencentes as famílias. Essas fontes energéticas podem ser utilizadas domesticamente nas refinarias de energia não renováveis ou podem ser exportadas para outros países. Além disso, quando as produções domésticas dessas fontes primárias não forem suficientes, as refinarias podem

importar tais fontes de outros países. Portanto, as balanças comerciais destas duas *commodities* energéticas são dadas por:

$$TB_t^O = P_t^O(O_t^Y - O_t^H) \quad (10)$$

$$TB_t^N = P_t^N(N_t^Y - N_t^H) \quad (11)$$

Onde, TB_t^O e TB_t^N são os resultados das balanças comerciais do petróleo e do gás natural, respectivamente; P_t^O e P_t^N são seu preços; e, O_t^H e N_t^H são as utilizações domésticas dessas fontes realizadas pelas refinarias de energia não renováveis.

2.2.2 Refinarias

As refinarias utilizam uma tecnologia de produção CES para mesclar as energia primárias com o objetivo de produzir as energia renováveis e não renováveis utilizadas pelas famílias e firmas de bens finais não energéticos. As refinarias que produzem energia renovável utilizam a energia hidráulica e a energia derivada da cana-de-açúcar como insumos de produção, como segue:

$$E_t^R = \left[(1 - s_H)(N_t)^{\frac{\theta_{ER}-1}{\theta_{ER}}} + s_H(H_t)^{\frac{\theta_{ER}-1}{\theta_{ER}}} \right]^{\frac{\theta_{ER}}{\theta_{ER}-1}} \quad (12)$$

onde, s_H e θ_{ER} correspondem, respectivamente, a parcela de energia hidráulica na produção de energia renovável e a elasticidade de substituição entre as energias primárias hidráulica e derivada da cana-de-açúcar.

Portanto, o problema das refinarias produtoras de energia renovável consiste em escolher os níveis de insumo (energias hidráulica e derivada da cana-de-açúcar), restritas pela função de produção, para maximizar a função de lucro, descrita a seguir:

$$\Pi_t^R = P_t^{ER} E_t^R - P_t^H H_t - P_t^S S_t \quad (13)$$

Onde, P_t^H e P_t^S são os preços das energias primárias hidráulica e derivada da cana-de-açúcar, respectivamente.

Por outro lado, as refinarias que produzem energia não renovável utilizam petróleo e gás natural:

$$E_t^{NR} = \left[(1 - s_O)(S_t)^{\frac{\theta_{ENR}-1}{\theta_{ENR}}} + s_O(O_t^H)^{\frac{\theta_{ENR}-1}{\theta_{ENR}}} \right]^{\frac{\theta_{ENR}}{\theta_{ENR}-1}} \quad (14)$$

onde, s_O é a parcela de petróleo na produção de energia renovável e θ_{ENR} é a elasticidade de substituição entre o petróleo e o gás natural.

Portanto, as refinarias produtoras de energia não renovável escolhem os níveis de petróleo e gás natural, restritas pela tecnologia de produção, para maximizar a seguinte função de lucro:

$$\Pi_t^{NR} = P_t^{ENR} E_t^{NR} - P_t^O O_t^H - P_t^N N_t^H \quad (15)$$

2.3 Setor de Bens Finais

O setor de bens finais é composto dois tipos de firmas: as firmas *tradables*, que produzem bens comercializáveis no mercado internacional e domesticamente; e, as firmas *nontradables*, que produzem apenas para o mercado doméstico. Em ambos os casos utilizam capital, trabalho e energia como insumos de produção.

Os bens finais *tradables* e *nontradables* são produzidos respeitando a seguinte tecnologia de produção Coob-Douglas, respectivamente:

$$Y_t^i = d(x_t)A_t^i(L_t^i)^{\alpha_{Li}}(E_t^{Ri})^{\alpha_{Ri}}(E_t^{NRi})^{\alpha_{NRi}}(K_{t-1}^i)^{\alpha_{Ki}} \quad (16)$$

para $i = T, NT$, setores *tradables* e *nontradables*, respectivamente. Logo, $d(x_t) = [1 - (d_2X_t^2 + d_1X_t + d_0)]$ representa a função quadrática de dano à produção proveniente da poluição; A_t^i representa a produtividade total dos fatores dos setores i ; enquanto que, α_{Li} , α_{Ri} , α_{NRi} e α_{Ki} são, respectivamente, os pesos do trabalho, da energia renovável, da energia não renovável e do capital na produção de bens finais nos setores i . A função de produção exibe retornos constantes a escala e, portanto, a soma dos pesos dos insumos é igual a 1.

O problema das firmas do setor de bens finais é um pouco mais complexo que o das firmas do setor energético, pois, além de escolherem os níveis dos insumos trabalho, energia renovável, energia não renovável e capital, dados os seus respectivos preços, devem decidir qual o nível de emissões que pretendem reduzir (μ_t^i), dados a política ambiental do governo e a seguinte função de custo de abatimento:

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

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.

Portanto, as firmas buscam definir o nível de redução das emissões e os níveis de cada um dos insumos que maximizam a seguinte função de lucro:

$$\Pi_t^i = Y_t^i - w_t^i L_t^i - r_t^i K_{t-1}^i - (1 - \vartheta_t^{ER}) P_t^{ER} E_t^{Ri} - (1 - \tau_t^{ENR}) P_t^{ENR} E_t^{NRi} - \tau_t^e e_t^i - AC_t^i \quad (18)$$

onde, w_t^i , r_t^i , P_t^{ER} e P_t^{ENR} são os preços dos insumos trabalho, capital, energia renovável e energia não renovável, respectivamente; e, ϑ_t^{ER} , τ_t^{ENR} e τ_t^e são as alíquotas da política ambiental do governo, respectivamente, subsídio sobre o preço da energia renovável, imposto sobre o preço da energia não renovável e imposto sobre as emissões.

2.4 Governo

O governo utiliza parte da sua receita para financiar seu fluxo exógeno de gastos $\{G_t\}_{t=0}^{\infty}$, parte para subsidiar o preço da energia renovável e o restante transfere de volta para as famílias. No nosso modelo, a receita tributária é proveniente dos impostos sobre emissões e sobre o preço da energia não renovável. Portanto, temos que a restrição orçamentária do governo é:

$$G_t + T_t + \vartheta_t^{ER} P_t^{ER} (E_t^{RC} + E_t^{RT} + E_t^{RNT}) = \tau_t^{ENR} P_t^{ENR} (E_t^{NRC} + E_t^{NRT} + E_t^{NRNT}) + \tau_t^e (e_t^T + e_t^{NT}) \quad (19)$$

2.5 Setor Externo

A estrutura da taxa de juros internacional segue o padrão desenvolvido por [Schmitt-Grohé & Uribe \(2003\)](#), que é amplamente utilizado na literatura:

$$r_t^D = r^* + \Omega [\exp^{(D_t - D_{ss})} - 1] \quad (20)$$

Onde, r^* denota a taxa de juros internacional livre de risco; Ω é um parâmetro que denota o componente doméstico do *spread* da taxa de juros enfrentada, relacionado com o grau de endividamento do país (D_t); e, D_{ss} corresponde ao nível de endividamento no estado estacionário. Enquanto que a balança de transações correntes é definida como:

$$TB_t - r_{t-1}^D = -(D_t - D_{t-1}) \quad (21)$$

onde, TB_t é balança comercial total do país, que no modelo consiste na soma das balanças comerciais do petróleo, do gás natural e dos bens finais *tradables*.

2.6 Processos Exógenos

O modelo contém choques exógenos de produtividade total dos fatores nas firmas dos setores *tradable* e *notradable*, dos setores produtores de energia primária hidráulica e derivada da cana-de-açúcar e nas refinarias de energia renovável e não renovável. Todas essas variáveis assumem a forma de um processo autorregressivo log-linear, como segue:

$$\ln A_t^n = \rho_{A(n)} \ln A_{t-1}^n + \varepsilon_t^n \quad (22)$$

para $n = T, NT, H, S, R, NR$. Onde, ε_t^n é um choque com distribuição idêntica e independente e com variância $\rho_{A(n)}$.

Além disso, são considerados processos exógenos as dotações e os preços do petróleo e do gás natural, as emissões do resto do mundo, as alíquotas da política ambiental e os gastos governamentais, que seguem, respectivamente, os seguintes processos autorregressivos log-linear:

$$\ln O_t^Y = (1 - \rho_{OY}) \ln O_{ss}^Y + \rho_{OY} \ln O_{t-1}^Y + \varepsilon_t^{OY} \quad (23)$$

$$\ln P_t^O = (1 - \rho_{PO}) \ln P_{ss}^O + \rho_{PO} \ln P_{t-1}^O + \varepsilon_t^{PO} \quad (24)$$

$$\ln N_t^Y = (1 - \rho_{NY}) \ln N_{ss}^Y + \rho_{NY} \ln N_{t-1}^Y + \varepsilon_t^{NY} \quad (25)$$

$$\ln P_t^N = (1 - \rho_{PN}) \ln P_{ss}^N + \rho_{PN} \ln P_{t-1}^N + \varepsilon_t^{PN} \quad (26)$$

$$\ln e_t^{row} = (1 - \rho_{erow}) \ln e_{ss}^{row} + \rho_{erow} \ln e_{t-1}^{row} + \varepsilon_t^{erow} \quad (27)$$

$$\ln \vartheta_t^{ER} = (1 - \rho_{\vartheta}) \ln \vartheta_{ss}^{ER} + \rho_{\vartheta} \ln \vartheta_{t-1}^{ER} + \varepsilon_t^{\vartheta} \quad (28)$$

$$\ln \tau_t^{ENR} = (1 - \rho_{\tau}) \ln \tau_{ss}^{ENR} + \rho_{\tau} \ln \tau_{t-1}^{ENR} + \varepsilon_t^{\tau} \quad (29)$$

$$\ln \tau_t^e = (1 - \rho_{\tau e}) \ln \tau_{ss}^e + \rho_{\tau e} \ln \tau_{t-1}^e + \varepsilon_t^{\tau e} \quad (30)$$

$$\ln G_t = (1 - \rho_G) \ln G_{ss} + \rho_G \ln G_{t-1} + \varepsilon_t^G \quad (31)$$

Onde, ε_t^m é um choque com distribuição idêntica e independente, com variância ρ_m , com $m = OY, PO, NY, PN, erow, \vartheta, \tau, \tau e, G$. Enquanto que o subscrito *ss* é utilizado para definir os respectivos valores das variáveis no estado estacionário.

2.7 Condições de Equilíbrio de Mercado

As condições de equilíbrio de mercado necessárias para o fechamento do modelo são:

- Setor *nontradable*:

$$Y_t^{NT} = C_t^{NT} \quad (32)$$

- Setor *tradable*:

$$Y_t^T = C_t^T + \sum_i I_t^i + G_t + TB_t^T \quad (33)$$

- Setor de energia renovável:

$$E_t^R = E_t^{RC} + E_t^{RT} + E_t^{RNT} \quad (34)$$

- Setor de energia não renovável:

$$E_t^{NR} = E_t^{NRC} + E_t^{NRT} + E_t^{NRNT} \quad (35)$$

- Setor externo:

$$TB_t = TB_t^T + TB_t^O + TB_t^S \quad (36)$$

3 Calibração

Para definir os parâmetro do modelo, nós utilizamos duas estratégias. Na primeira delas, adotamos valores usualmente utilizados na literatura relacionada. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 1. A segunda estratégia consiste em calibrar o modelo para que este fique em consonância com os dados da economia brasileira.

Tabela 1: Valores dos parâmetros calibrados com dados da literatura

Parâmetro	Valor	Definição	Fonte
φ	2	Coefficiente de aversão ao risco	Leal et al. (2015)
ω	2	Coefficiente de aversão ao risco (meio ambiente)	Angelopoulos et al. (2013)
q	0.4	Peso de Q na utilidade	Angelopoulos et al. (2013)
θ_z	0.4	Elast. de subst. entre energia e consumo	Tumen et al. (2016)
θ_c	0.5	Elast. de subst. entre tradables e nontradables	Akinci (2011)
θ_e	0.5	Elast. de subst. entre energia renovável e não renovável	Tumen et al. (2016)
δ	0.025	Taxa de depreciação do capital	Leal et al. (2015)
ϕ_x	0.9979	Grau de persistência da poluição	Leal et al. (2015)
ϕ_q	0.9	Grau de persistência da qualidade do meio ambiente	Angelopoulos et al. (2013)
\bar{Q}	1	Índice de qualidade do meio ambiente no estado estacionário	Angelopoulos et al. (2013)
θ_1	0.0418	Coefficiente da função de custo de mitigação	Leal et al. (2015)
θ_2	2.8	Expoente da função de custo de mitigação	Leal et al. (2015)
d_0	-2.97E-03	Intercepto da função de dano da poluição	Leal et al. (2015)
d_1	-2.16E-06	Coefficiente da função de dano da poluição	Leal et al. (2015)
d_2	9.26E-09	Coefficiente da função de dano da poluição	Leal et al. (2015)

No segundo caso, buscamos produzir momentos teóricos dos agregados do modelo que reproduzissem, tanto quanto possível, os momentos empíricos calculados dos dados agregados do Brasil. Buscamos calibrar as seguintes relações: o valor das energias primárias não renováveis produzidas domesticamente em relação ao PIB [$(P^O O^Y + P^N N^Y)/Y = 0.1556$], o valor das energias primárias renováveis em relação ao PIB [$(P^H H + P^S S)/Y = 0.1446$], a dependência externa do petróleo [$(O^H - O^Y)/O^H = -0.2204$], a dependência externa do gás natural [$(N^H - N^Y)/N^H = 0.3478$] e o valor da energia não renovável na produção total do setor energético [$(P^H H + P^S S)/(P^H H + P^S S + P^O O^H + P^N O^N) = 0.4465$].

Além disso, calibramos as elasticidades de Frish e o peso do trabalho na função utilidade buscando proporcionar valores compatíveis com as ofertas de trabalho do Brasil. Buscamos atingir $L^i \simeq 0.34$ que corresponde a aproximadamente 40 horas semanais.

Utilizamos os dados da Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) para definir os valores das proporções de gastos com bens finais (s_C) e gastos com energia renovável (s_R); e, os dados do Banco Mundial (*World Development Report* de 1991) para definir as proporções de gastos com *tradables* (s_T).

Como não encontramos dados para as elasticidade de substituição entre as fontes primárias de energia (θ_{ER} e θ_{ENR}) utilizamos o valor de θ_e encontrado em Tumen et al. (2016).

Utilizamos os dados das Contas Nacionais do Brasil para calibrar os valores dos pesos do trabalho (α_L), da energia renovável (α_R) e da energia não renovável (α_{NR}) na produção de bens finais nos setores *tradable* e *nontradable*.

Nós calibramos a taxa de juros enfrentada pelo país com relação a dívida externa (r_{ss}^D) em 3.78%, de acordo com os dados do Banco Mundial e, utilizamos esse valor, para calibrar o desconto das famílias ($\beta = 1/(1 + r_{ss}^D)$). Também utilizamos essa fonte para calibrar o valor da dívida externa no

estado estacionário (D_{ss}), onde buscamos atingir a proporção da dívida externa com relação ao PIB em torno de 1,5%.

Por sua vez, o valor utilizado das elasticidades das emissões do setor de bens finais em relação ao produto foi calculado através de uma regressão linear das emissões de CO_2 com relação ao PIB do Brasil. Por fim, o valor do parâmetro G_{ss} buscou refletir que no Brasil cerca de 15% do PIB vem dos gastos governamentais.

A tabela 2 apresenta todas as variáveis que não foram calibradas utilizando os dados da literatura.

Tabela 2: Valores dos parâmetros calibrados em consonância com os dados do Brasil

Parâmetro	Definição	Valor
β	Fator de desconto subjetivo das famílias	0.9636
ψ^i	Elasticidades Frisch	2
l	Peso de L^T e L^{NT} na utilidade	2.5
s_C	Gastos com bens finais na cesta de consumo	0.9
s_T	Gastos com tradables na cesta de bens finais	0.4
s_R	Gastos com energia renovável na cesta de energia	0.5
s_H	Uso de energia hidráulica na refinaria renovável	0.6
s_O	Uso de petróleo na refinaria não renovável	0.85
θ_{ER}	Elast. de subst. entre energia hidráulica e derivada da cana	0.5
θ_{ENR}	Elast. de subst. entre petróleo e gás natural	0.5
Φ	Parâmetro do custo de ajustamento do investimento	4
α_{Li}	Part. do trabalho na produção de bens finais	0.5
α_{Ri}	Part. da energia renovável na produção de bens finais	0.0522
α_{NRi}	Part. da energia não renovável na produção de bens finais	0.0678
γ_x	Elasticidade da qual. do meio ambiente em relação ao estoque de poluição	1
γ^i	Elasticidade das emissões do setor de bens finais em relação ao produto	-0.023
γ^C	Elasticidade das emissões das famílias em relação a energia não renovável	0
D_{ss}	Nível de endividamento no estado estacionário	0.238
r_{ss}^D	Taxa de juros internacional	0.0378
Ω	Parâmetro do componente doméstico do spread da taxa de juros	1
O_{ss}^Y	Dotação de petróleo no estado estacionário	0.235
P_{ss}^O	Preço do petróleo no mercado internacional	0.5
N_{ss}^Y	Dotação do gás natural no estado estacionário	0.04
P_{ss}^N	Preço do gás natural no mercado internacional	0.77
c_{ss}^{row}	Emissões do resto do mundo no estado estacionário	12.0529
G_{ss}	Gastos do governo no estado estacionário	0.12
ρ	Persistência dos choques	0.95
ϑ_{ss}^{ER}	Alíquota do subsídio sobre o preço da energia renovável	0.00593
τ_{ss}^{ENR}	Alíquota do imposto sobre o preço da energia não renovável	0.02754
τ_{ss}^e	Alíquota do imposto sobre emissões	0.00535

4 Resultados

Nesta seção, nós analisamos como as principais variáveis agregadas do modelo respondem aos diferentes tipos de choques nas fontes energéticas, utilizando funções de resposta ao impulso.

Inicialmente, nós seguimos a literatura que trata dos choques energéticos e simulamos três tipos de choques que afetam os preços das fontes energéticas do modelo, são eles: 1) choques negativos na oferta energética; 2) choques na demanda por energia; e, 3) choques específicos nos preços internacionais das fontes energéticas comercializáveis no exterior. Buscamos compreender quais os efeitos desses choques nos agregados macroeconômicos, no setor energético e no setor externo da economia. Além disso, analisamos os impactos econômicos e ambientais de choques exógenos nas alíquotas da política ambiental e nas emissões do resto do mundo.

4.1 Choques negativos na oferta energética

Os choques negativos na oferta energética são caracterizados por algum tipo de crise no fornecimento de energia, fazendo com que o preço da energia aumente. No nosso caso, simulamos três tipos diferentes de redução na oferta energética, são eles: 1) choques negativos na produtividade dos setores de energia primária renovável; 2) choques negativos na dotação das energias primárias não renováveis; e, 3) choques negativos na produtividade das refinarias.

4.1.1 Setor de energia primária renovável

Nesta seção, analisamos os impactos econômicos de choques negativos nas produtividades das firmas produtoras de energia hidráulica e derivada da cana-de-açúcar. Para facilitar a análise, calibramos os choques para provocar um aumento de 10% nos preços das respectivas fontes energéticas. Na Figura 1 apresentamos as respostas do choque de produtividade das firmas produtoras de energia hidráulica pelas linhas sólidas pretas e do choque de produtividade das firmas produtoras de energia derivada da cana-de-açúcar pelas linhas tracejadas em azul.

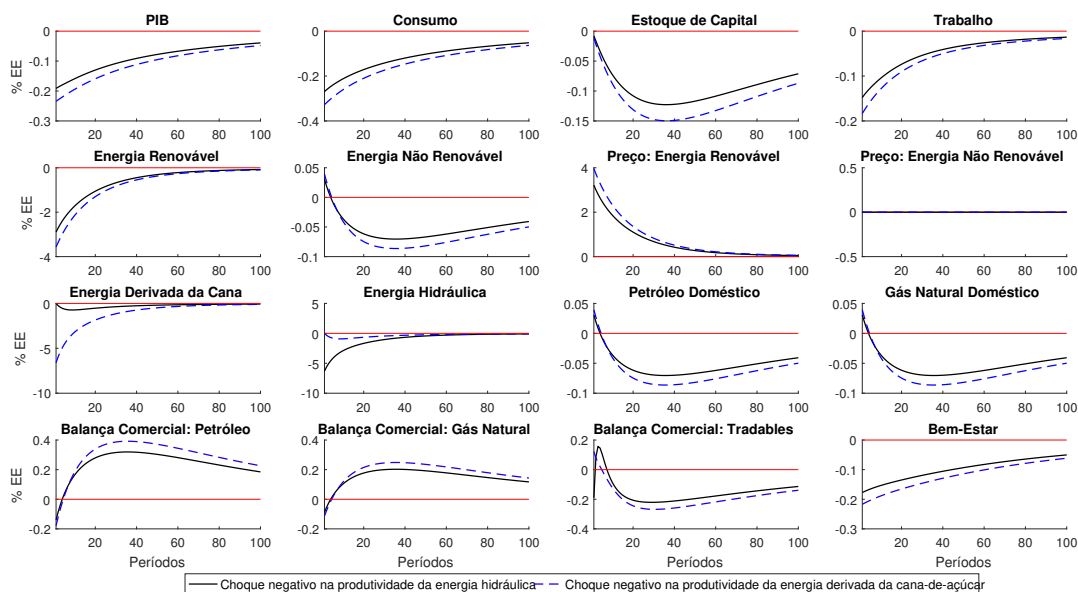
Observamos que, independente da fonte energética impulsionada, as respostas seguem sempre a mesma direção, uma vez que as firmas do setor de energia primária renovável são modeladas com equações similares. Assim, a diferença na magnitude dos efeitos é proveniente apenas do tamanho do setor na economia.

Como as energias primárias não tem ligação com o comércio internacional, um choque de oferta negativo, que gerem aumento nos seus preços, produzem um aumento no custo da produção das refinarias e, conseqüentemente, da energia final e dos bens finais da economia, na medida em que as energias hidráulica e derivada da cana-de-açúcar são produzidas apenas domesticamente.

Mais especificamente, percebemos na Figura 1 que um aumento de 10% nos preços das energias primárias renováveis, geraram um efeito recessivo que fez com que o PIB reduzisse em torno de 0.2%, além de reduzirem os níveis de consumo, estoque de capital e oferta de trabalho.

Além disso, percebemos que, para se obter um aumento de 10% nos preços dessas fontes energéticas, foi necessário reduzir a oferta energética, da respectiva fonte, em cerca de 5%, o que explicita a característica inelasticidade do setor energético. No modelo de [Huynh \(2016\)](#), que é desenhado com apenas um tipo de firma produtora de energia, um choque de oferta negativo, que aumenta o preço da energia em 10%, gera uma queda de aproximadamente 1% no PIB e uma redução na oferta energética de aproximadamente 0.9%.

Figura 1: IRFs dos choques negativos na oferta de energia primária renovável



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque negativo na produtividade das firmas produtoras de energia hidráulica (linhas sólidas pretas) e a um choque negativo na produtividade das firmas produtoras de energia derivada da cana-de-açúcar (linhas tracejadas em azul). Os choques são calibrados para provocar um aumento de 10% nos preços das respectivas fontes energéticas. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

A diferença na magnitude dos resultados pode ser explicado pelo fato de estarmos utilizando um modelo com um setor energético diversificado, existindo a possibilidade de substituição da fonte energética utilizada pelos agentes na economia. Assim, o nosso modelo permite que, mesmo com uma redução maior na oferta energética afetada pelo aumento de preços, a instabilidade causada

na economia seja menor quando comparada aos resultados de um modelo com apenas uma fonte energética como o de Huynh (2016).

Podemos verificar o fato anterior, ao observarmos que a utilização doméstica de petróleo e gás natural aumenta no momento do choque (substituição da fonte energética), mesmo que posteriormente o efeito recessivo na economia faça com que esse uso caia. Além disso, verificamos que, como os preços das fontes primárias não renováveis são exógenas e não são impactadas pelo choque, uma maior utilização destes tipos de energia tem que ser abastecida pelo mercado externo. Assim, no primeiro momento, o aumento da utilização doméstica induz a importação de mais petróleo e gás natural e, posteriormente, quando o uso é reduzido a valores inferiores ao estado estacionário, o petróleo e o gás natural produzidos domesticamente, que são dotações fixas, passam a ser exportados para outros países, como pode ser visto na última linha de gráficos da Figura 1.

Também observamos que a compensação dessa movimentação de moeda estrangeira é realizada pela variação na balança comercial dos bens finais *tradables* que se movem em sentido contrário ao das balanças comerciais das duas fontes energéticas comercializáveis no mercado internacional, ou seja, a maior (menor) renda gerada pelas exportações (importações) energéticas tendem a aumentar (diminuem) as importações (exportações) de bens finais.

Por fim, percebemos que o efeito recessivo em conjunto com uma maior degradação ambiental causada por uma maior utilização de energia não renovável, como será visto posteriormente, faz com que o nível bem-estar dos agentes seja reduzido.

4.1.2 Setor de energia primária não renovável

Neste ponto, analisamos os impactos econômicos de choques negativos nas dotações de petróleo e gás natural. Como consideramos que os choques domésticos do Brasil não possuem magnitude suficiente para influenciar os preços das fontes energéticas comercializadas no mercado internacional, desenhamos o modelo para que estes choques não afetem os preços destas fontes. Assim, calibramos os choques para provocar uma queda de 10% nas dotações das respectivas fontes energéticas, não impactando os preços da energia não renovável. Na Figura 2 apresentamos as respostas dos choques na dotação de petróleo pelas linhas sólidas pretas e na dotação de gás natural pelas linhas tracejadas em azul.

Percebe-se na Figura 2, que assim como no caso anterior, a diferença na magnitude dos efeitos dos choques é proveniente apenas do tamanho do setor na economia. Portanto, podemos tratar o choque de forma genérica.

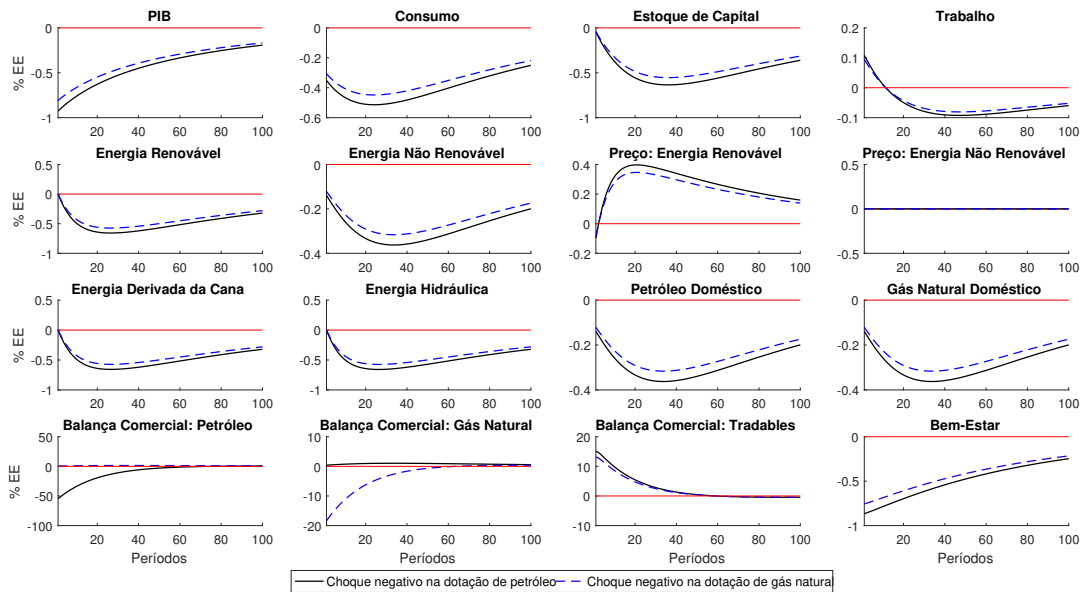
Assim, a primeira coisa que chama a atenção é o fato desse choque produzir efeitos bastante similares, no que diz respeito a direção, aos choques produzidos anteriormente. Entretanto, existem algumas diferenças a serem consideradas, principalmente no que diz respeito aos canais de transmissão, uma vez que o setor de energia primária não renovável não usa o canal discutido anteriormente para transmitir o impacto e sim o canal do setor externo.

Portanto, diferentemente do caso anterior, um choque negativo na oferta (queda nas dotações) das energias primárias não renováveis não gera um aumento imediato no custo de produção das refinarias, pois o choque não afeta os preços dessas fontes energéticas (são dados exogenamente). Assim, a demanda por esse tipo de energia é sustentada, mas a parcela da energia doméstica que sofreu a queda tem que ser substituída por energia importada de outros países, gerando uma queda na balança comercial da energia.

Portanto, o canal de transmissão do choque que faz com que a economia entre em recessão provém do fato que a maior importação de energia reduz o poder aquisitivo das famílias, uma vez que a renda está sendo transferida para o exterior.

Portanto, os agentes passam a consumir e investir menos e trabalhar mais para compensar a redução do poder aquisitivo. A redução da renda das famílias funciona como uma espécie de choque desfavorável de demanda, desestimulando a produção e, por conseguinte, a utilização dos insumos.

Figura 2: IRFs dos choques negativos na oferta doméstica de energia primária não renovável



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque negativo na dotação de petróleo (linhas sólidas pretas) e a um choque negativo na dotação de gás natural (linhas tracejadas em azul). Os choques são calibrados para provocar uma queda de 10% nas dotações das respectivas fontes energéticas. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

Assim, toda a cadeia energética da economia é afetada.

4.1.3 Refinarias

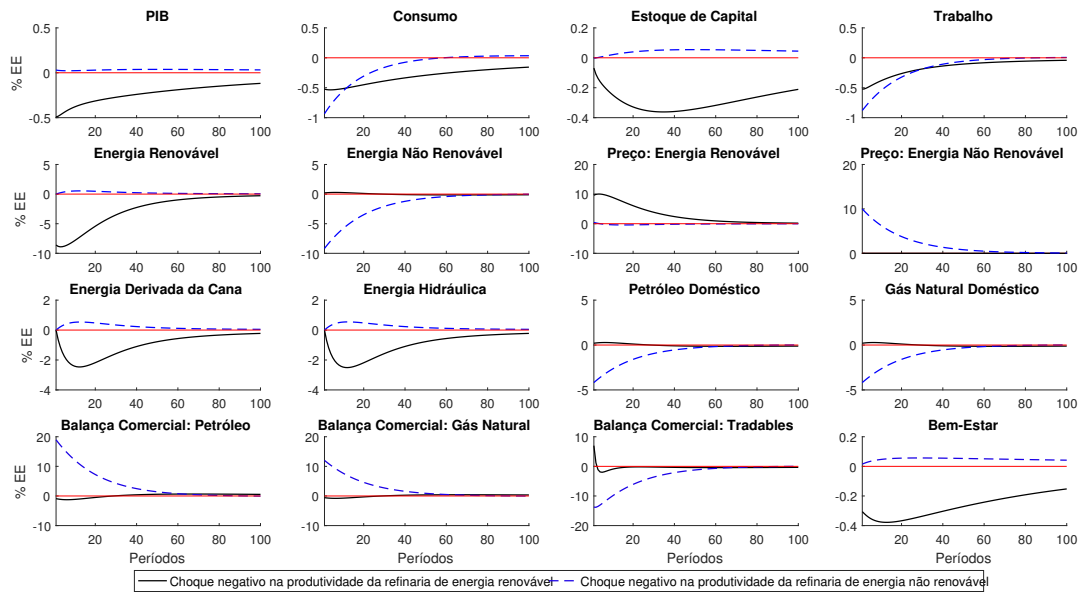
Por fim, o último conjunto de choques negativos de oferta analisados aqui serão os choques negativos nas produtividades das refinarias de energia renovável e não renovável. Como no primeiro caso, calibramos os choques para provocar um aumento de 10% nos preços da energia final impulsionada pelo choque. Na Figura 3 apresentamos as respostas do choque de produtividade das refinarias produtoras de energia renovável pelas linhas sólidas pretas e os choque de produtividade das refinarias produtoras de energia não renovável pelas linhas tracejadas em azul.

No caso dos choques nos preços da energia renovável, observamos que o canal de transmissão é muito semelhante ao do primeiro caso (choque na produtividade das fontes renováveis). O aumento dos preços da energia renovável gera um aumento nos custos de produção para as firmas de bens finais que usam essa energia como insumo de produção. Com isso, os bens finais ficam mais caros e seu consumo é reduzido. Além disso, caem os níveis de estoque de capital e de oferta de trabalho, já que a produção é diminuída.

Entretanto, é importante notar que os atores escolhem substituir uma parcela da energia renovável por mais energia não renovável, já que seus preços relativos se tornam mais atrativos. Contudo, como a produção doméstica de energia primária não renovável é exógena, essa aumento é realizado pelo aumento das importações de energia, gerando uma queda na renda das famílias e intensificando ainda mais a recessão da economia.

Por outro lado, os choques nos preços da energia não renovável possui uma estrutura de transmissão um pouco diferente das explicadas anteriormente. Percebemos que o aumento inicial nos preços da energia final não renovável gera um aumento nos custos de produção e, conseqüentemente, uma redução no consumo, como visto antes. Entretanto, percebemos que, como os preços da energia renovável reagem a esse fato, a substituição para a fonte energética renovável é muito mais intensa (além de existir uma estrutura de política ambiental que estimula a utilização das fontes renováveis), existindo um estímulo no investimento desse setor que é o responsável pelo aumento no estoque de capital agregado da economia.

Figura 3: IRFs dos choques negativos na oferta de energia final



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque negativo na produtividade das refinarias de energia renovável (linhas sólidas pretas) e a um choque negativo na produtividade das refinarias de energia não renovável (linhas tracejadas em azul). Os choques são calibrados para provocar um aumento de 10% nos preços das energias finais produzidas pelas respectivas refinarias. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

Pelo lado do setor externo, percebemos que o desestímulo à produção de energia não renovável reduz a utilização dos seus insumos (petróleo e gás natural), fazendo com que a energia primária produzida domesticamente tenha que ser exportada. O que, por sua vez, faz com que a renda das famílias aumente. Mas como o aumento da renda proveniente das exportações induz uma maior importação de bens finais a variação do PIB é bastante reduzida.

4.2 Choques domésticos de demanda por energia

Nesta seção, analisamos os impactos econômicos de choques domésticos de demanda. Neste caso, o choque atua como uma força econômica positiva inesperada, gerando um estímulo na produção doméstica. Isto pode compensar os efeitos negativos do aumento dos preços da energia. Para simular esta situação, utilizamos choques de produtividade nos setores não energéticos (*tradable* e *nontradable*). Como os preços das fontes não renováveis são exógenos, nós calibramos os choques para provocar um aumento de 10% nos preços das energia final renovável. Na Figura 4 apresentamos as respostas aos choques na produtividade do setor *tradable* pelas linhas sólidas pretas e do setor *nontradable* pelas linhas tracejadas em azul.

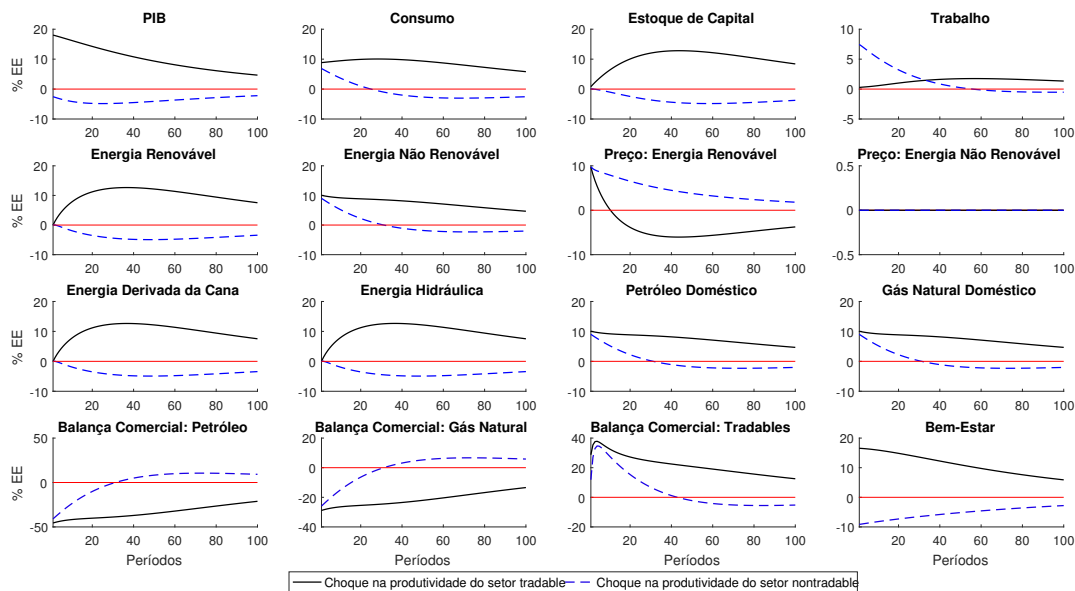
No primeiro caso, o choque na produtividade do setor *tradable*, faz com que os bens finais *tradables* se tornem relativamente mais baratos, estimulando o consumo, a produção e, conseqüentemente, um maior uso de insumos energéticos. Além disso, como o custo de produção dos *tradables* ficou mais barato também existe estímulo para as exportações. Por outro lado, percebemos que o estímulo positivo afetou toda a cadeia energética, fazendo com que o uso de todas as fontes aumentem. Entretanto, como os preços e as dotações da energia não renovável são exógenos, o aumento da utilização dessa fonte energética aumenta as importações de energia. Porém, como o efeito das exportações de bens finais é superior ao efeito das importações energéticas, as famílias tem sua renda aumentada estimulando ainda mais a produção.

Por outro lado, o choque na produtividade do setor *nontradable* ao gerar uma queda nos preços relativos dos bens finais *nontradables*, estimula o consumo por esses bens, fazendo com que a produção desse setor suba. Entretanto, a queda nos preços relativos dos bens *nontradables* significam também um aumento relativo nos preços dos bens finais *tradables*, desestimulando o consumo e reduzindo a

produção nesse setor.

O aumento na produção dos bens finais *nontradables* gera uma realocação das energia utilizadas e, como o preço da energia renovável sobe e o preço da energia não renovável permanece constante (já que é exógena), a utilização de fontes renováveis são reduzidas enquanto que a de fontes não renováveis sofrem um aumento. Como as dotações são exógenas, esse aumento tem que vir pelo setor externo.

Figura 4: IRFs dos choques domésticos de demanda por energia



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque na produtividade do setor *tradable* (linhas sólidas pretas) e a um choque na produtividade do setor *nontradable* (linhas tracejadas em azul). Os choques são calibrados para provocar um aumento de 10% nos preços das energia final renovável. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

Logo, o aumento das importações de energia gera uma queda na renda das famílias aprofundando a queda no consumo e aumentando a oferta de trabalho (efeito renda maior que efeito substituição). Por fim, como o preço relativo dos bens finais *tradables* são aumentados temos um estímulo para que as firmas desse setor elevem as exportações.

4.3 Choques nos preços internacionais da energia

Nesta subseção, analisamos choques exógenos nos preços internacionais da energia. Para complementar a análise e poder comparar nossos resultados com os resultados de estudos anteriores, introduzimos as respostas geradas por um modelo mais restrito, onde o setor energético diversificado foi substituído por um setor que contém uma única fonte energética (que normalmente é representada pelo petróleo), mas todas as outras estruturas se mantiveram inalteradas. Para manter o poder de comparação das magnitudes dos resultados, calibramos os choques para provocar um aumento de 10% nos preços internacionais da energia. Na Figura 5 apresentamos as respostas do choque no preço internacional do petróleo pelas linhas sólidas pretas, choque no preço internacional do gás natural pelas linhas tracejadas em azul e choque no preço internacional do petróleo no modelo restrito pelas linhas pontilhadas em laranja.

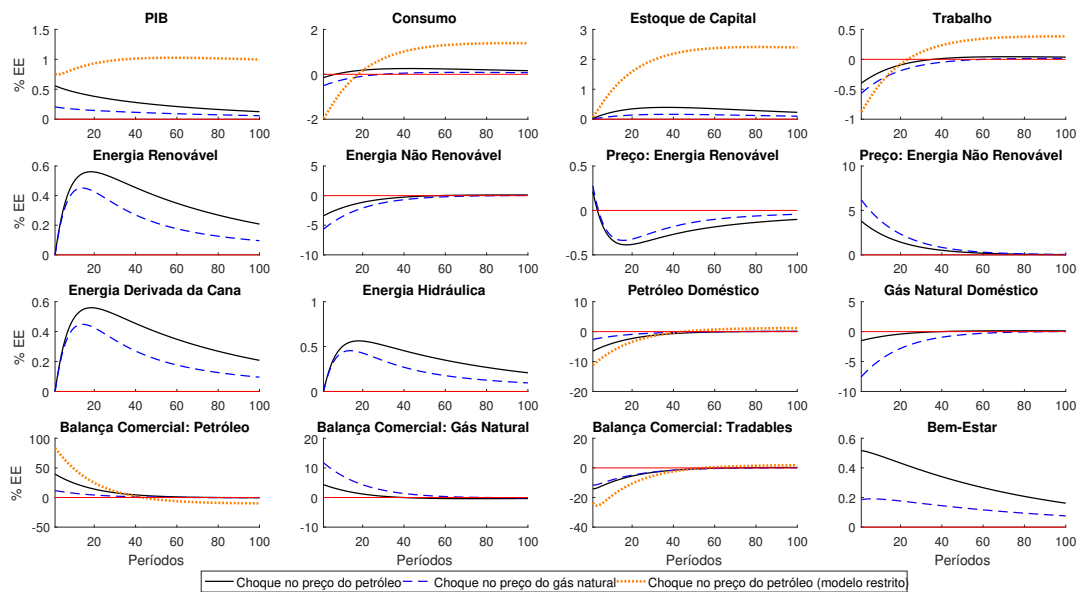
Percebe-se na Figura 5, que os efeitos dos choques no preço do petróleo e do gás natural (no caso do modelo completo) tem a mesma direção dos efeitos retratados pelo choque no modelo restrito. Entretanto, percebemos que o modelo restrito provoca uma maior variabilidade nas respostas ao choque.

Além disso, percebemos que os choques nos preços internacionais da energia, são transmitidos por um canal bastante semelhante ao caso do choque de produtividade na refinaria produtora de

energia não renovável. Mas, existem algumas diferenças que merecem ser observadas.

Os choques nos preços internacionais da energia gera um aumento nos custos de produção das refinarias e, conseqüentemente, um aumento no custo da produção de bens finais, gerando uma redução no consumo. Porém, como os preços da energia renovável ficam relativamente mais baratos, existe uma substituição das fontes energéticas não renováveis para as fonte energéticas renováveis, existindo um estímulo no investimento desse setor que é o responsável pelo aumento no estoque de capital agregado da economia.

Figura 5: IRFs dos choques nos preços internacionais de energia



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque no preço internacional do petróleo (linhas sólidas pretas), a um choque no preço internacional do gás natural (linhas tracejadas em azul), ambos no modelo completo, e a um choque no preço internacional do petróleo no modelo restrito (linhas pontilhadas em laranja). Os choques são calibrados para provocar um aumento de 10% nos preços de cada uma das energias citadas. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

Pelo lado do setor externo, a queda no uso das fontes de energia não renovável é compensada com o aumento das exportações a preços mais altos, fazendo com que a renda das famílias aumente. Mas, neste caso o aumento da renda proveniente das exportações é mais intenso que o aumento das importação de bens finais, fazendo com que a variação positiva do PIB seja maior que no caso do choque nas refinarias.

4.4 Meio Ambiente

Nesta seção, analisaremos quais os impactos econômicos e ambientais de choques nas alíquotas da política ambiental e quais os impactos domésticos em um choque nas emissões do resto do mundo.

4.4.1 Choques na política ambiental

Por sua vez, nesta subseção, analisamos os choques nas três alíquotas da política ambiental do governo. Neste caso, calibramos os choques para provocar uma queda de 1% nas emissões domésticas. Na Figura 6, apresentamos as respostas ao choque na alíquota do imposto sobre essas emissões pelas linhas sólidas pretas, ao choque na alíquota do imposto sobre o preço da energia não renovável pelas linhas tracejadas em azul e na alíquota do subsídio sobre o preço da energia renovável pelas linhas pontilhadas em laranja.

Os resultados encontrados aqui são bastante interessantes, pois mostram que do ponto de vista ambiental o imposto sobre emissões atinge os melhores resultados no que diz respeito à queda no

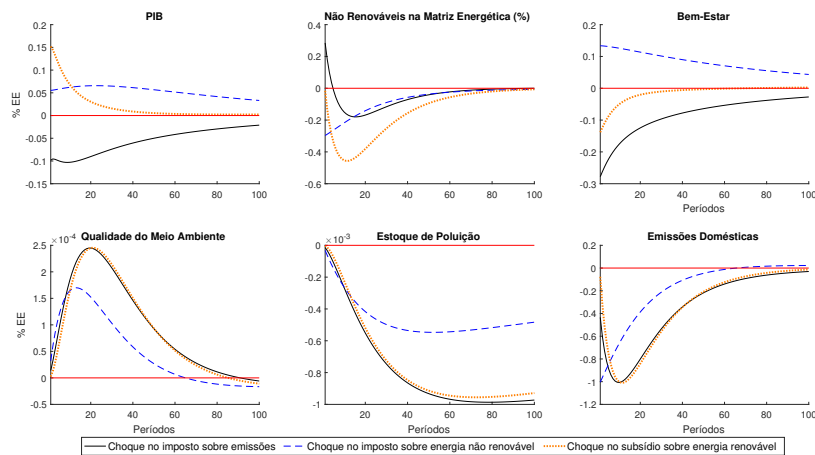
estoque de poluição e na melhora da qualidade do meio ambiente, mesmo sem reduzir a proporção de energia não renovável na matriz ambiental no curto prazo. Entretanto, os impactos na economia e no bem-estar das famílias são relativamente inferiores aos conseguidos quando os choques vem das alíquotas de política ambiental ligadas ao setor energético.

Percebemos que os resultados ambientais gerados por um choque na alíquota do subsídio sobre os preços da energia renovável são bastante próximos dos resultados obtido pelo choque do imposto sobre emissões. Porém, do ponto de vista econômico observamos que este choque gera um aumento de 0.15% do PIB e é neste caso que se observa a maior redução na proporção de energia não renovável. Além disso, percebemos que existe uma queda no nível de bem-estar social, mas o resultado relativo a essa variável é melhor que o gerado pelo choque no imposto sobre emissões.

Por fim, percebemos que o choque no imposto sobre o preço da energia não renovável tem resultados inferiores aos atingidos pelos gerados nos choques discutidos anteriormente na perspectiva ambiental, além de não gerar um crescimento tão grande do PIB quanto o conseguido pelo choque no subsídio sobre o preço da energia renovável. Porém, este foi o único choque que conseguiu gerar resultados positivos na variação do bem-estar.

Além disso, é importante notar que os choques nas alíquotas de impostos/subsídios vinculados aos preços do setor energético induzem uma substituição mais profunda das fontes energéticas na direção de uma matriz mais limpa, não exigindo uma queda tão acentuada da produção como ocorre no caso do imposto sobre emissões.

Figura 6: IRFs dos choques nas alíquotas da política ambiental



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque na alíquota do imposto sobre essas emissões (linhas sólidas pretas), a um choque na alíquota do imposto sobre o preço da energia não renovável (linhas tracejadas em azul) e a um choque na alíquota do subsídio sobre o preço da energia renovável (linhas pontilhadas em laranja). Os choques são calibrados para provocar uma queda de 1% nas emissões domésticas. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

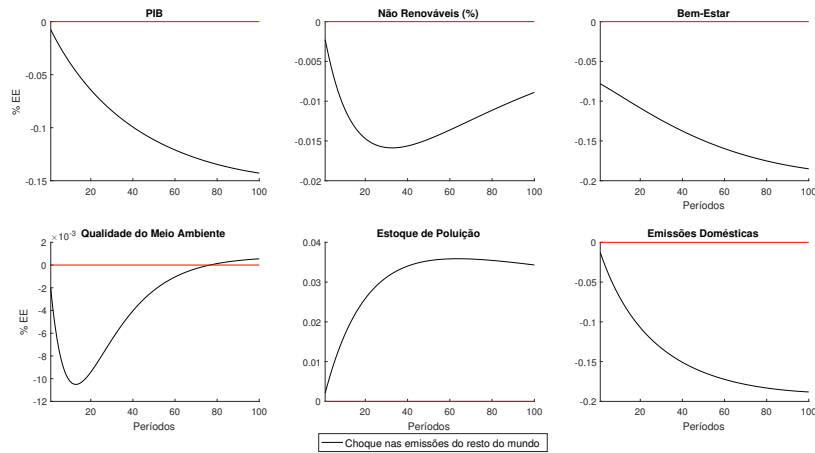
Portanto, os resultados mostram que cada uma das ferramentas de política ambiental possuem seus benefícios e fragilidades. Mas, se usadas em conjunto podem trazer resultados interessantes para a economia e para a redução dos problemas ambientais.

4.4.2 Choque nas emissões do resto do mundo

Por fim, analisamos o choque nas emissões do resto do mundo. Neste caso, calibramos os choques para provocar um queda de 1% nas emissões do resto do mundo.

Na Figura 7, mostramos que um choque nas emissões do resto do mundo ao aumentar o estoque de poluição e reduzir a qualidade do meio ambiente, faz com que o PIB e o bem-estar social sejam reduzidos e que os atores substituam a energia não renovável por energia renovável, reduzindo assim as emissões domésticas e amenizando o efeito do aumento da emissão internacional.

Figura 7: IRF do choque nas emissões do resto do mundo



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque nas emissões do resto do mundo (linhas sólidas pretas). O choque é calibrado para provocar uma queda de 1% nas emissões do resto do mundo. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

Esse resultado é importante pois o Brasil responde por apenas 1.55% das emissões internacionais e pode ter sua qualidade ambiental fortemente afetada pelas nações vizinhas. Com a solicitação de saída dos Estados Unidos do Acordo de Paris, muitos países podem se sentir compelidos a também não respeitarem o acordo e com isso podemos ter uma volta do aumento dos níveis de emissões internacionais.

5 Conclusão

Discutimos os impactos econômicos e ambientais de choques nos preços de diferentes fontes energéticas, além de analisar qual o impacto de choques nas alíquotas da política ambiental e nas emissões do resto do mundo. Particularmente, calibramos um modelo E-DSGE de economia aberta e com um setor energético diversificado com os dados da economia brasileira.

Os resultados mostram que existem dois canais de transmissão básicos nos choques negativos de oferta: o primeiro deles acontece quando são os preços das fontes renováveis que sofrem o impacto do choque, gerando aumento nos custos de produção; e, o segundo está vinculado aos choques nos preços das energias não renováveis, onde a transmissão se dá através de uma variação na renda das famílias.

No caso dos choques de demanda as respostas são influenciadas diretamente pela relação do setor produtor de bens finais com o comércio internacional. No caso dos choques de produtividade das firmas do setor *tradable* foram observados resultados positivos na variação do consumo agregado, do estoque de capital agregado e do PIB. Por outro lado, quando o choque é proveniente do setor *nontradable*, os resultados são contrários.

Além disso, os resultados são capazes de demonstrar que as respostas econômicas do modelo com o setor energético diversificado são menos voláteis do que no caso em que o modelo é desenhado com um setor energético que contém apenas uma fonte de energia. Isso acontece basicamente porque, no caso do modelo com setor energético diversificado, os choques nos preços de uma das fontes energéticas são parcialmente compensados por um processo de substituição energética.

Com relação aos choques nas alíquotas da política ambiental, os resultados indicam que a utilização conjunta dos mecanismos de política fiscal ambiental podem trazer efeitos econômicos e ambientais mais positivos do que se eles forem utilizados individualmente. Por fim, os choques nas emissões do resto do mundo reduzem o PIB, o bem-estar social e as emissões domésticas (atores substituem a energia não renovável por energia renovável).

O nosso estudo contribui com a literatura ao desenhar um modelo E-DSGE de economia aberta e

com um setor energético diversificado para discutir os impactos econômicos e ambientais dos choques dos preços energéticos. Mostramos que os canais de transmissão discutidos em Kilian (2014) são adequados tanto para o petróleo como para as outras fontes energéticas. Por fim, o modelo foi capaz de indicar que uma política ambiental mais abrangente, que contemple outras ferramentas além da alíquota sobre as emissões, podem trazer resultados econômicos e ambientais mais satisfatórios.

Referências

- Akinci, O. (2011). A note on the estimation of the atemporal elasticity of substitution between tradable and nontradable goods. *Manuscript, Columbia University*.
- 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.
- Argentiero, A., Bollino, C., Micheli, S., & Zopounidis, C. (2018). Renewable energy sources policies in a bayesian dsge model. *Renewable Energy*, 120, 60–68.
- 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.
- Bodenstein, M., Guerrieri, L., & Kilian, L. (2012). Monetary policy responses to oil price fluctuations. *International Monetary Fund Economic Review*, 60, 470–504.
- Cunado, J., Jo, S., & Gracia, F. P. (2015). Macroeconomic impacts of oil price shocks in asian economies. *Energy Policy*, 86, 867–879.
- Forni, L., Gerali, A., Notarpietro, A., & Pisani, M. (2015). Euro area, oil and global shocks: An empirical model-based analysis. *Journal of Macroeconomics*, 46, 295–314.
- Heutel, G. (2012). How should environmental policy respond to business cycle? optimal policy under persistent productivity shocks. *Review of Economic Dynamics*, 15, 244–264.
- Huynh, B. T. (2016). macroeconomic effects of energy price shocks on the business cycle. *Macroeconomic Dynamics*, 20, 623–642.
- Kilian, L. (2014). Oil price shocks: Causes and consequences. *Annual Review of Resource Economics*, 6(1), 133–158.
- Kilian, L. & Murphy, D. P. (2012). Why agnostic sign restrictions are not enough: Understanding the dynamics of oil market var models. *Journal of the European Economic Association*, 10(5), 1166–1188.
- 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.
- Medina, J. P. & Soto, C. (2005). Oil shocks and monetary policy in an estimated dsge model for a small open economy. *Working Paper. Central Bank of Chile*, 353.
- 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.
- Peersman, G. & Robays, I. V. (2012). Cross-country differences in the effects of oil shocks. *Energy Economics*, 34, 1532–1547.
- Schmitt-Grohé, S. & Uribe, M. (2003). Closing small open economy models. *NBER Working Paper Series*, 9270, 1–21.
- Tumen, S., Unalmis, D., Unalmis, I., & Unsal, D. (2016). Taxing fossil fuels under speculative storage. *Energy Economics*, 53, 64–75.