

## DESEMPENHO DAS ECONOMIAS DESENVOLVIDAS E EM DESENVOLVIMENTO SOBRE O EFEITO DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS

### Performance of developed and in development economies on the effect of climate policy

#### Geovânia Silva de Sousa

Economista. Doutora em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa - UFV. Campus Soane Nazaré de Andrade, Rodovia Jorge Amado, km 16, Bairro Salobrinho CEP 45662-900. Ilhéus-Bahia. gsilvadsousa@gmail.com.

#### Elaine Aparecida Fernandes

Economista. Doutora em Economia Aplicada - UFV. Av. Purdue, s/nº, Campus Universitário, CEP 36571.900. Viçosa, MG. eafernandes@ufv.br.

#### Evaldo Henrique da Silva

Economista. Doutor em Economia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. ehsilva@ufv.br.

#### Lucas Vitor de Carvalho Sousa

Economista. Doutor em Economia pela Universidade de Brasília (UnB). Av. Gen. Rodrigo Octávio, 6200, Coroado I, Setor Norte, Campus Universitário, Faculdade de Estudos Sociais (FES), CEP 69080-900. Manaus, AM. lucasvitor.cs@gmail.com

#### Marília Fernandes Gomes Maciel

Economista. Doutora em Economia Rural. Avenida Purdue, s/nº, Campus Universitário, CEP 36571.900. Viçosa, MG. mariliamacielgomes@gmail.com

---

**Resumo:** Neste estudo é analisado o desempenho das economias desenvolvidas e em desenvolvimento quando adotadas as medidas de políticas de redução das emissões de gases de efeito estufa. Os resultados da pesquisa foram obtidos com um modelo de simulação do crescimento econômico em âmbito multirregional. As análises foram aplicadas sobre dois cenários representando os contextos do protocolo de Kyoto e um novo protocolo envolvendo os países de todos os continentes. No primeiro caso, a política climática aplicada somente para os países desenvolvidos não provocou mudanças significativas em termos de emissões e de desempenho econômico. No segundo caso, houve uma pequena redução no desempenho das economias, todavia a queda nos níveis de emissões de CO<sub>2</sub> foi expressiva. Dessa forma, pode-se concluir que a cooperação entre todos os países que se destacam na emissão de CO<sub>2</sub> pode ser entendida como um pré-requisito para o sucesso das políticas climáticas em termos de mitigação do efeito estufa sem grandes efeitos sobre o crescimento econômico. **Palavras-Chave:** Política climática; crescimento econômico; bem-estar.

**Abstract:** This paper analyzes the implications of climate policies for reducing greenhouse gas emissions on the performance of developed and developing economies. The results of the research were obtained through a simulation model of economic growth in a multiregional context. The analyzes were applied on two scenarios representing the contexts of the Kyoto protocol and a new protocol involving the countries of all the continents. In the first case, climate policy applied only to developed countries did not lead to significant changes in terms of emissions and economic performance. In the second case, there was a small reduction in the performance of the economies, but the drop in CO<sub>2</sub> emission levels was significant. This way, it can be concluded that cooperation among all countries that excel in CO<sub>2</sub> emissions can be understood as a prerequisite for the success of climate policies in terms of mitigating the greenhouse effect without major effects on economic growth.

**Keywords:** Climate policy; economic growth; international trade and welfare.

## 1 INTRODUÇÃO

A criação de políticas climáticas de mitigação surgiu após a constatação de que a quantidade de gases responsáveis pelo efeito estufa, emitidos na atmosfera, estavam bloqueando a irradiação de calor para o espaço, gerando fenômenos que caracterizam uma mudança no clima. Esses gases têm sua origem, além das causas naturais, na queima de combustíveis fósseis, na mudança de uso do solo, como fertilizantes, pecuária, desmatamento e queimadas. Tais aspectos foram responsáveis pelo aumento de cerca de 40% na concentração de gás carbônico na atmosfera em relação ao período pré-industrial (IPCC, 2015).

Diante da possibilidade de aumento das temperaturas e ocorrência de fenômenos meteorológicos extremos, que pode colocar em risco o sistema alimentar, conseqüentemente, a redução do bem-estar por conta das emissões de gases de efeito estufa, as políticas climáticas ocuparam posições prioritárias nas agendas de políticas públicas nas economias mais industrializadas, tendo como marco histórico o protocolo de Kyoto. Desde então, todos os debates, sejam acadêmicos ou não, têm-se pautado no suposto *trade off* entre a mitigação das emissões e o crescimento econômico e nas proposições de superação desse *trade off*. Nesse contexto, o uso de modelos de simulação, ao permitir a modelagem das complexas relações entre o meio ambiente e a economia, estão trazendo novas perspectivas para este debate. Entre elas, tem-se a análise dos efeitos da integração mundial do comércio e da tecnologia sobre a dinâmica das economias nacionais e sobre suas emissões de gases de efeito estufa (GEE). As pesquisas que estão sendo produzidas nesta direção têm apontado para resultados inéditos, de suma importância no arranjo das políticas climáticas, como é o caso deste trabalho.

Os esforços para compreensão da relação entre meio ambiente e economia vem de longa data. Em muitos casos, pode-se observar visões relativamente otimistas, tendo por base a crença de que existem políticas de cunho regulatório com as quais podem se obter a contabilização entre crescimento econômico e redução dos impactos ambientais. Afora diversos outros trabalhos, têm-se os trabalhos de Hotelling (1931), Stiglitz (1974), Solow (1986), Kemfert (2004), Nagashima e Dellink (2014), Bosetti et al. (2008), Verdolini e Galeotti

(2009), Dechezlepretre et al. (2009), Edenhofer et al. (2005), Leimbach e Baumstark (2010), e Sousa e Fernandes (2014). Hotelling (1931), por exemplo, pressupõe que se houvesse um pagamento relativo à escassez dos recursos aconteceria uma redução do seu desgaste, e o uso dos recursos naturais passaria a ser mais eficiente. Stiglitz (1974) e Solow (1986) mostraram que o crescimento econômico não acarreta danos ao meio ambiente se o progresso tecnológico for maior que o desgaste ambiental.

No mesmo sentido, os estudos de Kemfert (2004), Nagashima e Dellink (2014), Bosetti et al. (2008), Verdolini e Galeotti (2009), Souza e Fernandes (2014), e Dechezlepretre et al. (2009) concluíram que para qualquer cenário de política climática, os custos de mitigação são irrisórios para o crescimento econômico e, sobretudo, para o bem-estar, desde que se considere os *spillovers* tecnológicos. Edenhofer et al. (2005) e Leimbach e Baumstark (2010), por sua vez, concluem que além dos custos relacionados às políticas de redução das emissões serem reduzidos, quando consideradas as mudanças tecnológicas, o crescimento econômico pode ser garantido caso os investimentos sejam redirecionados para o setor de energia renovável.

O presente estudo utilizou uma versão adaptada, do tipo Ramsey estilizado, dos modelos de Edenhofer et al. (2005) e Leimbach e Baumanstark (2010), considerando o comércio multilateral e os *spillovers* tecnológicos *embodied* em um contexto multirregional de mudanças climáticas, com inserção de variáveis referentes à América Latina, região de suma importância para o comércio internacional.

Diante de um cenário, em que se buscam uma cooperação internacional para descarbonização da atmosfera com o objetivo de proteger o sistema climático para benefício das gerações presentes e futuras, pretende-se com este estudo somar esforços para o entendimento dos impactos sobre a economia nos âmbitos nacional e mundial das medidas de políticas climáticas de mitigação das emissões de GEE, dando ênfase ao fluxo de comércio, a geração e as transferências de tecnologias entre as principais economias emissoras de GEE. Nesse sentido, este trabalho tem como foco central a complexidade observada no mundo real, cuja modelagem requer adoção de modelos multir-

regionais com interações dinâmicas multidimensionais, envolvendo economia, tecnologia e meio ambiente.

Este foco na complexidade marca a nova geração de pesquisa no campo da economia ambiental, sendo uma abordagem ainda inédita, formada de contribuições pioneiras que utilizam largamente as técnicas de simulação. Nesta pesquisa, são adicionados alguns elementos novos, a exemplo da escolha das regiões e os critérios de otimização empregados no modelo.

Nesse sentido, este trabalho buscou, de forma geral, simular os efeitos das políticas climáticas de redução das emissões de GEE, sobre o crescimento econômico e o bem-estar dos países desenvolvidos, representados pelos EUA e Europa, e dos países em desenvolvimento representados pela América Latina e China, no período de 2000 a 2100 em um contexto de economias abertas com difusão de tecnologias via *spillover embodied e disembodied*. Especificamente, pretendeu-se: a) analisar o comportamento do comércio internacional, do crescimento econômico e do bem-estar dos países desenvolvidos (EUA, Europa) e em desenvolvimento (América Latina, China), sem restrição de emissões e desconsiderando os *spillovers*; b) analisar o comportamento das variáveis econômicas: comércio internacional, crescimento econômico e bem-estar das regiões, considerando a implantação de metas de redução da emissão de GEE apenas para países desenvolvidos (EUA, Europa); e c) analisar o comportamento das variáveis econômicas destacadas no objetivo b, considerando também a implantação de metas de redução da emissão para países em desenvolvimento (América Latina, China).

Este artigo foi dividido em quatro partes além desta introdução. A seguinte apresenta uma fundamentação teórica da relação entre crescimento, comércio e meio ambiente; na terceira foi exposta a metodologia utilizada, juntamente com a base de dados; em seguida têm-se a apresentação dos resultados e, por fim, têm-se as considerações finais.

## 2 O MODELO DE RAMSEY-CASS-KOOPMANS E A INCLUSÃO DO MEIO AMBIENTE

O modelo de Ramsey-Cass-Koopmans (RCK) representa a base teórica desta pesquisa. Neste mo-

delo, adota-se o pressuposto do planejador social, cujo papel é otimizar uma função de bem-estar econômico geracional típica, aplicando o controle sobre variáveis envolvidas na alocação dos fatores produtivos. Entretanto, no modelo RCK, as questões ambientais não são contempladas, para isso, utilizou-se os modelos de Edenhofer et al. (2005) e Leimbach e Baumstark (2010) que complementam o anterior ao introduzirem a questão ambiental como uma variável endógena ao modelo.

Edenhofer et al. (2005) utilizaram o modelo de investimento e desenvolvimento tecnológico (MIND), de âmbito uniregional, para analisar a relação entre as opções de mitigação específicas e os custos para atingir os ambiciosos objetivos de proteção do clima considerando as mudanças tecnológicas. Os autores concluem que os custos relacionados às políticas de redução das emissões podem ser reduzidos quando consideradas as mudanças tecnológicas e que o crescimento econômico pode ser garantido caso os investimentos sejam redirecionados para o setor de energia renovável. Em adição, indicam que a redução das emissões causa perdas muito mais significativas no bem-estar quando a mudança tecnológica endógena não é considerada.

Leimbach e Baumstark (2010) fazem uma ampla revisão no modelo MIND, criando o Modelo MIND-RS. Este é um modelo dinâmico, multiregional de investimento e desenvolvimento, com *spillover embodied e disembodied*, do tipo Ramsey estilizado, cuja análise envolve necessariamente o uso das técnicas de simulação. Tais autores encontraram dois efeitos opostos em relação às perdas no consumo (custos de mitigação) na presença de acordos climáticos: i) aumentam por conta do crescimento econômico promovido por mudanças tecnológicas que não afetam a eficiência energética ii) reduzem no caso de mudanças tecnológicas envolvendo eficiência energética. Essas complexas interações entre mudanças climáticas e econômicas foram captadas no modelo com uma função de produção do tipo CES estendida por conta da necessidade de incorporação da energia entre os fatores de produção.

O presente estudo utilizou uma versão adaptada do modelo de Edenhofer et al. (2005) e Leimbach e Baumanstark (2010), seguindo a mesma linha de trabalho de Sousa e Fernandes (2014). A inovação no modelo reside no contexto da regionalização, sendo

admitida a existência de quatro regiões: Estados Unidos, Europa, América Latina e China. Portanto, duas regiões desenvolvidas, uma em desenvolvimento e, no caso da China, uma região em transição. Dada a complexidade das interações dinâmicas entre as dimensões econômicas e ambientais contidas no modelo, qualquer mudança na dimensão territorial pode produzir mudanças importantes nos resultados do modelo. A seguir, tem-se a descrição do modelo.

### 3 MODELO UTILIZADO COM BASE EM ADAPTAÇÕES DO MODELO MIND-RS

Por conta da linha de pesquisa e da regionalização definidas neste trabalho, foram feitas as seguintes pressuposições: a) Os países desenvolvidos, representados pelos Estados Unidos e Europa, são diferenciados em seus parâmetros relativos à produtividade do trabalho e eficiência energética, respectivamente; b) as economias menos desenvolvidas se beneficiam de maiores taxas de crescimento por conta da abundância de mão de obra e recursos enérgicos, além do maior potencial de absorção de *spillovers* (especialmente do tipo *embodied*); c) os *spillovers embodied* ocorrem das regiões desenvolvidas para as demais regiões via comércio; d) o fluxo de comércio integra o conjunto de variáveis de controle<sup>1</sup>; e) os *spillovers* tecnológicos *desembodied* são endógenos ao modelo; e) em relação aos acordos climáticos, assume-se que para cada região há uma permissão de emissão e para cada unidade de recurso fóssil convertido dentro do setor de energia final é necessária uma permissão de emissão, de modo que a disponibilidade interna de recurso fóssil deve ser menor ou igual ao saldo de permissão de emissões.

O modelo reflete, portanto, um problema de otimização intertemporal com uma função objetivo para cada região. No sentido de encontrar o ótimo de Pareto, o planejador social busca controlar o sistema a partir dos percentuais da produção destinados aos investimentos e ao comércio bilateral entre as regiões, bem como, dos percentuais

de energia alocados entre a produção de bens de consumo e bens de capital.

Em face da dinâmica inerente aos fenômenos naturais, especialmente em um cenário de mudanças climáticas, a representação do sistema real envolve grande complexidade matemática. Esta complexidade se reflete na estrutura matemática do modelo, cuja análise requer o emprego das técnicas de simulação. A simulação é o processo de construção de um sistema real em um ambiente controlado, onde podem ser feitos experimentos a partir da construção de cenários, em um longo período de tempo, com o objetivo de entender o comportamento do sistema ou avaliar estratégias de operação. Seus resultados auxiliam na tomada de decisão, com o conhecimento prévio de sua repercussão, uma vez que demonstram projeções futuras diante da problemática presente (COSTA, 2002). Para efetuar a simulação utilizou-se o *software* Matlab/Simulink 2012.

#### 3.1 Equações do Modelo

Da mesma forma que outros modelos de otimização intertemporal, a função principal a ser otimizada é a de bem-estar social agregada intertemporal conforme expressão (1).

$$W = \int_{t=1}^T e^{-\sigma} L(i,t) \ln \left( \frac{C(i,t)}{L(i,t)} \right) \quad (1)$$

em que  $\sigma$  é a elasticidade de substituição intertemporal,  $L$  representa a população da região que fornece de forma exógena o fator de produção trabalho e  $C$  é o consumo.

A seguir, tem-se a descrição de outras variáveis importantes que fazem parte da análise do bem-estar.

##### 3.1.1 Módulo produção

O produto agregado das regiões,  $Y_j$  (expressão 2), é dado pela soma do produto total dos setores de bens de capital e bens de consumo.

$$Y_j(i,t) = \phi_j(i) [\xi_k K_j(i,t)^{\rho(i)} + \xi_L(\theta_{Lj}(i,t) A_L(i,t) L(i,t))^{\rho(i)} + \xi_E(\theta_{Ej}(i,t) A_E(i,t) L(i,t))^{\rho(i)}]^{1/\rho(i)} \quad \forall j \in \{C,I\} \quad (2)$$

em que  $\rho$  é a elasticidade de substituição;  $\xi_m$  é o parâmetro que representa o peso dos insumos no

produto total;  $\phi$  é a produtividade total dos fatores;  $K$  é o estoque de capital;  $AL$  é a produtividade ou eficiência do trabalho;  $AE$  é a produtividade ou eficiência energética; e  $\theta_{m,j}$  é a parcela dos fatores de

<sup>1</sup> Mais especificamente, o controle recai sobre os percentuais da produção doméstica que serão destinados às exportações.

produção (participação do fator  $m$  no setor  $j$ ) que foi utilizada como parâmetro de otimização, sendo obtido da seguinte forma:

$$\theta_{m,j} = 1 - \theta_{m,j} \quad \forall_m \in \{L, E\} \quad (3)$$

$$D_j(i, t) = Y_k(i, t) + \sum_r X_k(r, i, t) - \sum_r X_k(i, r, t) - Iren(i, t) - Inf(i, t) \quad (4)$$

em que  $D_j(i, t)$  representa os bens investimentos (de capital) domésticos disponíveis,  $Y_k(i, t)$  é a produção doméstica de bens de capital,  $X_k(r, i, t)$  são as importações,  $X_k(i, r, t)$  são as exportações,  $Iren(i, t)$  é o capital utilizado pelos investidores domésticos no setor de energia renovável, e  $Inf(i, t)$  é o setor de energia restante.

A quantidade de capital destinada ao mercado externo é definida conforme a expressão (5).

$$X_k(r, i, t) = (1 - sY_k(i)) * Y_k(i, t) \quad (5)$$

em que  $sY_k(i)$  refere-se ao percentual do capital destinado ao mercado interno, sendo um parâmetro de controle para otimização da função utilizada.

O estoque de capital da economia é distribuído para os setores: de produção de bens de capital, bens de consumo, extração e, por fim, para o setor de transformação de energia fóssil, conforme expressão (6).

$$\dot{K}_j(i, t) = I_j(i, t) - [\delta_j(i)] * [D_j(i, t)] \quad \forall_j \in \{C, Q, f, I\} \quad (6)$$

em que  $\dot{K}_j(i, t)$  é a parcela do capital distribuído,  $I_j(i, t)$  é o investimento doméstico no setor,  $\delta_j(i)$  é a taxa de depreciação do capital, e  $D_j(i, t)$  é a disponibilidade interna de capital ou capital acumulado na economia.

Da parcela de capital distribuído, tem-se as quantidades destinadas para os setores de capital ( $IK$ ), bens de consumo ( $IC$ ), energia fóssil ( $If$ ), e extração ( $IQ$ ) conforme descrito abaixo:

$$IK(i, t) = sK * I_j(i, t) \quad (7)$$

$$IC(i, t) = sC * I_j(i, t) \quad (8)$$

$$If(i, t) = sf * I_j(i, t) \quad (9)$$

$$IQ(i, t) = sQ * I_j(i, t) \quad (10)$$

O produto total da economia está relacionado à disponibilidade interna de bens de capital e de bens de consumo. No setor de bens de capital, a disponibilidade interna desses bens é dada pela expressão (4).

em que  $sK$ ,  $sC$ ,  $sf$ ,  $sQ$  são os parâmetros percentuais exógenos da disponibilidade interna de capital, os quais foram empregados como parâmetro de controle para otimização da função de bem-estar.

No setor de bens de consumo, a produção doméstica dos bens ( $Y_c$ ), adicionadas às importações ( $I_m$ ) e subtraídas das exportações ( $X_C(i, r)$ ), resultam na disponibilidade interna de bens de consumo ilustrada pela seguinte expressão:

$$D(i, t) = (Y_c(i, t) + \sum_r X_I(r, i, t) - \sum_r X_I(i, r, t)) \quad (11)$$

Essa disponibilidade interna de bens de consumo é distribuída entre os setores de consumo doméstico, exportações e P&D do trabalho e da energia, conforme expressões (12) (13) (14) e (15).

$$C(i, t) = sD_c(i) * D_c(i, t) \quad (12)$$

$$Crd_L(i, t) = sD_c rd_L(i) * D_c(i, t) \quad (13)$$

$$Crd_E(i, t) = sD_c rd_E(i) * D_c(i, t) \quad (14)$$

$$X_C(i, r, t) = 1 - sY_c(i) * Y_c(i, t) \quad (15)$$

em que  $C(i, t)$ ,  $Crd_L(i, t)$ ,  $Crd_E(i, t)$ ,  $X_C(i, r, t)$  são as quantidades de bens de consumo destinadas para os setores de consumo, P&D, e para exportação respectivamente.  $sD_c(i)$ ,  $sD_L(i)$  e  $sD_E(i)$  são parâmetros percentuais exógenos da disponibilidade interna de bens de consumo; e são parâmetros percentuais da produção de bens de consumo destinado para o mercado interno. Estes parâmetros foram definidos com o objetivo de otimizar a função de bem-estar.

Conforme Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) e Leimbach e Baumstark (2010), os investimentos em P&D ( $rd_m$ ), e os *spillovers* tecnológicos  $spm(i, t)$  influenciam as variáveis de produtividade, tal como na expressão abaixo:

$$A_m(i,t) = \zeta_m(i) \left( \frac{rd_m(i,t)}{Y_c(i,t) + Y_f(i,t)} \right)^{\alpha_m} A_m(i,t) + sp_m(i,t) \quad \forall m \in \{L,E\} \quad (16)$$

em  $\zeta_m(i)$  que é a produtividade dos investimentos em P&D, que melhora a eficiência do fator  $m$ ;  $\alpha_m$  é um parâmetro de eficiência que aumenta a importância do setor de P&D na produtividade dos fatores;  $Y_C$  é o produto do setor de bens de consumo; e  $Y_I$  é o produto do setor de bens investimento (ou de capital).

$$sp_m(i,t) = \left\{ \sum_r \left[ \left( \frac{X_f(r,i,t)}{K_r(i,t)} \right)^\psi \Omega_m(A_m(r,t) - A_m(i,t)) \right] : A_m(i,t) < A_m(r,t) \right. \\ \left. 0 : A_m(i,t) < A_m(r,t) \right. \quad (17)$$

em que  $\Omega_m$  descreve a intensidade do *spillover* e  $\psi$  é uma medida de elasticidade do *spillover* de investimentos estrangeiros.

### 3.1.2 Módulo controle do capital

Foi introduzido no modelo original um módulo de controle do capital com a finalidade de obter os parâmetros percentuais a partir das seguintes expressões:

$$sK = x \quad (18)$$

$$sC = (1 - x) * c1 \quad (19)$$

$$sf = (1 - (x + sC)) * c2 \quad (20)$$

$$sQ = 1 - (x + sC + sf) \quad (21)$$

em que  $sK$ ,  $sC$ ,  $sf$ ,  $sQ$  representam o percentual da disponibilidade de capital para ser acumulado,  $c1$  e  $c2$  são quantidades de capital efetivamente utilizadas no setor de bens de capital. Cabe ressaltar que os percentuais foram definidos visando obter o ótimo para função de bem-estar.

### 3.1.3 Módulo controle do consumo e P&D

Da mesma forma que antes, esta parte se difere do modelo original, pois foi inserido um módulo

As exportações de capital,  $XI(r,i)$ , da região  $r$  (países desenvolvidos) para a região  $i$  (países em desenvolvimento),  $\forall m \in \{L,E\}$ , geram os *spillovers* tecnológicos *embodied* que influenciam tanto a eficiência do trabalho quanto da energia (expressão 17).

para controle do consumo representado pelas expressões a seguir:

$$sY_c(i) = x \quad (22)$$

$$sD_L(i) = (1 - x) * d1 \quad (23)$$

$$sD_E(i) = (1 - x + sD_L) \quad (24)$$

em que  $sY_c$ ,  $sD_L(i)$ ,  $sD_E(i)$  mostram o percentual da disponibilidade interna de bens de consumo a serem consumidos e destinados para os setores de P&D para aumento da eficiência do trabalho e do capital, e  $d1$  é a quantidade de bens de consumo utilizadas efetivamente para o consumo, os quais foram utilizados como parâmetros de controle.

### 3.1.4 Módulo energia

A produção no setor de energia final, ilustrada pela expressão (25), é constituída pelas energias fóssil, renovável e energia não fóssil.

$$E(i,t) = E_f(i,t) + E_{ren}(i,t) + E_{nf}(i,t) \quad (25)$$

em que  $E(i,t)$  representa o setor de energia final;  $E_f(i,t)$ , o setor de energia fóssil;  $E_{ren}(i,t)$ , o setor de energia renovável; e  $E_{nf}(i,t)$ , o setor de energia não fóssil.

No setor de energia fóssil, a produção final é dada por uma função de produção CES expressa da seguinte forma:

$$E_f(i,t) = \Phi_f(i) \left[ \xi_k^f k_f(i,t)^{\rho_f} + \xi_{PE}^f (D(i) * PE(i,t)^{\rho_f})^{\frac{1}{\rho_f}} \right] \quad (26)$$

em que  $\Phi_f$  é a produtividade total dos fatores do setor de energia fóssil da região  $i$ ;  $\xi_k^f$ , o peso

do fator capital;  $k_f(i,t)$ , o estoque de capital do setor de energia fóssil na região  $i$  no tempo  $t$ ;  $\rho_f$ ,

a elasticidade de substituição;  $\xi_{PE}^f$ , o peso do fator energia primária fóssil;  $D(i)$ , a eficiência do fator energia primária fóssil na região  $i$ ; e  $PE(i)$ , o fator de energia primária fóssil para a região  $i$  no tempo  $t$ , sendo este determinado pela relação entre  $k(i, t)$ , fator de conversão de carbono em joule, e  $Q(i, t)$  que é a extração de recurso fóssil (expressão 27).

$$PE(i, t) = k(i, t) * Q(i, t) \quad (27)$$

$$\mathcal{X}(i, t+1) = \mathcal{X}(i, t) \left[ 1 + \mathcal{X}(i)_{max} - \mathcal{X}(i, t) \left( \frac{z\nu(i)}{\mathcal{X}(i)_{max}} \left( \left( \frac{Q(i, t)}{Q(i, 0)} \right)^\mu - 1 \right) \right) \right] \quad (29)$$

em que  $\mathcal{X}(i)_{max}$  é a produtividade máxima do setor de extração na região  $i$ ;  $\mathcal{X}(i, t)$ , a produtividade marginal;  $z$ , o período de tempo;  $\nu(i)$ , o inverso da taxa de aprendizagem; e  $\mu$ , o fator de amortecimento da aprendizagem.

A expressão (30) ilustra os custos marginais de extração. Eles são derivados da curva de Rogner<sup>2</sup>.

$$mC(i, t) = 1 + \frac{\chi_2}{\chi_1} \left( \frac{cQ(i, t)}{\chi_3(i)} \right)^{\chi_4} \quad (30)$$

em que  $X_1, X_2$  e  $X_3$  são parâmetros da curva de custo marginal de extração<sup>3</sup> da região  $i$ ;  $X_4$ , um parâmetro de custo marginal da curva de extração;  $cQ$ , a quantidade acumulada de extração dada pela expressão (31) com  $z$  representando períodos de tempo.

$$cQ(i, t) = cQ(i, t-1) + zQ(i, t) \quad (31)$$

A disponibilidade interna de recurso fóssil, por sua vez, é obtida da seguinte forma:

$$DQ(i, t) = Q(i, t) + \sum_r XQ(r, i, t) \quad (32)$$

em que  $DQ$  é a disponibilidade interna de recurso fóssil,  $Q$  é a quantidade de recurso fóssil extraída, e  $XQ$  é a exportação de recurso fóssil dado pela expressão (33).

Por sua vez, a capacidade de extração de recurso fóssil é obtida a partir da seguinte expressão:

$$Q(i, t) = k(i, t) * K_Q(i, t) \quad (28)$$

em que  $k(i, t)$  é a produtividade do estoque de capital no setor de extração da região  $i$  no tempo  $t$ ; e,  $K_Q$  o estoque de capital do setor.

A produtividade do estoque de capital do setor de extração está sujeita ao “*learning by doing*” representada pela expressão (29).

$$XQ(i, t) = (1 - sQ) * Q(i, t) \quad (33)$$

em que  $XQ$  é a exportação de recurso fóssil,  $sQ$  o percentual da produção de recurso fóssil que não sai do país, o qual representa um parâmetro de controle para otimização da função de bem-estar, e  $Q$  a quantidade de recurso fóssil extraída no país.

O setor de energia renovável tem sua produção final baseada em *vintages capital*<sup>4</sup> ( $V$ ) ativos e a carga de fatores ( $I$ ) acumulados no passado, conforme a expressão:

$$E_{ren}(i, t) = \sum I(t - \tau) V(i, t - \tau) w(\tau) \quad (34)$$

em que  $\tau$  são períodos de tempo;  $w$ , um fator de ponderação (peso) que representa a parte ainda ativa dos *vintages* da produção de energia renovável. Cada *vintage capital*<sup>5</sup> é colocado em função dos investimentos em energia renovável.

Nesse setor, o *vintage capital* está em função dos investimentos em energia renovável e dos custos desses investimentos expresso da seguinte forma:

$$V(i, t+1) = z \frac{Iren(i)}{fC(i) + k'(i, t)} \quad (35)$$

em que  $fC(i)$  representa o custo mínimo do investimento; e  $k'(i, t)$ , o custo variável do investimento da região  $i$  no tempo  $t$ .

2 A curva de Rogner descreve os custos de extração em relação à quantidade extraída sem a distinção entre recursos e reservas. À medida que forem extraídas unidades do recurso fóssil acontecerá seu esgotamento e maiores serão os custos para extração. Em contrapartida, a descoberta de novos recursos (possibilidade de substituição) pode reduzir o eventual esgotamento dos recursos outrora existentes (ROGNER, 1997).

3 As fontes para obtenção dos parâmetros estão discriminadas no Quadro 2.

4 Modelos de *vintage capital* são caracterizados por taxas de depreciação não exponenciais e podem incorporar *learning-by-doing*, ou seja, se em diferentes períodos, as máquinas e equipamentos, de uma economia, pertencentes a gerações separadas possuem distintas taxas de depreciação tem-se, nesse caso o *vintage capital* (BENHABIB e RUSTICHINI, 1991).

5 Conforme demonstrado pela expressão (10) no setor de energia renovável.

Da mesma forma que no setor de extração, a variação tecnológica endógena é baseada na acumulação de capacidade instalada  $cN$ , conforme expressão (36).

$$cN(i,t) = cN(i,t - 1) + V(i,t) \quad (36)$$

Por fim, a produtividade do setor de energia renovável muda conforme os custos de investimento, de modo que:

$$k'(i,t) = k'(i,t) \left( \frac{cN(i,t)}{cN(i,0)} \right)^{-\gamma(i)} \quad (37)$$

em que  $\gamma(i)$  representa o parâmetro de aprendizagem na área de energia renovável da região  $i$ .

O setor de energia não fóssil fornece energia final a partir da energia nuclear, hidráulica e fontes de biomassa tradicionais sendo ofertada exogenamente.

### 3.1.5 Módulo emissões

As emissões antropogênicas relacionadas ao uso do solo e a queima de combustíveis fósseis foi obtida a partir da seguinte expressão:

$$EM(t) = \sum Q(i,t) + LU(t) \quad (38)$$

em que  $Q(i,t)$  são as emissões geradas pela queima de combustíveis fósseis, e  $LU$  são as emissões a partir da mudança no uso do solo. Estas últimas podem ser ilustradas a partir da expressão (39).

$$LU(i,t) = \beta * LU(i,t - 1) \quad (39)$$

em que  $P$  são as permissões de emissões definidas exogenamente,  $XP(i,t)$  são as exportações das permissões de emissões do país,  $XP(r,i,t)$  as importações de permissões de emissões e  $DQ$  a disponibilidade interna de recurso fóssil.

O teto para emissão de gases do efeito estufa pelos países é dado por:

$$T(i,t) = P(i,t) - XP(i,t) + \sum_r XP(r,i,t) \quad (43)$$

em que  $T$  é o teto permitido para emissão,  $P$  são as permissões de emissões definidas exogenamente,

em que  $LU(i,t)$  são as emissões a partir da mudança do uso do solo no período atual,  $\beta$  é a variação percentual da mudança no uso do solo; e  $LU(i,t - 1)$  é a emissão a partir da mudança no uso do solo no período anterior.

### 3.1.6 Módulo controle de energia

Este módulo adapta o modelo original de forma que o nível de emissões foi mensurado a partir da expressão (40).

$$NEM = DQ + SP \quad (40)$$

em que  $NEM$  é o nível de emissões;  $DQ$  a disponibilidade interna de recurso fóssil e  $SP$  o saldo de permissão de emissão.

O modelo prevê a comercialização de permissão de emissões conforme expressão (41).

$$XP(i,t) = (1 - xP) * P(i,t) + \sum_r XP(i,r,t) \quad (41)$$

em que  $XP(i,t)$  define o comércio de permissões de emissões,  $xP$  o percentual das permissões de emissões do país, que foi utilizado como parâmetro de controle,  $P$  são as permissões de emissões definidas exogenamente.

O nível de emissões de alguns países é menor do que lhe é permitido, o que significa que estes países estão poluindo menos que a meta estabelecida, gerando as permissões de emissões. Estas permissões podem ser comercializadas com outros que possuem um nível de emissão superior ao permitido. Assim, surge um saldo de permissão de emissões ( $SP(i,t)$ ) que vai ser negociado no mercado (expressão 42).

$$SP(i,t) = P(i,t) - XP(i,t) + \sum_r XP(r,i,t) - DQ \quad (42)$$

$XP(i,t)$  as exportações das permissões de emissões do país, e  $XP(r,i,t)$  as importações de permissões de emissões.

## 3.2 Dados, calibração e otimização do modelo

A calibração é uma etapa crucial da construção de modelos de simulação representativos da realidade. Os valores iniciais das variáveis do modelo e os valores dos parâmetros devem ser coerentes<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Em alguns casos, os valores podem ser obtidos a partir de bases empíricas (estatísticas oficiais ou estimativas encontradas em *papers* científicos) ou teóricas. Outras vezes, se faz necessário o

com os valores reais, assim como as trajetórias temporais produzidas na simulação. Tais valores devem ser fundamentados em uma teoria ou evidências empíricas. Com relação aos parâmetros de controle, que definem os percentuais da produção alocados para o comércio, investimentos e para o uso de recursos energéticos, os mesmos foram obtidos pelo critério de otimização da função de bem-estar social de cada região. A função objetivo maximizada é descrita pela expressão (1), com a restrição de que os parâmetros percentuais variem

entre 0 e 1. Então, o modelo é simulado de forma interativa e contínua até que os valores dos parâmetros de controle correspondam aos objetivos, ou seja, de tal forma que o bem-estar alcance uma trajetória ótima. Este procedimento de otimização segue a mesma linha sugerida por Souza e Fernandes (2014) e difere dos que foram utilizados pelos demais autores.

A Tabela 1 apresenta os valores iniciais das variáveis, na qual são indicadas as fontes usadas na obtenção de cada um dos valores.

Tabela 1 – Valores iniciais das variáveis utilizadas no modelo para o ano 2000

Variáveis	Europa	EUA	China	América Latina	Fonte
PIB (em trilhões de US\$)	9,26	10	1,19	1,52	World Bank
População (em bilhões de habitantes)	0,88	0,28	1,26	0,51	World Bank
Estoque de capital no setor de bens de capital (em trilhões de US\$)	0,37	0,33	0,04	0,037	World Bank
Estoque de capital no setor de bens de consumo (ad hoc)	0,46	0,87	0,054	0,064	ad hoc
Estoque de capital no setor de energia fóssil (em trilhões de US\$)	1,4	1,6	0,27	2,8	World Bank
Estoque de capital no setor de extração (em trilhões de US\$)	0,95	1,67	1,13	0,87	World Bank
Exportações bens de consumo (em trilhões de US\$)	0,03	0,01	0,02	0,02	World Bank
Exportações de recursos do setor de extração (em trilhões de toneladas)	0,02	0,005	0,002	0,04	Comtrade
Produtividade total do fator (setor industrial)	0,34	0,45	0,42	0,33	Leimbach (2010)
Eficiência do trabalho	0,5	0,8	0,02	0,85	Leimbach (2010)
Eficiência Energética	5,24	3,45	0,64	2,55	Leimbach (2010)
Produtividade total do fator (setor de energia fóssil)	3,12	3,82	13,0	3,55	Leimbach (2010)

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

### 3.3 Cenários Simulados

Na construção dos cenários, buscou-se aqueles mais representativos da realidade econômica e do ambiente em que as regiões analisadas estão inseridas, no caso em análise os Estados Unidos e Europa, representando regiões desenvolvidas, América Latina e China, representando regiões em desenvolvimento e em transição, respectivamente.

Com esta diversidade na dimensão regional, torna-se possível a criação de um maior leque de possibilidade em termos de acordos climáticos internacionais. Quanto maior a diversidade regional maior a diversidade dos impactos da mitigação sobre o crescimento e o bem-estar econômico. Juntamente com as interações regionais, têm-se as mudanças tecnológicas como um dos fatores primordiais que interferem na relação entre crescimento econômico e mudanças climáticas. Em ordem com esses dois aspectos de relevância para os estudos dos impactos da mitigação foram definidos os seguintes cenários:

uso da intuição, pois dada a diversidade de parâmetros contida no modelo, inevitavelmente haverá parâmetros para os quais ainda não existe qualquer referência empírica ou teórica. Neste caso, se diz que a escolha foi do tipo “ad hoc”.

Cenário baseline (CBE): este cenário representa o contexto sem restrições quanto às emissões de CO<sub>2</sub>, combinado com a ausência de mudança tecnológica (ausência de *spillover embodied* e *desimbodyed*). Este cenário não é realista. Sua função é produzir a contraprova a respeito das interações entre mudanças tecnológicas, acordos climáticos e crescimento econômico em um contexto multirregional. Para a análise desse cenário, foi desativado o parâmetro  $spm(i,t)$  da expressão (17) bem como da expressão (43) para as todas as regiões (Estados Unidos, Europa, América Latina e China).

Cenário 1 (CEP-1): este cenário de política climática foi delimitado seguindo as recomendações iniciais do Protocolo de Kyoto, que impunha restrições aos países desenvolvidos. Dessa forma, somente a Europa e os EUA devem cumprir metas de emissões. Neste, a expressão (43) foi ativada para a região desenvolvida, mantendo-se desabilitado o parâmetro  $spm(i,t)$  da expressão (17).

Cenário 2 (CEP-2): Nesse cenário de política climática, todas as regiões (desenvolvidas, em desenvolvimento e em transição) devem cumprir metas de emissões, o que é coerente com o novo protocolo climático que vem sendo debatido. Nesse cenário, a expressão (43) foi ativada para todas as regiões (Estados Unidos, Europa, América Latina e China), mas manteve-se desabilitado o parâmetro  $spm(i,t)$  da expressão (17) de todas elas. Assim, tem-se um cenário de restrições climáticas com impactos potencialmente mais severos sobre o crescimento econômico. Este é o tipo de cenário que pode exacerbar os efeitos do aumento da diversidade regional.

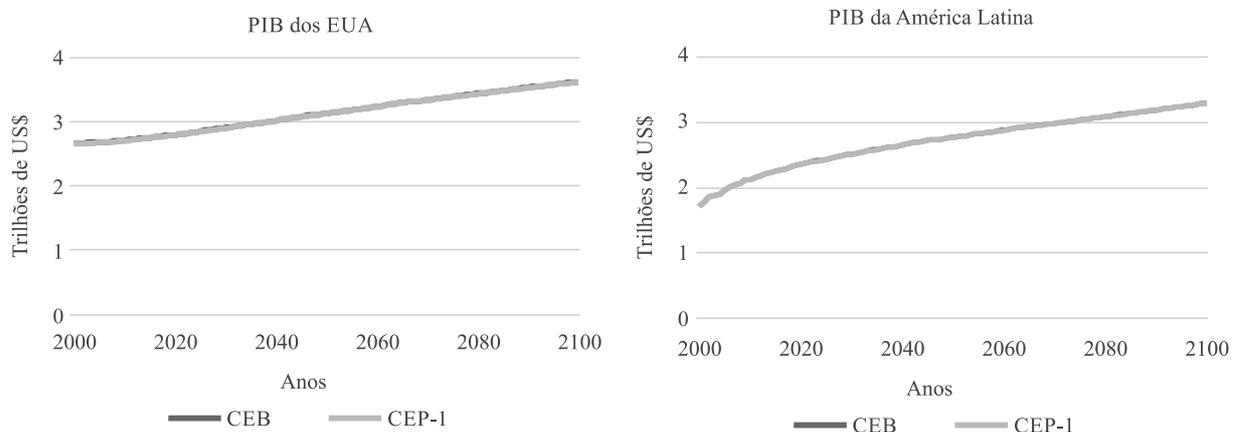
## 4 RESULTADOS

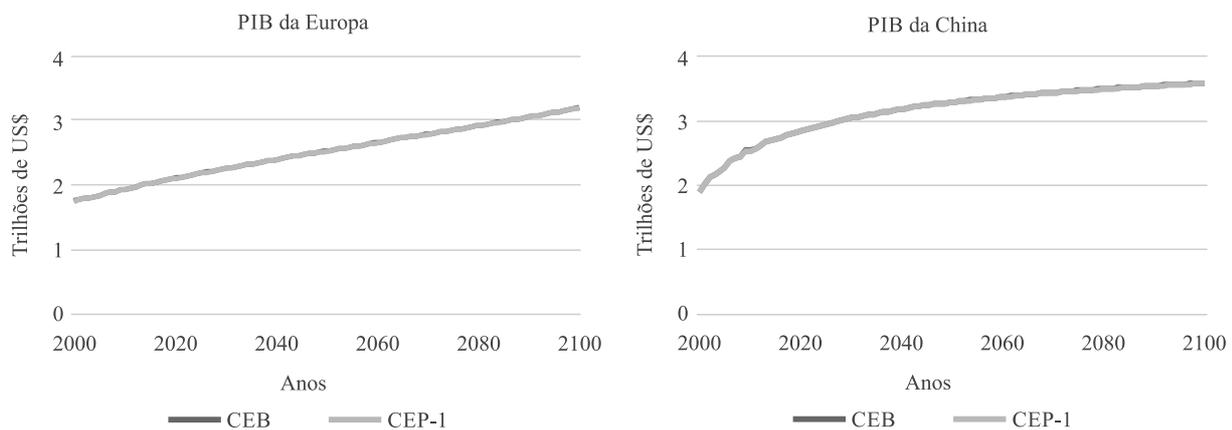
A seguir foram apresentados os resultados das simulações realizadas. Primeiramente, considerou-se um cenário onde a política climática foi implementada apenas para os países desenvolvidos (CEP-1), como proposto inicialmente pelo protocolo de Kyoto, em contexto com mudanças tecnológicas (*spillovers*).

A política climática adotada foi de redução de 55% dos níveis atuais de emissão, uma média do percentual apresentado no décimo nono relatório produzido pelo IPCC para manter os níveis de temperatura em no máximo 2oC acima dos níveis pré-industriais. Esta medida foi imposta somente aos países desenvolvidos que neste trabalho são descritos pela Europa e Estados Unidos.

Ao se comparar os cenários CEB (cenário base) com o CEP-1 observou-se que o PIB dos países não foi sensível à redução nos níveis de emissões estabelecidos (Figura 1). Um dos argumentos apresentados para a não participação dos acordos climáticos globais é a redução no PIB, estimado pela literatura entre 1 e 3%, o que por consequência acarreta na redução do bem-estar (STERN, 2007). Entretanto, considerando as pressuposições feitas no modelo, o resultado obtido sugere que a implementação de restrição de emissões para os países desenvolvidos não gera alterações no crescimento econômico das regiões analisadas. Este fato sugere, assim como em Sousa e Fernandes (2014), que o argumento utilizado pelos países para a não ratificação dos acordos internacionais de redução de emissão pode ser exagerado.

Figura 1 – Trajetórias simuladas do PIB nos contextos sem restrições (CEB) e com restrições de GEE para Estados Unidos e Europa (CEP-1).





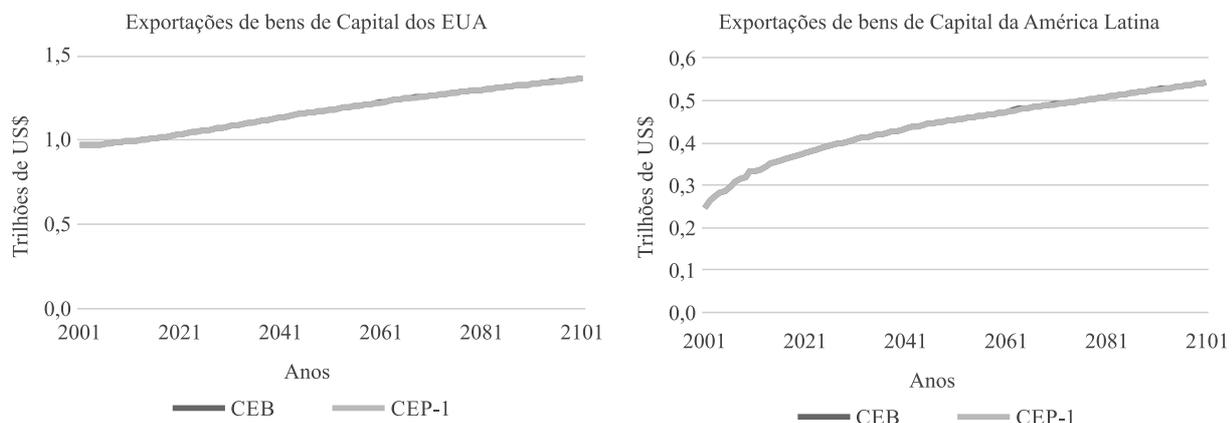
Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

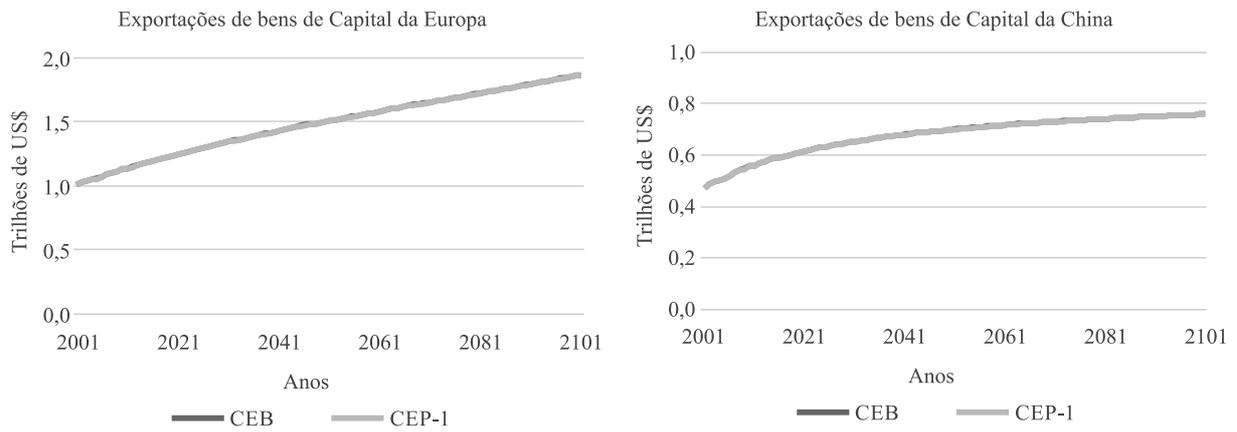
Este inexpressivo impacto da mitigação sobre o crescimento econômico mundial pode ser entendido, nos termos propostos pelo modelo, por ordem de diversos fatores. O primeiro deles reside nos efeitos das mudanças tecnológicas (efeito *spillovers*), que podem contrabalançar os efeitos da mitigação; fato este já constatado nos primeiros modelos do tipo MIND. Paralelamente, os países desenvolvidos apresentam um histórico de redução da dependência relativa de setores fósseis sobre a produção, o que ajuda a amenizar o impacto das restrições climáticas sobre o crescimento de suas economias. Além do mais, a diversidade regional aumenta a eficiência alocativa do comércio internacional, diminuindo a importância do uso de recursos energéticos (assim como do demais recursos) na promoção do crescimento econômico. Somando a isso, o potencial de crescimento da América Latina e, principalmente, da China, não foram comprometidos por restrições climáticas, assim como o potencial de crescimento

No que se refere às demais variáveis indicadoras de mudanças econômicas, a exemplo do comércio internacional e do bem-estar, os impactos das restrições climáticas sobre regiões desenvolvidas foram igualmente inexpressivos, não havendo assim custos de mitigação. As Figuras 2, 3 e 4 sintetizam estes resultados.

Visto que o fluxo de comércio não foi alterado sobremaneira, pode-se concluir que a mitigação restrita aos países desenvolvidos em um contexto de mudanças tecnológicas é efetivamente pouco relevante no que diz respeito a seus impactos sobre a dinâmica econômica dos países em cenário de livre comércio. Tudo indica que o maior peso sobre o crescimento econômico em contexto de mudança tecnológica e de livre comércio não estão apoiadas efetivamente no consumo de energia fóssil dos países desenvolvidos. A mitigação pode gerar custos “locais”, no sentido de afetar parte das firmas em determinados setores, mas no âmbito nacional não se observam custos de mitigação.

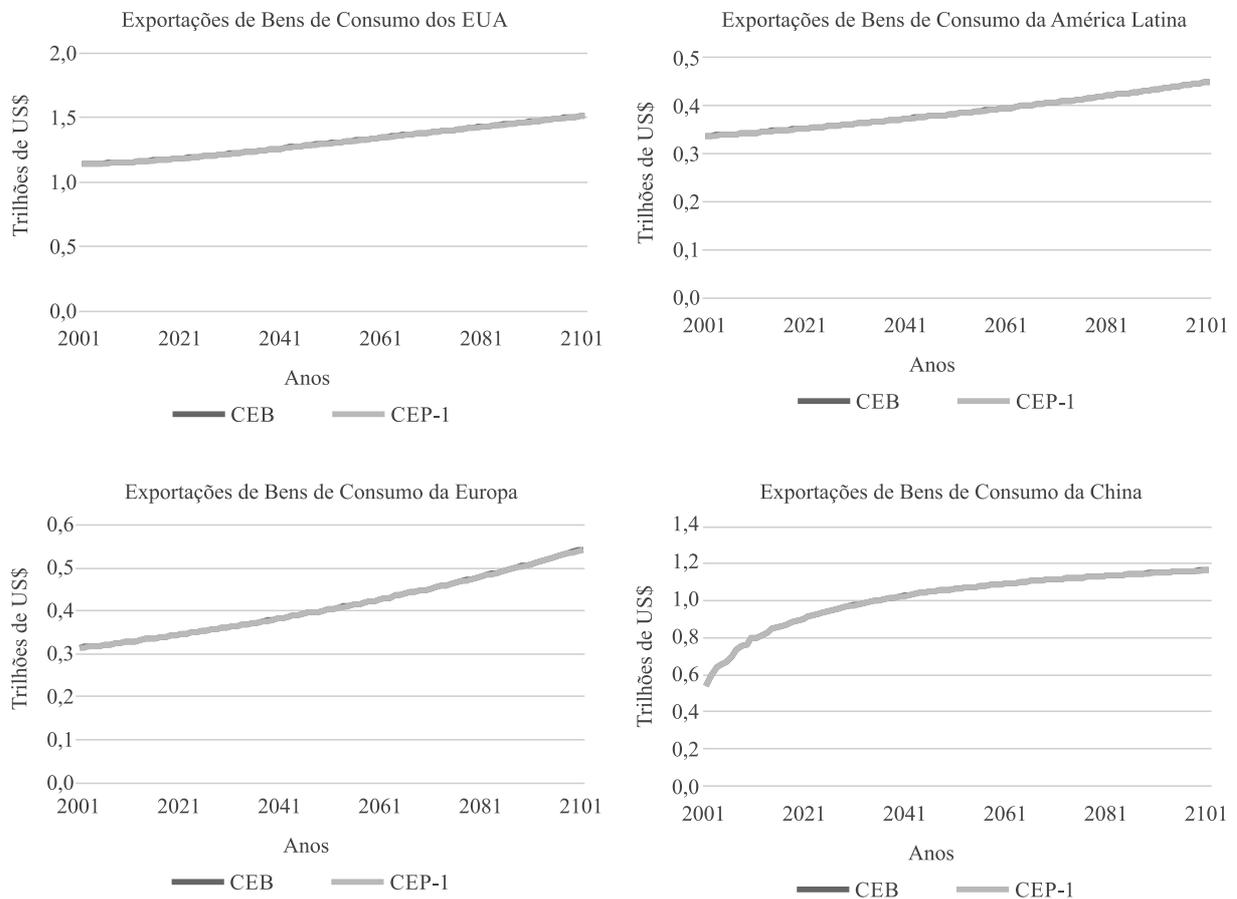
Figura 2 – Trajetórias simuladas dos fluxos de comércio nos contextos sem restrições (CEB) e com restrição de GEE para Estados Unidos e Europa (CEP-1).





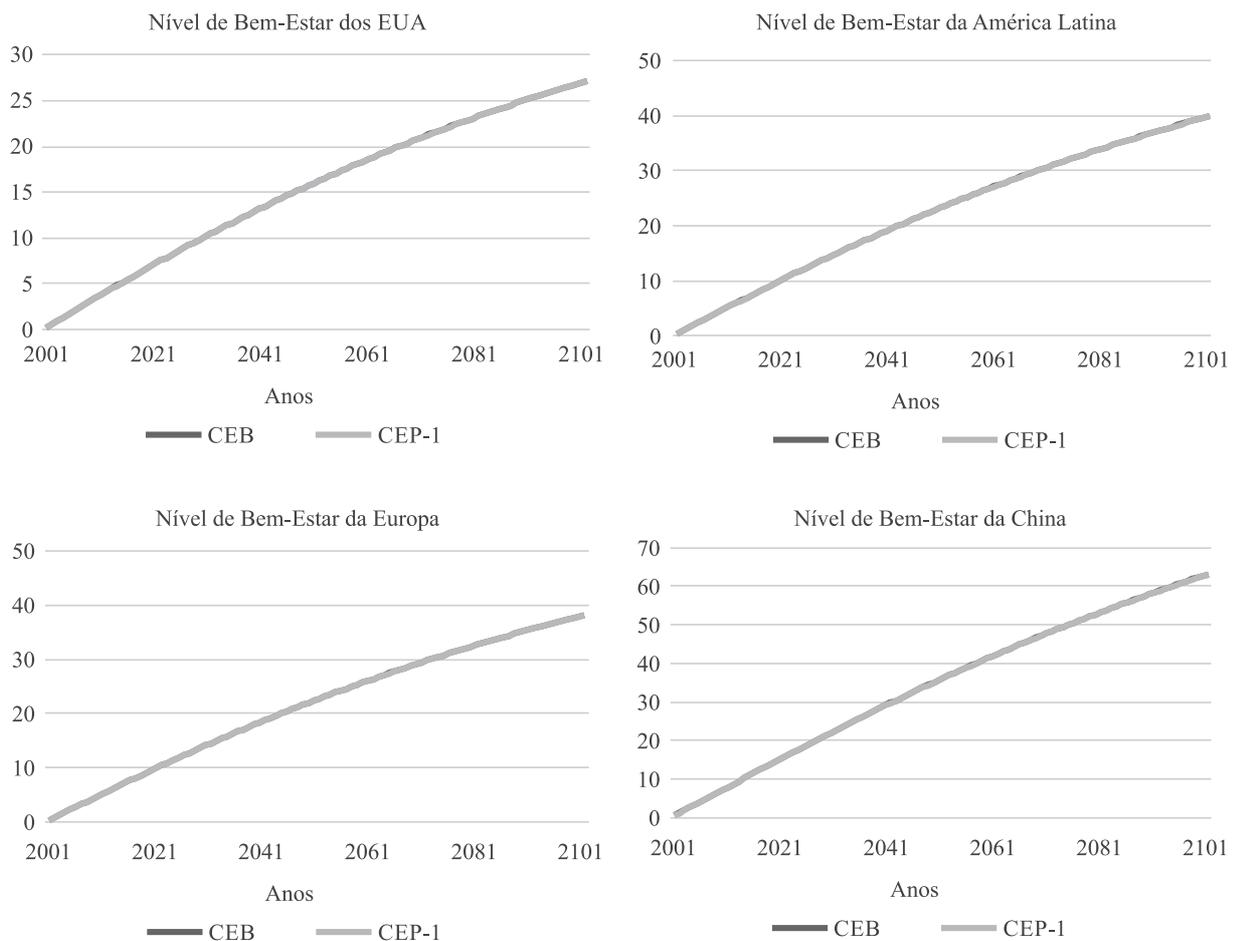
Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Figura 3 – Trajetórias simuladas dos fluxos de comércio nos contextos sem restrição (CEB) de restrição de GEE para Estados Unidos e Europa (CEP-1).



Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Figura 4 – Trajetórias simuladas do bem-estar econômico nos contextos sem restrição (CEB) de restrição de GEE para Estados Unidos e Europa (CEP-1).



Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

A partir desses resultados, observou-se que o temor manifestado pelos países desenvolvidos nos debates sobre os custos de mitigação pode estar vinculado a interesses políticos e não propriamente econômicos, visto que a mitigação pode efetivamente afetar interesses de grupos específicos, a exemplo dos setores extrativistas nos países desenvolvidos.

Se do ponto de vista puramente econômico os resultados são favoráveis à imposição de restrições climáticas sobre as regiões desenvolvidas, a questão fundamental de controle das emissões mundiais não fica resolvida, visto que o crescimento econômico das demais, menos desenvolvidas e, especialmente, da economia chinesa, representa um risco climático no longo prazo. A solução definitiva, portanto, exige o envolvimento de todas as nações de maior peso no PIB mundial, nos acordos climáticos. Nesta pesquisa, adotou-se a hipótese que o grau de diversidade regional pode interferir sobremaneira na relação entre mitigação e crescimento econômico no âmbito mundial. Talvez seja

possível alcançar determinado nível de controle de emissões de GEE sem aumento significativo nos custos de mitigação por conta exclusivamente das interações comerciais entre um conjunto maior de regiões heterogêneas. O objetivo do cenário 2 (CEP-2) é justamente analisar esta questão.

Sendo assim, com esse cenário pode-se demonstrar a importância da cooperação entre os países, o que já foi apontado por outros autores, a exemplo de Edmonds (2012), os quais chegam ao consenso de que as mudanças unilaterais não são suficientes para alterar o atual cenário de mudanças climáticas, sendo fundamental a aplicabilidade de uma política climática global. Obviamente, este acordo implica maior número de participantes, o que aumenta a heterogeneidade econômica e política, dificultando este tipo de acordo, mas é justamente esse maior grau de heterogeneidade o fator crucial para minimizar os custos de mitigação, mesmo em um cenário sem mudanças tecnológicas significativas.

Do ponto de vista dos países em desenvolvimento ou transição, o crescimento econômico é visto como o caminho para reduzir a pobreza e as desigualdades, problemas considerados no momento mais graves do que os de natureza climática. A China é um exemplo da importância do crescimento econômico para a transformação de uma região subdesenvolvida em direção às melhores posições do ranking do desenvolvimento. Por este motivo, os países relativamente menos desenvolvidos temem que as políticas climáticas de redução das emissões de GEE comprometam tanto o desenvolvimento industrial, quanto o crescimento da renda *per capita*.

Não obstante, este medo vem sendo superado e, recentemente, os países vêm discutindo a possibilidade de implantação de uma política climática universal. E sobre essa perspectiva, o presente trabalho cria um cenário (CEP-2) impondo um compromisso de redução de emissão universal, ou seja, tanto os países desenvolvidos quanto os em desenvolvimento têm obrigações de reduzir seus níveis de emissão.

A Tabela 2 ilustra os efeitos da política de redução das emissões sobre o crescimento econômico das regiões analisadas, em um contexto sem progresso tecnológico (CEP-2). Quando impõe-se compromissos também para os países em desenvolvimento, tem-se uma redução da taxa de crescimento do PIB de todas as regiões em comparação com o cenário base (CEB). Em termos absolutos, a China apresentou uma queda maior, seguida dos EUA, Europa e América Latina. Mas, é importante observar que as diminuições foram relativamente pequenas, corroborando a hipótese de que uma maior diversidade de regiões interagindo entre si via fluxo comerciais pode minimizar os efeitos da mitigação.

Tabela 2 – Taxa média anual de crescimento do PIB dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento no CEB e no CEP-2, no período de 100 anos

PIB (trilhões de US\$)				
Cenários*	Europa	EUA	China	América Latina
CEB	2,859	3,941	3,486	3,136
CEP-2	2,846	3,915	3,457	3,128
Diferença	-0,013	-0,026	-0,029	-0,008

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Da mesma forma, as exportações de bens de capital tanto dos países desenvolvidos como dos países em desenvolvimento apresentaram uma pequena redução, conforme valores contidos na Tabela 3. O país mais afetado pelas políticas climáticas nas exportações de bens de capital foi a China (redução de US\$ 0,01 trilhão), seguida dos Estados Unidos (US\$ 0,008 trilhões), e da Europa (US\$ 0,006 trilhões). A América Latina foi a região menos afetada, com uma redução de US\$ 0,001 trilhões.

Tabela 3 – Exportações médias de bens de capital com redução geral de emissões em um contexto sem progresso tecnológico (CEP-2) no período de 100 anos

Exportações de bens de capital (trilhões de US\$)				
Cenários*	Europa	EUA	China	América Latina
CEB	1,515	1,800	1,177	0,413
CEP-2	1,509	1,792	1,167	0,412
Diferença	-0,006	-0,008	-0,010	-0,001

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

As exportações de bens de consumo apresentaram um comportamento semelhante. Nesse caso, o país com maior redução do fluxo das exportações foram os Estados Unidos (US\$ 0,12 trilhões), em seguida a China (US\$ 0,009 trilhões). A Europa e a América Latina tiveram uma redução percentual relativamente baixa comparada a dos outros países (Tabela 4).

Tabela 4 – Exportações médias de bens de consumo com redução geral de emissões em um contexto sem progresso tecnológico (CEP-2) no período de 100 anos

Exportações de bens de consumo (trilhões de US\$)				
Cenários	Europa	EUA	China	América Latina
CEB	0,643	1,359	1,111	0,725
CEP-2	0,640	1,347	1,102	0,723
Diferença	-0,003	-0,012	-0,009	-0,002

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

A política de redução de emissão, quando aplicada tanto aos países desenvolvidos quanto aos países em desenvolvimento, causou uma considerável

redução nos níveis de emissão para todos os países analisados. Os países desenvolvidos foram os que tiveram as maiores quedas em seus níveis de emissões com 2,53 e 2,31 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, respectivamente. A China teve seus níveis de emissões reduzidos em cerca de 1,88 milhões de toneladas. O volume caiu de 2,48 milhões de toneladas para 0,59 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. A América Latina, por sua vez, reduziu de 2,02 milhões de toneladas, no cenário ideal, para 0,82 milhões de toneladas, ou seja, uma redução de 1,19 milhões de toneladas ao longo do período analisado (Tabela 5).

Tabela 5 – Nível médio de emissões de CO<sub>2</sub> dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento no período de 100 anos

Nível médio de emissões (Milhões de toneladas de CO <sub>2</sub> )				
Cenários*	Europa	EUA	China	América Latina
CEB	2,80	3,23	2,48	2,02
CEP-2	0,27	0,91	0,59	0,82
Diferença	2,53	2,31	1,88	1,19

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

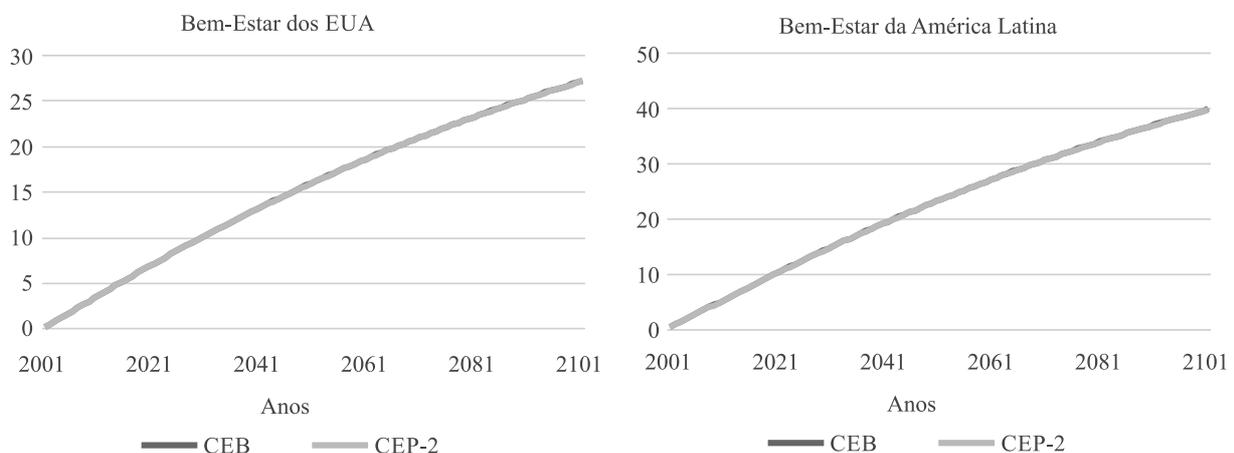
No caso das emissões, observou-se nas simulações uma defasagem entre a implementação da política e a queda brusca das emissões. Nesse caso, pode ser que nos primeiros períodos de simulação as regiões tenham obtido um alto saldo das permissões de emissões (expressão 42). Contudo, o uso de energia fóssil na produção consumiu os créditos

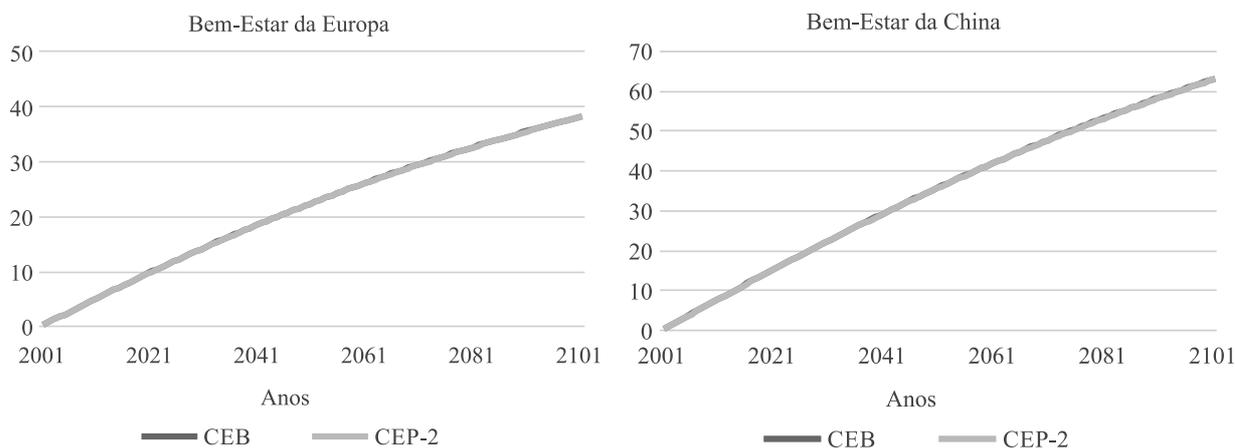
estipulados por essas permissões, de modo que os países foram obrigados a se ajustarem ao limite de emissões permitido.

Com esses resultados, tem-se a indicação de que a efetivação de um acordo mundial, envolvendo países com grande peso nas emissões mundiais, é o caminho mais promissor em termos de políticas climáticas. Mesmo na suposição de que não existe avanço na produtividade da mão de obra, a restrição nas emissões de CO<sub>2</sub> tem impacto pouco expressivo sobre o crescimento econômico, visto que os ganhos do comércio, aliados aos investimentos atuais em energia renováveis, representam uma fonte de crescimento muito mais expressiva do que o consumo de energia fóssil. Assim sendo, no âmbito do modelo proposto nesta pesquisa, pode-se afirmar que o crescimento sustentável é, do ponto de vista econômico, uma alternativa absolutamente factível, salvo interesse de grupos particulares que lucram com o consumo de energia fóssil.

Uma redução significativa no uso deste tipo de energia impõe restrições sobre a produção. Mas, com os resultados analisados nesta pesquisa, fica claro que as outras fontes do crescimento sobrepujam os efeitos das restrições ao uso de energia fóssil. Ao extrapolar a dimensão produtiva, indo para o campo do bem-estar, os efeitos da restrição são menos impactantes, quase desprezíveis, conforme indicam as trajetórias simuladas do indicador de bem-estar econômico mostradas na Figura 5. Nenhum dos países foi afetado de modo significativo. Em outros termos, a restrição com participação de todos os países em quase nada afetou a otimização temporal da função consumo das famílias nesses países.

Figura 5 – Comportamento do bem-estar das economias desenvolvidas e em desenvolvimento considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos





Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Cabe ressaltar que os benefícios ambientais gerados pela redução da concentração de gases de efeito estufa, responsável pela mudança climática, não foram integrados à análise. Contudo, conforme é bem sabido, são inúmeros os benefícios ambientais relacionados à redução da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera. E o bem-estar humano está relacionado não somente às variáveis de natureza econômica, mas também à disponibilidade dos serviços ecossistêmicos, a exemplo da provisão, regulação, suporte culturais etc. que avançam naturalmente com a melhoria da qualidade ambiental. Se fossem consideradas as externalidades positivas sobre o bem-estar econômico, com certeza haveria ganhos expressivos para todas as nações decorrentes de políticas climáticas de âmbito mundial.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração e aplicabilidade de políticas climáticas de mitigação dos gases de efeito estufa tem se confrontado com o dilema entre crescer e aumentar a concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, ou parar de crescer e estabilizar o nível de GEE presente na mesma. Somado a isso, considera-se também o custo que envolve a implementação das metas de redução de emissão e seus efeitos sobre o bem-estar.

Em tese, parece haver de fato um *trade off* entre crescimento e redução das emissões de GEE. Mas, estudos recentes têm apontado, dentre eles o presente, em outra direção, indicando a possibilidade de implementação de políticas de con-

trole de emissões sem grandes impactos sobre o crescimento econômico. O elemento-chave para esta conclusão reside no fato de que o avanço tecnológico, disseminado a partir do comércio internacional, juntamente com as tecnologias limpas que estão se difundindo, representa uma fonte de crescimento tão primordial quanto à oriunda do consumo de recursos fósseis.

Estas considerações finais, a qual diverge da crença comum de que a restrição do uso de energia fóssil pode barrar o crescimento econômico, é produto da aplicação de modelos de simulação que vêm se difundindo em economia ambiental. Esses modelos viabilizam a análise das complexas interações entre variáveis econômicas e ambientais, captando a dinâmica evolutiva entre as dimensões tecnológicas, comerciais e ambientais. Por conta dos resultados gerados por esses modelos, percebeu-se que as causalidades dinâmicas entre o comércio exterior e a produtividade poderiam minimizar o uso de energia fóssil como fonte de crescimento econômico.

As externalidades positivas da mitigação não foram incluídas na função de bem-estar econômico. Assim, levando em conta que a implementação de um acordo mundial não compromete sobremaneira o crescimento econômico e que o controle das emissões de GEE pode produzir benefícios sociais em várias dimensões, pode-se considerar que, do ponto de vista social, não faz sentido resistências contra as políticas de controle das emissões. Nesse sentido, esse tipo de política precisa ser incentivada e, priorizada na agenda governamental de qualquer país.

## REFERÊNCIAS

- BOSETTI, V.; CARRARO, C.; GALEOTTI, M.; MASSETTI, E.; TAVONI, M. International energy R&D *spillovers* and the economics of greenhouse gas atmospheric stabilization. **Energy Economics**, v. 30, p. 2.912-2.929, 2008.
- COSTA, M. A. B. **Simulação de sistemas**. São Carlos: UFSCar, 2002.
- DECHEZLEPRÊTRE, A.; MATTHIEU, G.; HASCIC, I.; JOHNSTONE, N.; MÉNIÈRE, Y. **Invention and transfer of climate change mitigation technologies on a global scale: a study drawing on patent data**. Disponível em: [http://eprints.lse.ac.uk/37590/1/Invention\\_and\\_transfer\\_of\\_climate\\_change\\_mitigation\\_technologies\\_on\\_a\\_global\\_scale\\_a\\_study\\_drawing\\_on\\_patent\\_data\(lsero\).pdf](http://eprints.lse.ac.uk/37590/1/Invention_and_transfer_of_climate_change_mitigation_technologies_on_a_global_scale_a_study_drawing_on_patent_data(lsero).pdf). Acesso em: 15 dez. 2014. 14:40:25
- EDMONDS, J.; CALVIN, K.; CLARKE, L.; KYLE, P.; WISE, M. Energy and technology lessons since Rio. **Energy Economics**, v.12, p. 7-14, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988312002071>. Acesso em: 16 dez. 2014. 13:35:45
- EDENHOFER, O.; BAUER, N.; KRIEGLER, E. The impact of technological change on climate protection and welfare: Insights from the model MIND. **Ecological Economics**, v. 54, n. 2, p. 277-292, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800905000376>. Acesso em: 17 dez. 2014. 15:12:40
- HOTELLING, H. The economics of exhaustible resources. **The Journal of Political Economy**, v. 39, n. 2, p. 137-175, 1931. Disponível em: [https://www.uio.no/studier/emner/sv/oekonomi/ECON4925/h16/pensumliste/hotelling\\_the-economics-of-exhaustible-resources.pdf](https://www.uio.no/studier/emner/sv/oekonomi/ECON4925/h16/pensumliste/hotelling_the-economics-of-exhaustible-resources.pdf). Acesso em: 17 dez. 2014. 14:20:20
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambio climático 2014: mitigación del cambio climático**. Contribución del grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Resumen para responsables de políticas. Disponível em: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WG3AR5\\_SPM\\_brochure](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WG3AR5_SPM_brochure). Acesso em: 10 jan. 2015. 11:15:20
- KEMFERT, C. Global economic implications of alternative climate policy strategies. **Environmental Science and Policy**, v. 5, p. 367-384, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462901102000461>. Acesso em: 10 jan. 2015. 09:00:00
- LEIMBACH, M.; BAUMSTARK, L. The impact of capital trade and technological *spillovers* on climate policies. **Ecological Economics**, v. 69, p. 2.341-2.355, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800910002648>. Acesso em: 15 dez. 2014. 10:12:30
- NAGASHIMA, M., DELLINK, E. R. **Technology spillovers and stability of international climate coalitions**. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10784-008-9079-1>. Acesso em: 15 dez. 2014. 09:10:25
- ROGNER, H. H. An assessment of world hydrocarbon resources. **Review of energy and the environment**, v. 22, n. 1, p. 217-262, 1997. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/228311225\\_An\\_Assessment\\_of\\_World\\_Hydrocarbon\\_Resources](https://www.researchgate.net/publication/228311225_An_Assessment_of_World_Hydrocarbon_Resources). Acesso em: 16 dez. 2014. 11:15:40
- SOLOW, R. M. On the intergenerational allocation of natural resources. **The Scandinavian Journal of Economics**, p. 141-149, 1986. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/3440280?seq=1>. Acesso em: 16 dez. 2014. 10:20:15
- SOUSA, L. V. C, FERNANDES, E. A. **Impacto do protocolo de Kyoto no crescimento econômico e no bem-estar: um estudo para o Brasil e os países do anexo I**. Viçosa: UFV, 2014.
- STIGLITZ, J. Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths. **The Review of Economic Studies**, v. 41, p. 123-137, 1974. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2296377?seq=1>. Acesso em: 16 dez. 2014. 09:10:20
- VERDOLINI, E., GALEOTTI, M. **At Home and abroad: an empirical analysis of innovation and diffusion in energy-efficient technologies**. Disponível em: <http://www.feem.it/userfiles/attach/2010171719154123-09.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2014.