

SIMULAÇÃO DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS E SEUS EFEITOS: UMA ANÁLISE DINÂMICA PARA O BRASIL E PAÍSES DO ANEXO I DO PROTOCOLO DE QUIOTO

Lucas Vitor de Carvalho Sousa¹

Elaine Aparecida Fernandes²

Evaldo Henrique da Silva³

Jader Fernandes Cirino⁴

O presente trabalho buscou avaliar as inter-relações entre políticas climáticas, *spillovers* tecnológicos, crescimento econômico e bem-estar para as seguintes regiões selecionadas: Brasil e países do anexo I do Protocolo de Quioto. Para isso, foi utilizada uma adaptação do Modelo de Investimento e Desenvolvimento Tecnológico (Mind-RS), que, por meio de simulações, permite analisar as principais variáveis que compõem o sistema econômico em um cenário de mudanças climáticas. Os resultados mostraram que para qualquer cenário de política climática, os custos de mitigação são irrisórios para o crescimento econômico e, sobretudo, para o bem-estar, e os *spillovers* tecnológicos podem reduzir ainda mais os custos de mitigação.

Palavras-chave: políticas climáticas; crescimento econômico; bem-estar; simulação.

SIMULATION OF CLIMATE POLICIES AND THEIR EFFECTS: A DYNAMIC ANALYSIS FOR BRAZIL AND ANNEX I COUNTRIES OF THE KYOTO PROTOCOL

This study aimed to evaluate the interrelationships between climate policies, technological spillovers, economic growth and welfare for the following selected regions: Brazil and Annex I countries of the Kyoto Protocol. For this, an adaptation of the Model of Investment and Technological Development (Mind-RS) was used, which through simulations allows us to analyze the main variables that make up the economic system in a scenario of climate change. The results showed that for any climate policy scenario, mitigation costs are insignificant for economic growth and, above all for the well-being, and technological spillovers can further reduce the costs of mitigation.

Keywords: climate policy, economic growth, welfare, simulation.

JEL: O44; Q54; Q55.

1 INTRODUÇÃO

As questões relacionadas às mudanças climáticas estão entre os assuntos mais discutidos na atualidade. Entretanto, ainda existe, de fato, um número pequeno de ações concretas voltadas para a mitigação de gases de efeito estufa (GEE). Isso tanto é verdade que os níveis de concentração de GEE aumentaram nos últimos tempos. Conforme o mais recente relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança

1. Universidade de Brasília. *E-mail:* <lucasvitor.cs@gmail.com>.

2. Universidade Federal de Viçosa. *E-mail:* <elaineafdil@gmail.com>.

3. Universidade Federal de Viçosa. *E-mail:* <ehsilva@ufv.br>.

4. Universidade Federal de Viçosa. *E-mail:* <jader.cirino@ufv.br>.

do Clima – IPCC (2013), desde o período pré-industrial, a concentração de gás carbônico na atmosfera aumentou cerca de 40%. Evitar o aumento desastroso da temperatura exigirá a redução e a estabilização dos níveis de emissões desses gases.

Entre os fatores antrópicos, a queima de combustíveis fósseis é a principal causadora das emissões, o que leva a um *trade-off* entre preservar o meio ambiente e manter o crescimento econômico. Ambos são fundamentais para o bem-estar, e priorizar algum em sacrifício do outro não parece ser a melhor alternativa. Diante dessa questão, o presente trabalho buscou analisar as inter-relações entre políticas climáticas, crescimento econômico, *spillovers* tecnológicos e bem-estar para as regiões Brasil e Países do Anexo I do Protocolo de Quioto.⁵

A escolha dessas regiões foi consequência das características inerentes a cada uma delas. O Brasil, apesar de ter uma matriz energética relativamente mais limpa, é um dos maiores emissores de GEE no mundo, pois além das emissões oriundas da mudança no uso do solo, as emissões do setor elétrico brasileiro também têm aumentado nos últimos anos. Em 2005, este setor representava apenas 16% das emissões totais de GEE no país, mas em 2010, esse percentual passou para 32%, valor próximo das emissões da agropecuária que está em torno de 35% (Seped, 2013). Em adição, os países do anexo I, além de serem os maiores responsáveis pelas emissões antrópicas desses gases, estão no foco das convenções globais sobre mudanças climáticas. Conhecer as relações entre essas duas regiões em consonância com as políticas climáticas pode colaborar para a melhor compreensão da realidade econômica em um cenário de aquecimento global.

O debate internacional quanto à mitigação de GEE costuma ter rodadas difíceis de negociação, predominando a polarização de interesses entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, em função dos compromissos distintos entre os países. De modo geral, mobilizam-se, de um lado, os países em desenvolvimento alegando que as responsabilidades são comuns, porém diferenciadas, visto que os desenvolvidos têm responsabilidades historicamente maiores nas emissões de GEE e deveriam, portanto, arcar com maiores custos de mitigação e de adaptação. Por sua vez, as nações desenvolvidas declaram que os países em desenvolvimento são responsáveis também por uma fração relevante das emissões e, por isso, deveriam dividir os custos.

Esse impasse perante as responsabilidades está ligado intimamente ao crescimento econômico. Alguns trabalhos argumentam que as políticas climáticas afetariam negativamente o crescimento econômico e a competitividade (Jaffe *et al.*, 1995;

5. De acordo com a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima – CQNUMC (2013), os países que fazem parte do anexo I são: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Bielorrússia, Bulgária, Canadá, Croácia, Chipre, República Checa, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Mônaco, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Reino Unido, Romênia, Rússia, Suécia, Suíça, Turquia e Ucrânia.

Feijó e Azevedo, 2006; Brännlund e Lundgren, 2009). No trabalho de Feijó e Azevedo (2006), por exemplo, concluiu-se, por meio de um modelo de Equilíbrio Geral Computável, que uma política climática sobre a Área de Livre Comércio das Américas (Alca) reduziria as emissões de CO₂ e afetaria negativamente o bem-estar econômico dos países que mitigaram suas emissões. Outros autores defendem que as mudanças tecnológicas reduziriam os custos de mitigação, tornando viáveis as políticas climáticas (Fischer e Newell, 2008; IEA, 2008; De La Torre, Fajnzylber e Nash, 2009; Mills, 2009). Por exemplo, Fischer e Newell (2008) constaram, por meio de simulações, que um portfólio de políticas climáticas que incentive o desenvolvimento tecnológico diminuiria as emissões de GEE a um custo significativamente mais baixo.

Diante desse contexto, o presente trabalho procurou, de forma geral, analisar os efeitos de políticas climáticas inspiradas no Protocolo de Quioto e em outras conferências globais, considerando a presença de *spillovers* tecnológicos, sobre o bem-estar e o crescimento econômico do Brasil e dos Países do anexo I. Especificamente, pretendeu-se: *i*) analisar a dinâmica econômica das regiões selecionadas na ausência de *spillovers* tecnológicos, com e sem compromissos de mitigação de GEE; e *ii*) analisar a dinâmica econômica das regiões selecionadas na presença de *spillovers* tecnológicos e com compromissos de mitigação de GEE impostos aos países do anexo I e ao Brasil.

A grande questão a ser respondida na presente análise foi então saber se, ao considerar *spillovers* tecnológicos, o bem-estar e o crescimento econômico do Brasil e dos países do anexo I em cenários de mitigação de GEE seriam comprometidos?

Para responder essa questão, foi utilizada uma variante do modelo de Leimbach e Baumstark (2010) que faz a ligação teórica e metodológica, por meio de simulações, entre políticas climáticas, crescimento econômico e bem-estar. Conhecer essa relação pode ajudar os agentes governamentais a tomarem decisões a respeito de como manter o crescimento econômico concomitantemente às questões ambientais, de forma a contribuir para o aumento do bem-estar das sociedades.

Embora existam trabalhos que tratam das relações entre políticas climáticas, crescimento econômico, tecnologia e bem-estar, uma análise quantitativa dinâmica dessa relação para a economia brasileira é um tema pouco explorado e importante. Pois pode sinalizar aos tomadores de decisão a melhor alternativa quanto ao uso dos recursos e os eventuais impactos econômicos de uma política climática. Deve-se ressaltar ainda que o presente estudo, diferentemente do modelo de Leimbach e Baumstark (2010), implementou grande parte das análises em tempo contínuo, o que é uma contribuição relevante, dado que em termos agregados as variáveis mudam continuamente, ainda mais quando se trata de questões ambientais.

Além disso, nesta análise não foi feito qualquer tipo de restrição quanto ao comércio internacional de bens de capital e de recursos energéticos.

O artigo contém, além desta introdução, mais cinco seções. A segunda discute o modelo de Ramsey, a terceira o modelo Mind-RS, a quarta a metodologia, a quinta os resultados, e a última faz as considerações finais.

2 O MODELO DE RAMSEY: O BEM-ESTAR E AS QUESTÕES AMBIENTAIS⁶

O modelo de Ramsey-Cass-Koopmans ou simplesmente modelo de Ramsey é semelhante ao modelo de Solow, mas as dinâmicas dos agregados econômicos são determinadas por decisões a nível microeconômico. As taxas de crescimento do trabalho e do conhecimento, assim como no modelo de Solow, são assumidas como dadas, porém, a evolução do estoque de capital é derivada da interação entre as maximizações de famílias e firmas em mercados competitivos. Como resultado, a taxa de poupança no modelo de Ramsey não é exógena e nem necessariamente constante.

As firmas competitivas alocam capital e contratam trabalho para produzir e vender produtos, e um número fixo de infinitas famílias fornecem trabalho, capital, consumo e poupança. O modelo de Ramsey desconsidera todas as imperfeições do mercado e todas as questões ligadas à heterogeneidade das famílias e suas ligações entre as gerações, dessa forma, o modelo fornece um caso de referência natural.

O modelo pressupõe que existe um número, e grande, de famílias idênticas e o tamanho de cada família cresce a uma taxa n . Cada membro das famílias oferta uma unidade de trabalho e as famílias alocam capital, qualquer que seja, nas próprias firmas. Por simplificação, não existe depreciação e as famílias dividem suas rendas em cada ponto do tempo entre consumo e poupança de forma a maximizar suas utilidades ao longo do tempo. A função de utilidade das famílias é dada pela expressão (1):

$$U = \int_{t=0}^{\infty} e^{-\rho t} u(C(t)) \frac{L(t)}{H} dt, \quad (1)$$

em que $C(t)$ é o consumo de cada membro da família no tempo t ; $u(C(t))$ é uma função de utilidade instantânea; $L(t)$ é o total da população; H é o número de famílias; $L(t)/H$ é o número médio de indivíduos presentes em cada família; $u(C(t)) L(t)/H$ é o total de utilidade instantânea da família no tempo t ; ρ é uma taxa de desconto, que quanto maior, menor é o consumo futuro das famílias relativo ao consumo presente; e U é o nível de utilidade ou de bem-estar total da família representativa no horizonte infinito de tempo.

6. Esta seção foi baseada em Romer (2006).

As firmas, por sua vez, empregam em cada ponto do tempo estoques de trabalho e capital pagam pelos seus produtos marginais e vendem o produto resultante. Como a função de produção possui retornos constantes e o mercado é competitivo, as firmas ganham lucro zero.

A família representativa, então, maximiza sua satisfação sujeita a sua restrição orçamentária, considerando suas interações com as firmas. As firmas pagam pelo trabalho e pelo capital fornecido pelas famílias, e as famílias consomem os produtos gerados pelas firmas. Dessa forma, o nível de satisfação ou bem-estar da família representativa está ligado ao consumo de produtos sujeitos à restrição orçamentária dada pelos ganhos obtidos por unidades de trabalho.

Entretanto, o modelo de Ramsey não leva em consideração os eventuais impactos do sistema produtivo e do consumo ao meio ambiente. A poluição causada pelo sistema produtivo pode, de fato, influenciar nos níveis de bem-estar dos indivíduos ou, no caso do modelo de Ramsey, pode influenciar o bem-estar da família representativa. No entanto, o nível de bem-estar calculado neste modelo depende exclusivamente do consumo de bens, que está intimamente ligado ao crescimento do produto, porém sem levar em consideração os impactos causados ao meio ambiente.

Os modelos de Edenhofer *et al.* (2005) e de Leimbach e Baumstark (2010) são tentativas recentes de incluir as questões ambientais, mais especificamente as políticas climáticas, ao âmbito econômico e a função de bem-estar, mesmo que indiretamente. A formulação teórica desses modelos baseia-se no Modelo de Investimento e Desenvolvimento Tecnológico (Mind), que permite analisar a relação entre diferentes medidas de preservação do meio ambiente e os custos de utilização de políticas específicas para esse fim, principalmente aquelas voltadas para os cuidados com o clima. Dessa forma, os modelos de Edenhofer *et al.* (2005) e de Leimbach e Baumstark (2010) são iniciativas que tentaram incluir ao bem-estar, mesmo que indiretamente, as questões ambientais ligadas às mudanças climáticas.

3 O MODELO MIND-RS

Leimbach e Baumstark (2010), a partir do modelo Mind construído por Edenhofer *et al.* (2005), desenvolveram um modelo de otimização intertemporal projetado para analisar cenários de políticas climáticas dentro de um mundo globalizado e caracterizado pela existência de *spillovers* tecnológicos. Esse modelo foi denominado Mind-RS, do tipo Ramsey Estilizado,⁷ e é um modelo multirregional composto pelos Estados Unidos, Europa, China e Resto do Mundo, implantado em tempo discreto.

7. Ou seja, o modelo Mind-RS foi baseado no modelo de Ramsey-Cass-Koopmans ou simplesmente modelo de Ramsey, em que as famílias procuram maximizar o bem-estar medido em termos de consumo *per capita*.

O Mind-RS adota do Mind a estrutura do sistema de energia (exceto sequestro de carbono e captura de tecnologia) e o investimento, incluindo o investimento em P&D, que representa a maior parcela da variação tecnológica endógena. Como um novo canal de mudança tecnológica, o modelo Mind-RS incorpora *spillovers* tecnológicos e adota como pressuposto que o *spillover* ocorre no sentido da região desenvolvida para a região em desenvolvimento. Além disso, a região desenvolvida exporta apenas bens de investimento (ou capital) e a região em desenvolvimento exporta apenas recursos energéticos. O objetivo, então, é maximizar o bem-estar econômico das regiões levando em consideração as decisões de consumo e investimento dos agentes representativos.

Diferentemente do modelo Mind, o Mind-RS separa o setor industrial agregado em bens/serviços de consumo e bens de investimento (ou capital), considera interações comerciais entre as regiões analisadas e desconsidera a possibilidade de mercados monopolísticos. Os fluxos comerciais representam variáveis de controle e estão ligados a uma restrição orçamentária intertemporal. A importação de capital estrangeiro, que aumenta a eficiência do uso de energia, representa uma opção de mitigação que se estende por todo o portfólio do modelo. O comércio bilateral e o *spillover* tecnológico são considerados endógenos.

O conceito de *spillover* tecnológico é fundamentado na ideia de que as externalidades tecnológicas, que ocorrem junto com o processo de acumulação de capital e conhecimento, retardam a diminuição dos retornos marginais do capital. Existem dois tipos de *spillovers* tecnológicos: *disembodied spillover* e *embodied spillover*. Os *disembodied spillovers* representam um tipo de alteração tecnológica impulsionada pela difusão internacional do conhecimento acumulado e livremente disponível, ou seja, referem-se ao conhecimento internacional como um bem público. Por outro lado, os *embodied spillovers* representam mudanças tecnológicas que são adicionadas ao *know-how* tecnológico incorporado em produtos estrangeiros ou inovações diretamente transferidas – patentes. Em outras palavras, os *embodied spillovers* referem-se a situações em que a presença de capital físico, produzido no exterior e importado, afeta os níveis de eficiência ou produtividade da economia anfitriã (Leimbach e Baumstark, 2010).

A contribuição do modelo Mind-RS é a inclusão dos *embodied spillovers* em distintos cenários de políticas climáticas. O conceito de *embodied spillovers*, neste modelo, é concebido como um processo de expansão de *know-how* tecnológico por importações de capital. Com a elevação da integração econômica por meio do comércio internacional e investimento direto estrangeiro, o crescimento da produtividade de um país não depende somente dos conhecimentos incorporados em sua própria tecnologia, mas também da tecnologia importada de seus parceiros comerciais.

Como resultado, a presença de *spillovers* melhora a eficiência do trabalho e a eficiência energética, o que acarreta em dois efeitos de custos de mitigação opostos. Enquanto o efeito de crescimento induzido pelo *spillover* tende a aumentar os custos de mitigação, a melhora da eficiência energética reduz os custos de mitigação. Dessa forma, quanto maior for a intensidade do *spillover* que aumenta a eficiência ou a produtividade energética, menores são os custos de mitigação das regiões.

Enfim, o Mind-RS é um modelo de crescimento multirregional que permite a análise de cenários de políticas climáticas na presença de comércio de capital e *spillovers* tecnológicos. Enquanto parte da heterogeneidade do mundo real é desconsiderada, o Mind-RS permite investigar os impactos da modelagem de *spillovers* tecnológicos *embodied* em um quadro de avaliação integrada construída em torno de um modelo de crescimento econômico do tipo Ramsey Estilizado. É importante ressaltar que o presente estudo utilizou a estrutura multirregional do modelo Mind-RS apresentada na seção seguinte.

4. METODOLOGIA

4.1. Modelo matemático

Neste estudo, foram analisadas duas regiões: uma em desenvolvimento, Brasil (como ofertante de recursos energéticos/naturais), e uma desenvolvida, países do anexo I (com alta produtividade do trabalho e eficiência energética). Supõe-se que o *spillover* ocorre no sentido da região desenvolvida para a região em desenvolvimento, ou seja, do anexo I para o Brasil. Diferentemente do modelo de Leimbach e Baumstark (2010), no presente trabalho, tanto a região desenvolvida quanto a região em desenvolvimento exporta bens de investimento e recursos energéticos. Para melhor entendimento do modelo, o quadro 1 resume os índices mais utilizados na modelagem.

QUADRO 1
Síntese dos índices utilizados no modelo

Índice	Variação	Definição
T	1, 2, ..., 100	Período de tempo
i, r	Brasil e anexo I	Regiões
$j (j \in J)$	$J = \{C, I, Q, P, f, ren, nf\}$	<i>Bens comercializáveis e setores:</i> C = bens de consumo; I = bens de investimento ou de capital; Q = energia fóssil ou setor de extração; P = permissões de emissão (comercializável); f = setor de transformação de energia fóssil; ren = setor de energia renovável; nf = setor de energia restante.
M	K, L, E, PE	<i>Fatores de produção:</i> K (capital), L (trabalho), E (energia final), PE (energia primária)

Adaptado de Leimbach e Baumstark (2010).

Para cada região, foram consideradas as decisões dos agentes representativos, ou seja, as decisões de consumo das famílias, de investimento das firmas e de comércio. O objetivo principal do modelo, então, foi maximizar o bem-estar, W , das regiões, neste estudo Brasil e países do anexo I, mensurado em termos de consumo *per capita* por meio da expressão (2).

$$W(i) = \int_{t=1}^T e^{-\sigma t} L(i,t) \ln\left(\frac{C(i,t)}{L(i,t)}\right) dt, \quad (2)$$

em que σ é uma taxa pura de preferência intertemporal,⁸ ou seja, uma taxa de desconto, L representa a população da região que fornece de forma exógena o fator de produção trabalho e C é o consumo.

Para alcançar esse objetivo, estimou-se o produto agregado, Y , que é igual à soma do produto dos setores de bens e serviços de consumo e de bens de investimento (ou de capital). Esse produto foi estimado por meio de uma função de produção CES conforme a expressão (3).

$$Y_j(i,t) = \phi_j(i) [\xi_K K_j(i,t)^{\rho(i)} + \xi_L (\theta_{Lj}(i,t) A_L(i,t) L(i,t))^{\rho(i)} + \xi_E (\theta_{Ej}(i,t) A_E(i,t) E(i,t))^{\rho(i)}]^{\frac{1}{\rho(i)}}, \quad (3)$$

em que ρ é o parâmetro de substituição, ξ_m é um parâmetro que representa o peso dos insumos no produto total, ϕ é a produtividade total dos fatores, K é o estoque de capital, A_L é a produtividade ou eficiência do trabalho, A_E é a produtividade ou eficiência energética e $\theta_{m,j}$ representa a parcela dos fatores de produção (participação do fator m no setor j), com $\theta_{m,C} = 1 - \theta_{m,I} \forall m \in \{L, E\}$.

O equilíbrio de mercado é caracterizado por $\theta_{L,j} = \theta_{E,j}$, ou seja, quando a participação do fator trabalho for igual à participação do fator energia no produto. As variáveis de produtividade estão sujeitas a investimentos em P&D (A_m), de acordo com Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) e Leimbach e Baumstark (2010), e também a *spillovers* tecnológicos [$sp_m(i,t)$], conforme a expressão (4).

$$\dot{A}_m(i,t) = \zeta_m(i) \left(\frac{rd_m(i,t)}{Y_C(i,t) + Y_I(i,t)} \right)^{\alpha_m} A_m(i,t) + sp_m(i,t) \quad \forall m \in \{L, E\}, \quad (4)$$

8. Taxa pura de preferência intertemporal, também conhecida como elasticidade de substituição intertemporal, mostra o consumo ao longo do tempo, ou seja, os indivíduos podem poupar mais no presente para consumir mais no futuro. Em geral, os indivíduos que possuem maior renda apresentam menor taxa de preferência intertemporal, ou seja, eles consomem menos no presente, pouparam parte dessa renda e aumentam o consumo futuro devido aos juros obtidos no período (Costa, 2011).

em que $\zeta_m(i)$ é a produtividade dos investimentos em P&D que melhora a eficiência do fator m , α_m é um parâmetro de eficiência que aumenta a importância do setor de P&D na produtividade dos fatores, Y_C é o produto no setor de bens de consumo e Y_I é o produto no setor de bens investimento (ou de capital). Assim, de acordo com a expressão (4), a produtividade dos fatores de produção (A_m) é uma relação entre os investimentos em P&D e o produto agregado, adicionada dos *spillovers*.

Os *spillovers* tecnológicos *embodied* aumentam tanto a produtividade do trabalho quanto a energética. Esse efeito *spillover* é induzido pela exportação de capital [$X_I(r,i)$] da região r para a região i , $\forall m \in \{L, E\}$ e ocorre quando a produtividade da região i for menor do que a da região r , ou, em outras palavras, quando a produtividade do Brasil for menor do que a do anexo I, de acordo com a expressão (5).

$$sp_m(i,t) = \begin{cases} \sum_r \left[\left(\frac{X_I(r,i,t)}{K_I(i,t)} \right)^\psi \Omega_m(A_m(r,t) - (A_m(i,t))) \right] : A_m(i,t) < A_m(r,t), \\ 0 : A_m(i,t) \geq A_m(r,t) \end{cases}, \quad (5)$$

em que ψ é uma medida de elasticidade do *spillover* de investimentos estrangeiros e Ω_m descreve a intensidade do *spillover*.

A disponibilidade interna de bens de consumo [$D_C(i,t)$] está restrita à produção doméstica de bens de consumo (Y_C), adicionada pelas importações [$X_C(r,i)$], e subtraída pelas exportações [$X_C(i,r)$], como pode ser visto na expressão (6).

$$D_C(i,t) = Y_C(i,t) + \sum_r X_C(r,i,t) - \sum_r X_C(i,r,t). \quad (6)$$

Diferentemente das demais variáveis, as importações são capazes de flexibilizar a restrição interna de bens de consumo. Para simplificar, omitem-se os custos de comércio que atualmente estão distribuídos no total das variáveis de importação.

A disponibilidade interna de bens de consumo é distribuída entre os setores de P&D do trabalho [$rd_L(i,t)$], P&D da energia [$rd_E(i,t)$] e para o próprio consumo [$C(i,t)$], conforme as expressões (7), (8) e (9).

$$C(i,t) = [sD_C(i)] * [D_C(i,t)] \quad (7)$$

$$Crd_L(i,t) = [sD_Crd_L(i)] * [D_C(i,t)] \quad (8)$$

$$Crd_E(i,t) = [sD_Crd_E(i)] * [D_C(i,t)], \quad (9)$$

em que $[C(i,t)]$, $[Crd_L(i,t)]$ e $[Crd_E(i,t)]$ são as quantidades de bens de consumo utilizadas em cada setor; $[sD_c(i)]$, $[sD_crd_L(i)]$ e $[sD_crd_E(i)]$ são percentuais exógenos da disponibilidade interna de bens de consumo alocados nesses setores. Esses percentuais foram obtidos por meio da otimização dinâmica, que ao maximizar o bem-estar encontraram-se tais valores.

Parte da produção de bens de consumo é exportada conforme a expressão (10).

$$X_c(i,r,t) = [1 - sY_c(i)] * Y_c(i,t), \quad (10)$$

em que $[sY_c(i)]$ é o percentual da produção de bens de consumo destinado ao mercado interno, também otimizado automaticamente.

A disponibilidade interna de bens investimento (de capital), D_I , representada pela expressão (11), é igual à produção doméstica de bens de capital (Y_I), mais as importações $[X_I(r,i)]$ e menos o que é usado pelos investidores estrangeiros $[X_I(i,r)]$, isto é, o que é exportado, menos o capital utilizado pelos investidores domésticos no setor de energia renovável $[I_{ren}(i,t)]$ e no setor de energia restante $[I_{nf}(i,t)]$. Os setores $[I_{ren}(i,t)]$ e $[I_{nf}(i,t)]$ não acumulam capital e utilizam o conceito de aquisição de capital, definido exogenamente.

$$D_I(i,t) = Y_I(i,t) + \sum_r X_I(r,i,t) - \sum_r X_I(i,r,t) - I_{ren} - I_{nf}. \quad (11)$$

Assim como no consumo, a disponibilidade de capital é distribuída para os setores de bens de consumo (C), de extração (Q), de transformação de energia fóssil (f) e para o próprio setor de produção de bens de investimento (I), conforme a expressão (12).

$$I_j(i,t) = [sD_{I,j}(i)] * [D_I(i,t)] \quad \forall j \in \{C, Q, f, I\}, \quad (12)$$

em que $I_j(i,t)$ é quantidade de capital destinado ao setor j e $[sD_{I,j}(i)]$ é o percentual exógeno da disponibilidade interna de capital alocado no setor j , que também foi encontrado por meio da otimização dinâmica com o intuito de obter o máximo de bem-estar.

Parte da produção de bens de investimento (capital) também é exportada conforme a expressão (13).

$$X_I(i,r,t) = [1 - sY_I(i)] * Y_I(i,t), \quad (13)$$

em que $[sY_j(i)]$ é o percentual da produção de bens de investimento destinado ao mercado interno, outra vez otimizado automaticamente.

A acumulação de capital em todos os setores, exceto os setores de energia renovável e de energia restante, segue o comportamento padrão conforme a expressão (14).

$$\dot{K}_j(i,t) = I_j(i,t) - [\delta_j(i)] * [K_j(i,t)] \quad \forall j \in \{C, I, Q, f\}, \quad (14)$$

em que $\dot{K}_j(i,t)$ se refere à formação de estoque de capital e δ_j é a taxa de depreciação do capital do setor j . Os setores responsáveis pela produção de energia no modelo estão representados no apêndice A, ao final do texto.

No que se refere às políticas climáticas, assume-se que é alocada para cada região um montante de permissão para emissão P (exógeno). Para cada unidade de recurso fóssil convertido dentro do setor de energia final, uma permissão de emissão é necessária. O comércio de emissões, X_p , fornece a oportunidade de compra e venda das mesmas. A restrição resultante para o uso dos recursos fósseis é dada pela expressão (15).

$$Q(i,t) + \sum_r (X_Q(r,i,t) - X_Q(i,r,t)) \leq P(i) + \sum_r (X_p(r,i,t) - X_p(i,r,t)), \quad (15)$$

em que $Q(i,t)$ denota a extração doméstica do recurso fóssil e X_Q denota a exportação e importação do recurso fóssil. Dessa forma, pode-se perceber que a restrição imposta pela expressão (15) é de que a disponibilidade interna de recurso fóssil (primeiro membro da expressão) deve ser menor ou igual ao saldo de permissão de emissões (segundo membro da expressão).

As exportações de permissão de emissões ocorrem de acordo com a expressão (16).

$$X_p(i,r,t) = [1 - sP(i)] * [P(i) + X_p(r,i,t)], \quad (16)$$

em que o termo $sP(i)$ é o percentual do total de permissões da região que deve ser utilizado internamente, também encontrado por meio da otimização dinâmica.

Contudo, as equações apresentadas mostram um problema de otimização multirregional com uma função objetivo para cada região. Os fluxos de comércio são ajustados automaticamente com o objetivo de encontrar o ótimo de Pareto que fornece benefícios comerciais para as regiões. O comércio e o investimento representam variáveis de controle que foram estimadas automaticamente pelo *software* Matlab/Simulink 2011. Assume-se que o efeito *spillover* ocorre quando os

agentes tomam suas decisões de investimento e comércio. Dessa forma, procura-se otimizar o bem-estar das regiões conforme a expressão (17).

$$\sum_i^r W(i, r) = \int_{t=1}^T e^{-\alpha t} L(i, r; t) \ln \left(\frac{C(i, r; t)}{L(i, r; t)} \right) dt. \quad (17)$$

4.2 Simulação e otimização dinâmica

As mudanças climáticas e o próprio sistema econômico estão intimamente ligados ao tempo, o que leva a uma análise dinâmica das relações entre economia e natureza. O modelo matemático apresentado é composto por equações diferenciais e em diferenças (sistema dinâmico) e, portanto, por um número relativamente grande de expressões, das quais algumas delas são não lineares, o que é uma característica comum em estudos sobre questões ambientais. Devido a essas características, utilizou-se, neste trabalho, o modelo de simulação que permitiu verificar o comportamento dinâmico e não linear das variáveis.

O modelo de simulação ou simplesmente simulação é um processo de construção de um modelo representativo do sistema real (modelo matemático) e, por conseguinte, a experimentação deste por meio de cenários. A análise dos resultados da experimentação revela a visão futura do sistema em estudo, auxiliando na tomada de decisão necessária no momento presente, o que contribui para uma melhor compreensão do sistema. A simulação é, portanto, a solução numérica das equações (diferenciais, em diferença ou ambas – modelo híbrido) do modelo que permite examinar como o sistema se comporta ao longo de um período de tempo em distintos cenários (Costa, 2002).

O sistema real, além de ser repleto de *feedbacks*, tende a apresentar maior complexidade, principalmente, pela sua natureza dinâmica e aleatória. A simulação permite incorporar tais características, reproduzindo em um computador o comportamento observado em um sistema real (Chwif e Medina, 2006). Dessa forma, a simulação é um dos instrumentos mais adequados para a análise e compreensão da realidade econômica em um panorama de mudanças climáticas.

Antes de analisar os resultados da simulação, é necessário calibrar o modelo, ou seja, definir um conjunto de valores para os parâmetros, incluindo os valores iniciais para as variáveis, que assegurem a representatividade do modelo. Esses valores devem ser coerentes com a teoria, evidências empíricas e/ou fatos estilizados. Entretanto, podem existir modelos que contêm parâmetros cujos valores não são conhecidos com precisão. Tais parâmetros variam ao longo de um determinado intervalo de valores, como os parâmetros percentuais apresentados no modelo matemático utilizado neste estudo. Sabe-se que os valores desses parâmetros variam

entre 0 e 1 ou entre 0% e 100%, no entanto, não se sabe exatamente qual o valor real deles. A solução para esse problema pode ser encontrada na otimização dinâmica.

A otimização dinâmica também conhecida como controle ótimo permite encontrar os valores desconhecidos desses parâmetros a partir de um problema de otimização em que uma função objetivo é maximizada ou minimizada sujeita a determinadas restrições (para mais detalhes ver Gandolfo, 2012). Especificamente neste estudo, a função objetivo maximizada foi a de bem-estar (expressão 17), e as restrições impostas foram de que os parâmetros percentuais variassem entre 0 e 1. O problema de otimização, então, simula interativamente o modelo até ajustar valores para os parâmetros que melhor atenderem os objetivos, isto é, de tal forma que o bem-estar alcance uma trajetória ótima. Dessa forma, foi utilizada a otimização dinâmica para definir os valores dos parâmetros percentuais.

4.3 Definição dos cenários

A possibilidade de construir cenários alternativos é mais um atributo que corrobora o uso da simulação neste estudo, pois permite analisar o impacto das políticas climáticas sobre o bem-estar das regiões em diferentes cenários. Assim, a simulação é uma ferramenta de análise *ex ante* de distintos cenários de políticas climáticas e suas eventuais consequências, o que possibilita economia de recursos e de tempo, além de indicar para os tomadores de decisão a melhor alternativa quanto ao uso dos recursos.

É fundamentalmente importante que os cenários sejam coerentes com a realidade econômica e com o ambiente em que as regiões analisadas estão inseridas. Dessa forma, na presente pesquisa foram construídos os seguintes cenários, conforme listados a seguir.

- 1) Cenário CR: no cenário de referência (CR) ou *benchmark* não existe restrição quanto às emissões de CO₂ e nem a presença de *spillovers* tecnológicos. Pretende-se, dessa forma, verificar a trajetória das variáveis sem qualquer influência externa, ou seja, a trajetória usual dos negócios. Para a análise desse cenário, foram desativados o parâmetro $sp_m(i,t)$ da expressão (4) e a expressão (15) para as duas regiões.
- 2) Cenário CR-S: com a finalidade de examinar a influência dos *spillovers* tecnológicos no desempenho econômico das regiões, foi definido um cenário comparativo denominado CR-S em que não há restrições quanto às emissões, porém há a presença de *spillovers* tecnológicos. Nesse cenário, foi desativada a expressão (15). Por outro lado, foi habilitado o parâmetro $sp_m(i,t)$ da expressão (4) para as duas regiões.

- 3) Cenário CPC-2: no cenário de política climática (CPC-2), tanto o anexo I quanto o Brasil devem cumprir metas de emissões, o que é coerente com o novo protocolo climático a ser debatido e desenvolvido em 2015. Além disso, não existe a presença de *spillovers* tecnológicos. Nesse cenário, a expressão (15) foi ativada para as duas regiões, mantendo-se desabilitado o parâmetro $sp_m(i,t)$ da expressão (4).
- 4) Cenário CPC-2S: por fim, com o intuito de analisar os eventuais efeitos dos *spillovers* tecnológicos sobre o desempenho econômico das regiões com a imposição de mitigação de GEE, foi construído o cenário de política climática (CPC-2S). Nesse cenário, há a presença de *spillovers* tecnológicos por meio da habilitação do parâmetro $sp_m(i,t)$ da expressão (4) e da ativação da expressão (15) para as duas regiões.

4.4. Fonte de dados

A proposta da simulação é produzir resultados que, quando analisados, identificarão aspectos importantes do sistema estudado. Mas, antes mesmo de realizar as simulações, são necessários valores iniciais para os parâmetros e também para as variáveis. Dessa forma, além dos valores dos parâmetros percentuais obtidos com a otimização dinâmica, foram obtidos valores para os demais parâmetros nos trabalhos empíricos de Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) e de Leimbach e Baumstark (2010), o que pode ser visto no quadro B.1 no apêndice B. Para os países do anexo I, os parâmetros selecionados foram *proxies* das regiões desenvolvidas (Europa e Estados Unidos) e, para o Brasil, foram utilizados como *proxies* os parâmetros referentes às regiões em desenvolvimento ou parcialmente em desenvolvimento (China e resto do mundo) do modelo de Leimbach e Baumstark (2010).

Com relação aos valores iniciais das variáveis, foi selecionado o ano 2000 como o período inicial. Os dados relativos ao produto interno bruto (PIB) em dólares (americanos) como *proxy* para o produto foram coletados na base de dados do Banco Mundial. A produção de petróleo foi utilizada como *proxy* para o setor de extração de recurso fóssil e encontra-se disponível na base de dados da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Os dados de importação e exportação foram coletados no Comtrade. Os valores iniciais das demais variáveis foram baseados no trabalho de Leimbach e Baumstark (2010).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Calibração: valores iniciais e resultado da otimização

Como visto na seção 4, o modelo proposto neste trabalho é composto por várias expressões dinâmicas e não lineares. Essas características fazem da simulação a

metodologia mais adequada para a análise do comportamento das variáveis do modelo. Os valores dos parâmetros utilizados foram apresentados no quadro B.1, que se encontra no apêndice B, e a tabela 1 apresenta os valores iniciais das variáveis utilizadas, no ano 2000, para as duas regiões em estudo.⁹

TABELA 1
Valores iniciais para o ano 2000¹

Variáveis em bilhões de US\$	Brasil	Anexo I
PIB (em trilhões de US\$)	0,644	25,331
População (em bilhões de habitantes)	0,174	1,231
Estoque de capital industrial	2740	24050
Estoque de capital no setor de consumo (<i>ad hoc</i>)	1500	8700
Estoque de capital no setor de energia fóssil	270	1500
Estoque de capital no setor de extração	220	1250
Exportações de bens de consumo	28,003	11,337
Exportações de recursos do setor de extração (em milhões de toneladas)	4,306	2,356

Fonte: Leimbach e Baumstark (2010), Banco Mundial (2013), OCDE (2013), Comtrade (2013).

Nota: ¹ As exportações de bens de consumo e de recursos do setor de extração correspondem somente às exportações de uma região para a outra. Isto é, o valor das exportações do Brasil referem-se apenas às exportações do Brasil para o anexo I, sem considerar as exportações do Brasil para outros países. O mesmo raciocínio vale para o valor das exportações do anexo I. De fato, de acordo com os dados do Comtrade, a balança comercial entre as duas regiões foi favorável ao Brasil.

Esse processo de alimentação do modelo com valores iniciais para as variáveis e os parâmetros para encontrar resultados plausíveis é denominado calibração. A calibração, como destacam Kydland e Prescott (1996), significa trabalhar os dados de tal forma que o modelo se aproxime da realidade tanto quanto possível, em um número limitado, mas claramente especificado de dimensões. Determinadas questões econômicas possuem respostas conhecidas, e o modelo em estudo precisa ser capaz de reproduzi-las, para que ele seja considerado confiável e adequado para responder às questões desconhecidas.

Evidentemente, a fundamentação empírica dos valores utilizados no processo de simulação torna o modelo mais adequado e aceitável. No entanto, nem sempre existem valores disponíveis ou evidências empíricas para determinados parâmetros e/ou variáveis utilizadas. Nessas situações, utilizou-se o Princípio da Correspondência de Samuelson, que atribui valores arbitrários para os parâmetros desconhecidos, mas de tal forma que esses valores consigam descrever o comportamento do modelo o mais próximo da realidade. Em outras palavras, esse Princípio é uma medida *ad hoc* para os parâmetros não conhecidos de modo que o modelo seja uma aproximação do mundo real.

9. Os valores iniciais para a produtividade do trabalho e para a eficiência (produtividade) energética foram, respectivamente, 0,65 e 4,34 para o Anexo I, e 0,435 e 1,595 para o Brasil, conforme *proxies* dos valores médios para Europa e Estados Unidos, e China e resto do mundo de Leimbach e Baumstark (2010). Além disso, devido a resultados inconsistentes com a realidade econômica, foi desconsiderada a depreciação do capital.

Além dos valores iniciais apresentados no quadro B.1 (ver apêndice B) e na tabela 1, a tabela 2 mostra os valores encontrados para os parâmetros percentuais mencionados na metodologia, por meio da otimização dinâmica. Os valores iniciais para o processo de otimização foram *ad hoc*, definidos em 0,5 ou 50% para todos os parâmetros percentuais.¹⁰ O objetivo da otimização foi encontrar o melhor valor para cada parâmetro de forma que o bem-estar de cada região fosse máximo.

TABELA 2
Valores encontrados para os parâmetros percentuais após a otimização¹

Parâmetro	Brasil	Anexo I	Descrição
$sYc(i)$	0,7947	0,8246	% da produção de bens de consumo alocado internamente
$sY(i)$	0,5	0,5	% da produção de bens de investimento alocado internamente
$sD_{II}(i)$	0,5	0,5	% da DI* de bens de investimento alocado no setor I
$sD_{IC}(i)$	0,5	0,5	% da DI de bens de investimento alocado no setor C
$sD_{If}(i)$	0,5	0,5	% da DI de bens de investimento alocado no setor f
$sD_c(i)$	0,8761	0,8743	% da DI de bens de consumo alocado no setor C
$sD_{rdI}(i)$	0,502	0,4988	% da DI de bens de consumo alocado no setor de P&D do trabalho
$sQ(i)$	0,5008	0,5014	% da produção doméstica de recursos fósseis alocado internamente
$sP(i)$	0,5	0,5	% do total de permissões de emissões alocado internamente

Fonte: Resultados da pesquisa.

Obs.: *Disponibilidade interna.

Nota: ¹ Em todos os setores, foi imposta uma restrição para que a soma dos parâmetros percentuais fosse igual a 100%. Além disso, o percentual da disponibilidade interna de bens de consumo alocado no setor de P&D da energia foi definido conforme a seguinte expressão: $sD_{rdE}(i) = 1 - [sDc(i) + sD_{rdI}(i)]$.

Como se pode observar na tabela 2, os parâmetros $sYI(i)$, $sD_{II}(i)$, $sD_{IC}(i)$, $sD_{If}(i)$ e $sP(i)$ não sofreram nenhuma alteração após o processo de otimização para ambas as regiões. De fato, após a análise de sensibilidade desses parâmetros, constatou-se que para qualquer valor do intervalo entre 0 e 1 não houve alteração no nível de bem-estar, dessa forma, optou-se por preservar os valores iniciais.

5.2 Cenários de Políticas Climáticas

5.2.1 Cenário CPC-2

A política climática adotada neste trabalho seguiu as mesmas diretrizes dos trabalhos de Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) e Leimbach e Baumstark (2010), ou seja, limitar a elevação da temperatura média global em no máximo 2°C acima do nível pré-industrial. Do ponto de vista técnico, foi utilizado o caminho de emissões ótimo que satisfaz essa restrição, conforme o modelo de Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005). A partir disso, encontra-se o montante de permissões de emissões que podem ser

10. Os valores iniciais são arbitrários e servem para que o processo de otimização seja iniciado.

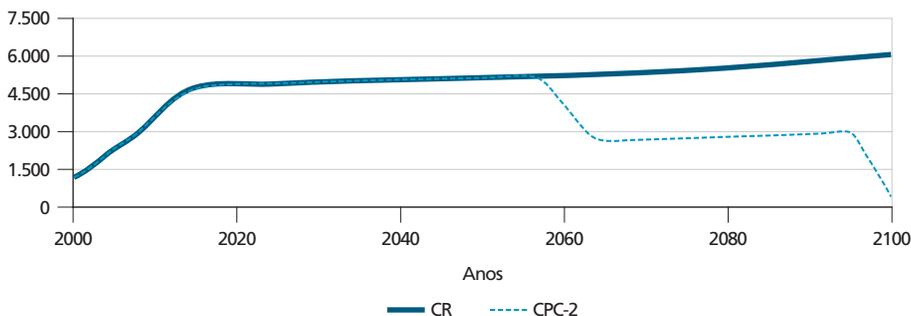
alocadas entre as regiões. Sendo assim, um montante de permissões comercializáveis foi alocado para cada região afim de que o aumento da temperatura média global não ultrapasse 2°C. Essa lógica foi adotada nos dois cenários de política climática adotados neste trabalho (CPC-2 e CPC-2S).

Basicamente a restrição imposta às regiões quanto às emissões de CO₂ deve satisfazer a expressão (15), ou seja, a disponibilidade interna de recurso fóssil deve ser menor ou igual ao saldo de permissão de emissões. Essa restrição segue o modelo apresentado na seção 4, que pressupõe que, para cada unidade de recurso fóssil produzida, uma unidade de CO₂ equivalente é emitida.

No primeiro cenário de política climática, CPC-2, tanto o anexo I quanto o Brasil devem cumprir metas de redução de emissões, o que é coerente com o novo protocolo climático, que será discutido em 2015, em que todos os países devem cumprir tais metas. É importante ressaltar que nesse cenário não foi incluído o efeito de *spillovers* tecnológicos. Como resultado, a imposição de permissões de emissões para o Brasil e o anexo I reduziria consideravelmente os níveis de emissões de CO₂ em comparação ao cenário CR (gráfico 1).

GRÁFICO 1

Evolução das emissões totais de CO₂ nas duas regiões nos cenários CR e CPC-2
(Em milhões de toneladas)



Fonte: Resultados da pesquisa.

De acordo com o gráfico 1, observa-se que o efeito da política climática no sentido de mitigar emissões de CO₂ só ocorreria por volta de 2050. Esse relativo atraso com relação ao efeito da política climática deve-se ao fato de o modelo assumir o comércio de permissões. Neste estudo, o recorte geográfico constitui-se de duas regiões, o Brasil e um conjunto de 42 países denominado anexo I. A base energética dos países do anexo I é formada principalmente por recursos fósseis, enquanto o Brasil possui uma matriz energética relativamente mais limpa. Como já mencionado, para cada unidade de recurso fóssil produzida uma unidade de CO₂ equivalente é emitida, e, por conseguinte, uma permissão de emissão é necessária.

Nesse contexto, a região composta pelos países do anexo I precisam de mais permissões do que o Brasil, e aquele montante de permissões que não é utilizado pelo Brasil é vendido para o anexo I.

Enquanto a produção total de recurso fóssil não ultrapassa o montante total de permissões, as emissões de CO₂ tendem a não declinar. Por outro lado, quando o montante de permissões torna-se insuficiente para manter a produção de recurso fóssil, os países são obrigados a substituir a matriz energética fóssil por uma matriz renovável ou não fóssil, a fim de manter suas produções de bens e serviços. É o que aconteceria com as emissões de CO₂ por volta de 2050 conforme o gráfico 1. Nesse ponto, a redução das emissões ocorreria principalmente pela mudança na estratégia de investimento de energia fóssil por fontes de energia renováveis e não fóssil (como a energia nuclear) induzida pela política climática. Em decorrência disso, fica evidente que uma política climática global é fundamental para a mitigação de GEE.

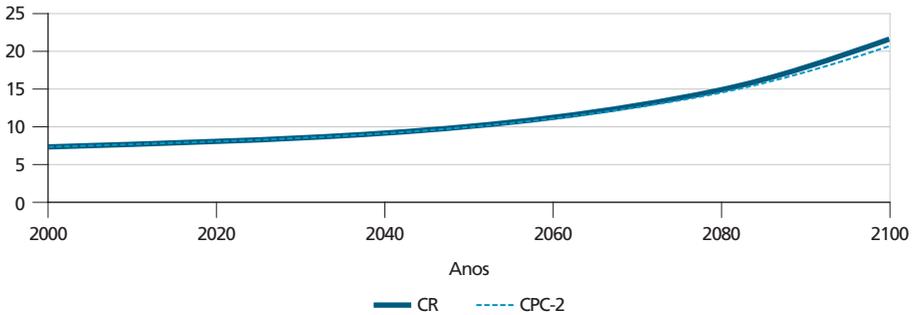
É importante destacar que a sensibilidade da política climática está intimamente ligada ao nível de restrição das emissões, ou seja, o montante de permissões alocado entre as regiões. Quanto maior a restrição, mais rápido é o efeito da política climática, o que demonstra robustez e eficácia dessa política.

O processo de “substituição” de uma matriz energética fóssil por uma renovável afetaria levemente o crescimento econômico brasileiro e o desempenho econômico do anexo I, como pode ser verificado nos gráficos 2 e 3. O PIB brasileiro seria 1,84% menor no cenário com política climática global, quando comparado ao cenário inicial (CR), ou seja, sem compromissos de mitigação (gráfico 2).¹¹ Para o Brasil, essas mudanças do padrão energético ocorreria no sentido de desestimular o consumo de combustíveis fósseis, como o uso do etanol e do biodiesel no lugar da gasolina e do óleo diesel, respectivamente. E para o anexo I seria uma transição de uma matriz energética fóssil para uma matriz renovável ou não fóssil, como a energia eólica, fotovoltaica e nuclear.

A política climática tem um custo médio baixo para o Brasil, apenas cerca de 0,002% ao ano (a.a.) (ou 1,84% no período como um todo). Contudo, é importante destacar que a política climática no modelo Mind-RS está ligada intimamente ao setor energético, uma vez que o setor agropecuário não é modelado. Essa limitação pode estar influenciando o baixo custo enfrentado pelo Brasil, dado que o setor agropecuário possui parcela relevante no PIB do país e também nas emissões de GEE.

11. O primeiro ano da simulação comportou-se como um choque em todos os cenários e variáveis analisados, dessa forma esse ano foi desconsiderado das análises.

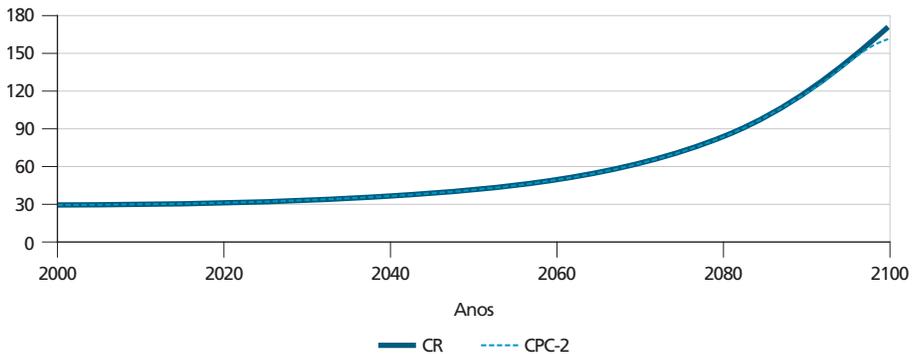
GRÁFICO 2
Comportamento do PIB brasileiro na presença de uma política climática global
(Em trilhões de US\$)



Fonte: Resultados da pesquisa.

Com relação ao anexo I, no cenário CPC-2 o desempenho do PIB dessa região tornou-se apenas 0,33% menor quando comparado ao cenário CR (gráfico 3). Esse resultado demonstra que uma política climática global, além de ser eficaz quanto à diminuição das emissões de GEE, também dividiria os custos de mitigação para todas as regiões.

GRÁFICO 3
Comportamento do PIB do anexo I na presença de uma política climática global
(Em trilhões de US\$)

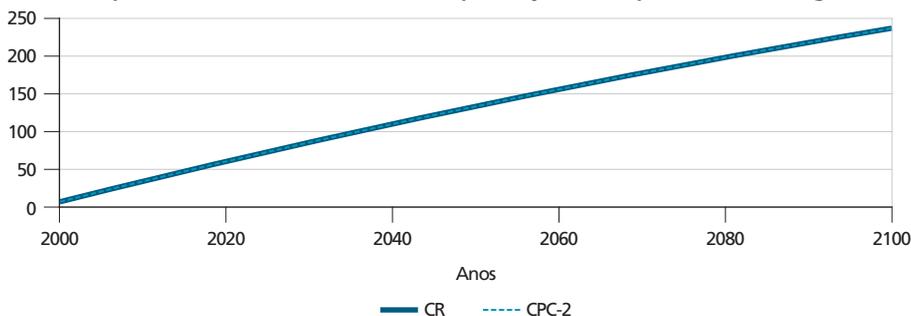


Fonte: Resultados da pesquisa.

De acordo com o gráfico 4, a política climática global de restrição de emissões de GEE não teria efeito sobre a trajetória do bem-estar total. Isso significa que uma política climática global de mitigação de GEE pode ser implementada sem perda para o bem-estar social. Ou melhor, as sociedades tendem a ganhar com um ar mais limpo e um planeta menos quente no longo prazo. Destaca-se que o valor

obtido para o bem-estar a cada ano não é importante, mas, sim, o comportamento do bem-estar ao longo do período.

GRÁFICO 4

Comportamento do bem-estar total na presença de uma política climática global

Fonte: Resultados da pesquisa.

5.2.2 Cenário CPC-2S

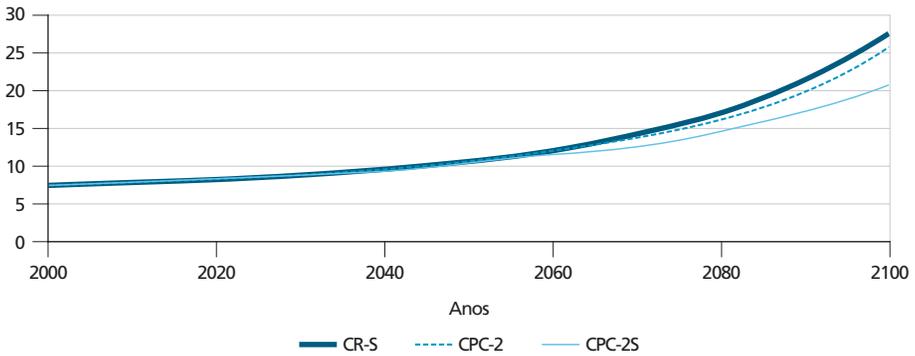
Como visto na seção anterior, as políticas climáticas afetam levemente o crescimento econômico das regiões, e, apesar dos ganhos ambientais e sociais de um planeta menos quente com um ar mais limpo, os tomadores de decisão podem tornar-se ainda mais avessos a uma política climática que afete negativamente o crescimento econômico. Uma solução para minimizar ainda mais os impactos econômicos da mitigação de GEE pode ser encontrada nos *spillovers* tecnológicos. Os *spillovers* podem influenciar positivamente a economia e, por conseguinte, podem atenuar os efeitos negativos de uma política climática global. Dessa forma, foi construído o cenário CPC-2S, em que além da implantação de uma política climática global (igual ao cenário CPC-2), há também a presença de *spillovers* tecnológicos.

Os gráficos 5 e 6 mostram o comportamento do PIB brasileiro e do anexo I, respectivamente, na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos. É importante lembrar que o *spillover* ocorre no sentido do anexo I para o Brasil. Dessa forma o desempenho econômico da região no anexo I no cenário CPC-2S é o mesmo quando comparado ao cenário CPC-2 (gráfico 6). De fato, os *spillovers* afetariam positiva e significativamente o desempenho da economia brasileira, como pode ser observado no gráfico 5.

A presença de uma restrição quanto às emissões altera as estratégias de investimento, que, por sua vez, reduz o uso de energia fóssil, o que afeta o desempenho econômico. Por outro lado, os *spillovers* tecnológicos aumentam a eficiência energética, contrabalanceando o impacto negativo da redução do consumo de energia fóssil. Isso tanto é verdade que, na presença de *spillovers* (cenário CPC-2S),

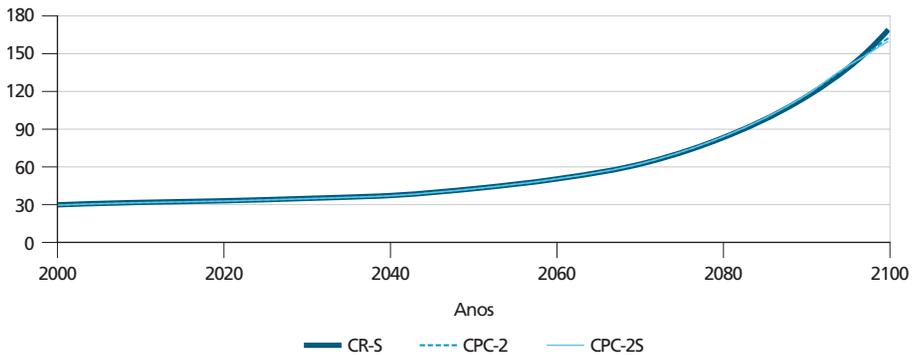
o PIB do Brasil tornar-se-ia 8,55% maior do que no cenário de política climática global sem *spillovers*, CPC-2 (gráfico 5).

GRÁFICO 5
Comportamento do PIB brasileiro na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos
(Em trilhões de US\$)



Fonte: Resultados da pesquisa.

GRÁFICO 6
Comportamento do PIB do anexo I na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos
(Em trilhões de US\$)

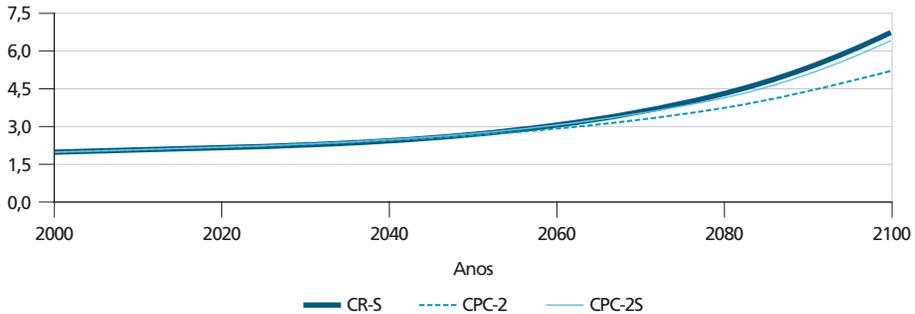


Fonte: Resultados da pesquisa.

Além do PIB, a presença de *spillovers* tecnológicos (cenário CPC-2S) também afetaria positivamente o comércio internacional brasileiro. As exportações de bens de capital cresceriam 7,92% e as exportações de bens de consumo se expandiriam 9,24%, quando comparadas ao cenário CPC-2 (gráficos 7 e 8).

GRÁFICO 7

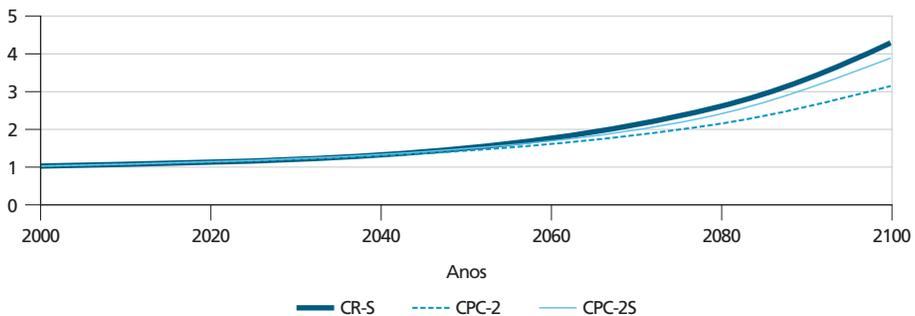
Exportações de bens de capital do Brasil na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos
(Em bilhões de US\$)



Fonte: Resultados da pesquisa.

GRÁFICO 8

Exportações de bens de consumo do Brasil na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos
(Em bilhões de US\$)

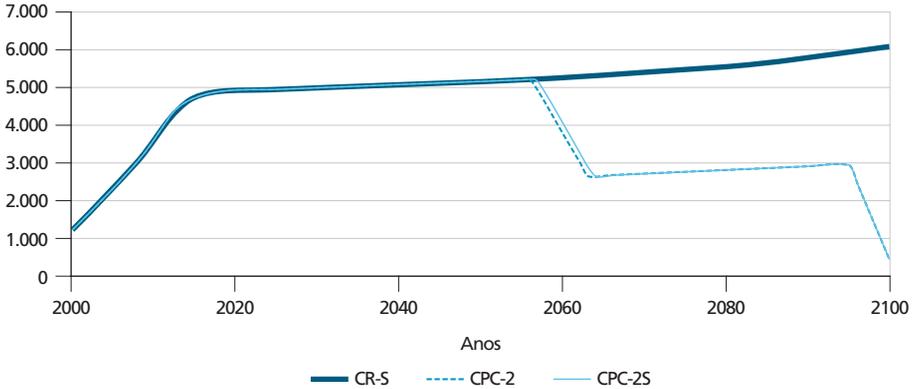


Fonte: Resultados da pesquisa.

O comércio internacional do anexo I no cenário CPC-2S teve o mesmo desempenho do cenário CPC-2. Por outro lado, são evidentes os impactos causados pelos *spillovers* tecnológicos no desempenho econômico brasileiro. Entretanto, é fundamentalmente importante que as políticas climáticas também provoquem a redução das emissões de GEE. O gráfico 9 mostra que mesmo na presença de *spillovers* (cenário CPC-2S) a política climática é eficaz, no médio prazo, quanto à mitigação de GEE, apresentando um resultado semelhante ao do cenário CPC-2. Antes da ruptura, ou seja, antes do impacto da política climática, as emissões de GEE cresceriam, em média, 5,47% a.a., com a implantação da política climática, as emissões diminuiriam a uma taxa média anual de 2,11%.

GRÁFICO 9

Emissões totais de CO₂ nas duas regiões, na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos
(Em milhões de toneladas)



Fonte: Resultados da pesquisa.

As semelhanças entre os cenários de política climática sem *spillovers* (CPC-2) e com *spillovers* (CPC-2S) aconteceram devido ao pressuposto inicial de que o *spillover* tecnológico ocorrer no sentido anexo I para o Brasil. Dessa forma, apenas o Brasil é influenciado diretamente pelos *spillovers*. Como as emissões do Brasil são inferiores quando comparadas ao anexo I, que é composto por 42 dos maiores países emissores de GEE no mundo, o impacto dos *spillovers* sobre as emissões globais são praticamente imperceptíveis. O fato de a política climática no cenário CPC-2S surtir efeito em meados do século ocorre pelas mesmas razões mencionadas anteriormente no cenário CPC-2.

Nota-se que o desempenho econômico e comercial das regiões seria relativamente maior na ausência de uma política climática e com *spillovers* tecnológicos (cenário CR-S). Pois, neste cenário, os países comportam-se livremente quanto ao uso de recursos fósseis, ou seja, sem nenhuma meta de mitigação de GEE.¹² Como não há nenhuma restrição e o ar atmosférico é considerado um bem público, a tendência é de que as emissões aumentem ao longo do tempo como é nítido no gráfico 9 (cenário CR-S). Assim não há qualquer incentivo para que as regiões se esforcem para mitigar suas emissões, mesmo com a influência de *spillovers* tecnológicos. Esse resultado demonstra que sem nenhum tipo de restrição, a tendência geral é de aumento das emissões e, por conseguinte, agravamento do processo de aquecimento global. Como salientam Barrett (2009) e Edmonds *et al.* (2012), apenas o progresso

12. No modelo deste trabalho foi desconsiderado qualquer tipo de compromisso voluntário quanto à mitigação de GEE. Essa formulação foi feita e é válida para todos os cenários de políticas climáticas, justamente, para avaliar os eventuais impactos dessas políticas sobre o crescimento e o bem-estar econômico das regiões.

técnico e medidas unilaterais não são suficientes para diminuir as emissões de GEE, o que envolve, conjuntamente, uma verdadeira revolução tecnológica e políticas de governo em escala global.

Nessa direção, é importante destacar que a política climática global seria eficaz quanto à mitigação de CO₂, o que no longo prazo pode reduzir significativamente a pressão antrópica no processo de aquecimento global. Como argumentam Leimbach e Baumstark (2010), os *spillovers* tecnológicos melhoram a eficiência energética e do trabalho, o que pode causar dois efeitos opostos de custos de mitigação. Enquanto o efeito de crescimento tende a aumentar os custos de mitigação, a melhora da eficiência energética os minimizam. A intensidade de ambos os efeitos desempenha um papel importante nos custos de mitigação.

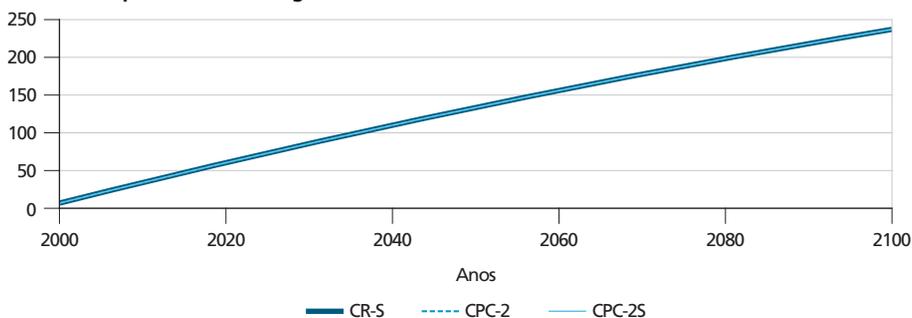
De acordo com os gráficos 5, 6, 7 e 8, apesar de o cenário CR-S apresentar um desempenho relativamente maior, os custos de mitigação são muito baixos quando comparados ao cenário de política climática CPC-2S. E, ao comparar este último com o cenário CPC-2, observa-se nitidamente a melhora no desempenho econômico e comercial das regiões, concomitantemente ao menor nível de emissões de CO₂ (gráfico 9). Esse resultado demonstra que, apesar de o desempenho das economias ser um pouco menor na presença da política climática global, o efeito *spillover* de minimização dos custos de mitigação é de fato possível, o que pode ser verificado ao comparar as trajetórias das variáveis econômicas nos cenários CPC-2 e CPC-2S. Em um contexto em que a política climática é a única opção, observa-se nitidamente que o cenário CPC-2S proporciona melhor desempenho econômico do que o cenário CPC-2, no qual não há *spillovers* tecnológicos. Em outras palavras, ao comparar os dois cenários de política climática (CPC-2 e CPC-2S), constata-se que os *spillovers* tecnológicos proporcionam maior crescimento econômico sem o incremento das emissões de CO₂.

Além disso, como pode ser visto no gráfico 10, o comportamento do bem-estar econômico não se alterou, independentemente, do cenário analisado. Isto é, a implantação de uma política climática global não influencia os níveis de satisfação econômica dos indivíduos. Na verdade, diminui significativamente as emissões de CO₂, o que pode influenciar positivamente o bem-estar não econômico.

Em geral, observa-se que uma política climática global com *spillovers* tecnológicos (cenário CPC-2S) pode ser a melhor alternativa para a mitigação de GEE. Além de essa política minimizar os eventuais efeitos negativos sobre o crescimento econômico, o bem-estar social não é reduzido, o que pode incentivar os tomadores de decisão a implantarem tal política climática.

GRÁFICO 10

Comportamento do bem-estar total na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos



Fonte: Resultados da pesquisa.

De forma geral, como mencionado na introdução, a literatura empírica é controversa com relação aos efeitos de políticas climáticas sobre o crescimento econômico. Mas os resultados encontrados neste trabalho são coerentes aos encontrados em trabalhos que adotaram metodologias semelhantes. No estudo de Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005), por exemplo, os autores concluíram que a incorporação de inovações tecnológicas em um portfólio de opções de mitigação pode reduzir significativamente os custos associados às políticas climáticas. No cenário de proteção do clima, em que se leva em consideração as inovações tecnológicas, a possibilidade de sequestro de carbono, entre outras alternativas de mitigação, os autores encontraram um custo muito baixo de mitigação, cerca de 0,81% do PIB mundial.

O próprio estudo de Leimbach e Baumstark (2010), que serviu de base para este trabalho, também encontrou resultados semelhantes. No cenário de cooperação climática com *spillovers* tecnológicos, os custos de mitigação variaram entre 1% e 5%, dependendo da região analisada. Em geral, as regiões menos desenvolvidas apresentaram maiores custos de mitigação, pois estão em um ritmo de crescimento mais elevado do que as regiões desenvolvidas.

Outros trabalhos, além dos já mencionados na introdução, também chegaram a conclusões semelhantes, como os trabalhos de Popp (2004) e Stern (2006). Popp (2004) aprimorou um modelo dinâmico de crescimento econômico global e mudanças climáticas ao incorporar inovação tecnológica endógena. Os resultados da simulação mostraram que políticas de incentivo ao desenvolvimento tecnológico podem reduzir o custo de qualquer estratégia de mitigação. No entanto, é fundamental que tais políticas sejam acompanhadas de políticas restritivas de emissões de GEE para enfrentar, de fato, o processo de aquecimento global. Stern (2006), por sua vez, ao utilizar modelos macroeconômicos de avaliação integrada, que estimam os

impactos econômicos das mudanças climáticas, concluiu que as mudanças climáticas podem reduzir o PIB global em até 20%, caso as emissões não sejam combatidas. Por outro lado, combatê-las importaria em um custo de cerca de 1% do PIB global.

Como visto, os resultados encontrados nesta pesquisa são coerentes com a literatura empírica a respeito das relações entre crescimento econômico e mitigação de GEE. Contudo, é importante salientar que o presente trabalho apresenta algumas limitações, como a necessidade de melhores *proxies* para os parâmetros relacionados ao Brasil, o setor agropecuário não foi incorporado ao modelo, ausência dos eventuais benefícios quanto à mitigação de GEE na função de bem-estar, ausência de possibilidade de sequestro de carbono, entre outras. Isso significa que muito ainda deve ser feito quando o assunto é política climática e bem-estar. Extensões deste estudo podem levar em consideração novas funções de bem-estar e de produção que se aproximam, com mais ênfase, da realidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os efeitos das políticas climáticas no crescimento econômico e no bem-estar tem sido um tema atual e controverso nas pesquisas acadêmicas. As análises que em princípio se concentravam globalmente expandiram-se para níveis regionais e setoriais e passaram a incluir outros fatores para uma melhor compreensão do fenômeno estudado. O fato de diferentes regiões apresentarem distintos níveis de produtividade do trabalho e de eficiência energética conduz a análises mais detalhadas dos impactos desses fatores na economia ao considerar a implantação de políticas climáticas.

Este estudo teve como recorte geográfico duas regiões: Brasil e países do anexo I. A primeira região, considerada em desenvolvimento, é grande ofertante de recursos energéticos/naturais e a segunda região, considerada desenvolvida, possui alta produtividade do trabalho e eficiência energética. O diferencial de produtividade das regiões pode influenciar a economia menos desenvolvida por meio do comércio internacional de bens de capital.

Quando o Brasil importa bens de capital dos países do anexo I, as mudanças tecnológicas incorporadas ao capital físico estrangeiro refletem nos níveis de produtividade da economia brasileira. Esse efeito é conhecido como *spillover* tecnológico e melhora o *know-how* tecnológico brasileiro. De fato, os *spillovers* aumentaram a produtividade do trabalho e a eficiência energética do Brasil, o que refletiu positivamente em seu desempenho econômico.

Não obstante, os pontos centrais dessa pesquisa foram os efeitos das políticas climáticas no crescimento econômico e no bem-estar das regiões estudadas. O cenário de política climática global mostrou-se eficaz quanto à mitigação de GEE, reduzindo significativamente as emissões de CO₂. Além disso, tal política

possibilitou dividir os custos da mitigação entre as regiões, sem afetar os níveis de bem-estar social. Resultado semelhante foi encontrado no cenário de política climática global com *spillovers* tecnológicos. Por outro lado, como os *spillovers* aumentam a eficiência energética, o efeito negativo sobre crescimento econômico foi minimizado significativamente, o que permitiu que a economia brasileira crescesse mais, mesmo com a imposição de uma política climática.

É importante destacar a necessidade de melhores *proxies* para os parâmetros do Brasil e a inclusão do setor agropecuário ao modelo de simulação. Embora os resultados encontrados neste estudo sejam coerentes com a literatura, essas limitações podem estar influenciando o baixo impacto da política climática sobre o Brasil. Além disso, a função de bem-estar analisada não levou em consideração os benefícios decorrentes ao evitar os possíveis danos provocados pela mudança climática. Dessa forma, um estudo mais detalhado a respeito desses eventuais benefícios e a inclusão desses benefícios na função de bem-estar pode levar a uma análise mais rebuscada da realidade econômica em um cenário de mudanças climáticas.

De forma geral, e levando em conta as limitações presentes no modelo estudado, os resultados mostraram que uma política climática global é fundamental para a mitigação de GEE. Os impactos econômicos dessa política foram irrisórios e podem ser minimizados ainda mais pelos *spillovers* tecnológicos. Os ganhos ambientais e sociais de um planeta menos poluído e quente são substanciais. Nesse sentido, os resultados revelaram que o *trade-off* não está entre a preservação ambiental e o crescimento econômico, mas, sim, entre a inovação política e a comodidade do *status quo*. Assim, é necessária uma mudança de paradigma de crescimento a qualquer custo para o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

- BANCO MUNDIAL. World Bank. **World Development Indicators**. 2013.
- BARRETT, S. The Coming Global Climate Technology Revolution. **The Journal of Economic Perspectives**, v. 23, n. 2, p. 53-75, 2009.
- BENHABIB, J.; RUSTICHINI, A. Vintage capital, investment, and growth. **Journal of Economic Theory**, v. 55, n. 2, p. 323-339, 1991.
- BRÄNNLUND, R., LUNDGREN, T. Environmental policy without costs? A review of the Porter hypothesis. **International Review of Environmental and Resource Economics**, v. 3, n. 2, p. 75-117, 2009.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. São Paulo: Ed. dos Autores, 2006. 524p.

COMTRADE – UNITED NATIONS INTERNATIONAL TRADE STATISTICS DATABASE. **UN Comtrade Database**, 2013.

COSTA, A. A. B. **A relação intertemporal entre educação e consumo: os consumidores mais escolarizados são os mais pacientes?** Belo Horizonte: Cedeplar, UFMG, 2011.

COSTA, M. A. B. **Simulação de sistemas**. Departamento de Engenharia de Produção. São Carlos: UFSC, 2002.

CQNUMC – CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. 2013. Disponível em: <goo.gl/PbGKsH>. Acesso em: 30 jun. 2013.

DE LA TORRE, A.; FAJNZYLBER, P.; NASH, J. D. **Low carbon, high growth: Latin American responses to climate change-an overview**. World Bank Publications, 2009.

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.

EDMONDS, J. *et al.* Energy and technology lessons since Rio. **Energy Economics**, 2012.

FEIJÓ, F. T.; AZEVEDO, A. F. Z. Comércio e meio ambiente: políticas ambientais e competitividade no âmbito da Alca. **Economia Aplicada**, v. 10, n. 4, p. 561-587, 2006.

FISCHER, C.; NEWELL, R. G. Environmental and technology policies for climate mitigation. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 55, n. 2, p. 142-162, 2008.

GANDOLFO, G. **Economic dynamics**: study edition. 4. ed. Springer, 2012.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Worldwide trends in energy use and efficiency**: key insights from IEA indicator analysis. Paris: International Energy Agency, 2008.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013**: the physical science basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Summary for Policymakers, 2013.

JAFFE, A. B. *et al.* Environmental regulation and the competitiveness of US manufacturing: what does the evidence tell us? **Journal of Economic Literature**, v. 33, n. 1, p. 132-163, 1995.

KYDLAND, F. E.; PRESCOTT, E. C. The computational experiment: an econometric tool. **The Journal of Economic Perspectives**, v. 10, n. 1, p. 69-85, 1996.

LEIMBACH, M.; BAUMSTARK, L. The impact of capital trade and technological spillovers on climate policies. **Ecological Economics**, v. 69, n. 12, p. 2341-2355, 2010.

MILLS, E. **Building Commissioning**: a golden opportunity for reducing energy costs and greenhouse gas emissions. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.

OCDE – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD.Stat**. 2013.

POPP, D. ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 48, 742-768, 2004.

ROGNER, H. H. An assessment of world hydrocarbon resources. **Annual review of energy and the environment**, v. 22, n. 1, p. 217-262, 1997.

ROMER, D. **Advanced Macroeconomics**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2006, 651p.

SEPED – SECRETARIA DE POLÍTICAS E PROGRAMAS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, 2013.

STERN, N. **Stern review**: the economics of climate change. 2006. Disponível em: <goo.gl/dwaKqQ>. Acesso em: 13 de out. 2014.

APÊNDICE A

EXPRESSÕES DO SETOR DE ENERGIA DO MODELO MIND-RS

A.1. Setor de Energia Final

Nessa subsecção assim como nas que se seguem, foi descrito o comportamento dinâmico do setor energético, composto pelos setores de energia fóssil, renovável e não fóssil.

O setor de produção de energia final $[E(i,t)]$ é o somatório da produção de energia dos setores fóssil $[E_f(i,t)]$, renovável $[E_{ren}(i,t)]$ e de outras fontes $[E_{nf}(i,t)]$, conforme a expressão (18). As outras fontes de energia referem-se à energia nuclear, hídrica e biomassa.

$$E(i,t) = E_f(i,t) + E_{ren}(i,t) + E_{nf}(i,t). \quad (18)$$

Para o setor de energia fóssil, a produção final é dada pela expressão (19), que é uma função de produção CES.

$$E_f(i,t) = \Phi_f(i) [\xi_K^f K_f(i,t)^{\rho_f} + \xi_{PE}^f (D(i) * PE(i,t))^{\rho_f}]^{\frac{1}{\rho_f}}, \quad (19)$$

em que $\Phi_f(i)$ é a produtividade total dos fatores do setor de energia fóssil da região i ; ξ_K^f é o peso do fator capital no setor de energia fóssil; $K_f(i,t)$ é o estoque de capital do setor de energia fóssil na região i no tempo t ; ρ_f é o parâmetro de substituição do setor de energia fóssil; ξ_{PE}^f é o peso do fator energia primária fóssil no setor de energia fóssil; $D(i)$ é a eficiência do fator energia primária fóssil na região i ; e $E(i,t)$ é o fator de energia primária fóssil para a região i no tempo t .

Para o setor de energia renovável, a energia final é produzida com base em *vintages capital*¹³ (V) ativos e a carga de fatores (l) acumulados no passado, conforme a expressão (20).

$$E_{ren}(i,t) = \sum_{\tau} l(t-\tau) V(i,t-\tau) w(\tau), \quad (20)$$

em que τ são passos de tempo; w é um fator de ponderação (um peso) que representa a parte ainda ativa dos *vintages* da produção de energia renovável. Cada *vintage capital*

13. Modelos de *vintage capital* são caracterizados por taxas de depreciação não exponenciais e podem incorporar *learning-by-doing*. Em outras palavras, uma economia tem *vintage capital* se suas máquinas e equipamentos pertencentes a gerações separadas possuírem distintas produtividades, ou seja, diferentes taxas de depreciação para distintos períodos (Benhabib e Rustichini, 1991).

está em função dos investimentos em energia renovável (ver expressão 29), e a produção final nesse setor difere-se dos demais por utilizar o conceito de aquisição de capital.

A.2. Setor de Extração de Recurso Fóssil

A energia primária nesse setor é representada pela expressão (21).

$$PE(i,t) = k(i,t) * \left[Q(i,t) - \sum_r (X_Q(i,r,t) - X_Q(r,i,t)) \right], \quad (21)$$

em que Q é a extração de recurso fóssil; $X_Q(i,r,t) - X_Q(r,i,t)$ são as exportações líquidas de recursos fósseis; e k é o fator de conversão de carbono em joule.

A extração de recurso fóssil está sujeita a uma restrição de capacidade que é dada pela expressão (22).

$$Q(i,t) * mC(i,t) = k(i,t) * K_Q(i,t), \quad (22)$$

em que mC é o custo marginal de extração (ou seja, o preço do recurso); $k(i,t)$ representa a produtividade do estoque de capital no setor de extração da região i no tempo t ; e K_Q é o estoque de capital do setor.

A disponibilidade interna de recursos fósseis [$D_Q(i, t)$] é a soma da produção doméstica com as exportações líquidas desses recursos de acordo com a expressão (23).

$$D_Q(i,t) = Q(i,t) + \sum_r X_Q(r,i,t) - \sum_r X_Q(i,r,t). \quad (23)$$

O recurso fóssil não utilizado internamente é exportado conforme a expressão (24).

$$X_Q(i,r,t) = [1 - sQ(i)] * Q, \quad (24)$$

em que $sQ(i)$ é o percentual da produção doméstica de recursos fósseis destinado à disponibilidade interna e encontrado por meio da otimização dinâmica.

O custo marginal de extração é derivado da curva de Rogner¹⁴ e dado pela expressão (25).

$$mC(i,t) = 1 + \frac{\chi_2(i)}{\chi_1(i)} \left(\frac{cQ(i,t)}{\chi_3(i)} \right)^{\chi_4}, \quad (25)$$

em que $X_1(i)$, $X_2(i)$ e $X_3(i)$ são parâmetros da curva de custo marginal de extração da região i ; X_4 é um parâmetro de custo marginal da curva de extração; cQ é a quantidade acumulada de extração que é definida pela expressão (26).

$$cQ(i,t+1) = cQ(i,t) + zQ(i,t), \quad (26)$$

em que z denota passos de tempo.

A produtividade do estoque de capital do setor de extração está sujeita ao “*learning-by-doing*” conforme a expressão (27).

$$\kappa(i,t+1) = \kappa(i,t) \left[1 + \kappa(i)_{\max} - \kappa(i,t) \left(\frac{z\nu(i)}{\kappa(i)_{\max}} \left(\left(\frac{Q(i,t)}{Q(i,0)} \right)^\mu - 1 \right) \right) \right], \quad (27)$$

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

O total de emissões antropogênicas de CO₂, EM , é dado pela expressão (28).

$$EM(t) = \sum_i Q(i,t) + LU(t), \quad (28)$$

em que $Q(i,t)$ representa a emissão originária da queima de combustíveis fósseis e $LU(t)$ é a emissão proveniente da mudança no uso do solo. Pressupõe-se que, para cada unidade de recurso fóssil produzida, uma unidade de CO₂ é emitida.

14. A curva de Rogner descreve os custos de extração em relação à quantidade extraída, sem a distinção entre recursos e reservas. Esses custos dependem do custo de extração em si, das possibilidades de substituição entre os diferentes combustíveis fósseis e do progresso tecnológico. Em outras palavras, a curva de Rogner pode ser entendida da seguinte forma: a descoberta de novos recursos neutraliza o esgotamento dos já existentes, por outro lado, quanto mais unidades de um recurso fóssil forem extraídas, maior será a escassez desse recurso e, por conseguinte, maiores serão os custos de extração (Rogner, 1997).

A.3. Setor de Energia Renovável

O *vintage capital* está em função dos investimentos em energia renovável e dos custos desses investimentos, o que pode ser visto pela expressão (29):

$$V(i, t+1) = z \frac{I_{ren}(i, t)}{fC(i) + k'(i, t)}, \quad (29)$$

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

Assim como no setor de extração, existe no setor de energia renovável, variação tecnológica endógena. Essa é baseada na acumulação de capacidade instalada cN , de acordo com a expressão (30).

$$cN(i, t) = cN(i, t-1) + V(i, t). \quad (30)$$

Por fim, a produtividade do setor de energia renovável muda de acordo com os custos de investimento dado pela expressão (31):

$$k'(i, t) = k'(i, 0) \left(\frac{cN(i, t)}{cN(i, 0)} \right)^{-\gamma(i)}, \quad (31)$$

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

APÊNDICE B

PARÂMETROS E VARIÁVEIS DO MODELO

QUADRO B.1

Valores dos parâmetros e suas respectivas fontes¹

Símbolo	Parâmetro	Brasil	Anexo I	Fonte
σ	Taxa de desconto intertemporal	0,01	0,01	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
$\rho(i)$	Parâmetro de substituição no setor de bens de consumo e investimento	0,3	0,4	Leimbach e Baumstark (2010)
ρ^f	Parâmetro de substituição no setor de energia fóssil	0,3	0,3	Leimbach e Baumstark (2010)
ξ_m	Peso do fator m na função de produção agregada	K = 0,30 L = 0,66 E = 0,04	K = 0,30 L = 0,66 E = 0,04	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
ξ_{mf}	Peso do fator m no setor de energia fóssil	0,5	0,5	Leimbach e Baumstark (2010)
$\Phi_j(i)$	Produtividade Total dos Fatores no setor j (I e C) na região i	0,330	0,395	Leimbach e Baumstark (2010)
$\Phi_f(i)$	Produtividade Total dos Fatores no setor de energia fóssil na região i	3,55	3,47	Leimbach e Baumstark (2010)
$D(i)$	Eficiência da energia primária da região i	0,5	0,5	<i>ad hoc</i>
$\zeta_m(i)$	Produtividade dos investimentos em P&D na melhora da eficiência do fator m na região i	L = 0,105 E = 0,130	L = 0,105 E = 0,130	<i>ad hoc</i>
α_m	Parâmetro de eficiência que aumenta a importância da P&D	L = 0,05 E = 0,01	L = 0,05 E = 0,01	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
ψ	Elasticidade do <i>spillover</i>	0,6	0,6	É um valor < 1 conforme Leimbach e Baumstark (2010)
Ω_m	Intensidade do <i>spillover</i>	0,15	0,15	Leimbach e Baumstark (2010)
$K_{max}(i, t)$	Máxima produtividade do setor de extração	3,22	3,22	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
$k(i, t)$	Coefficiente de conversão na região i no tempo t	0,5	0,5	<i>ad hoc</i>
$\nu(i)$	Inverso da taxa de aprendizagem no setor de extração de recursos	1/0,11	1/0,14	Leimbach e Baumstark (2010)
μ	Fator de amortecimento da aprendizagem	0,4	0,4	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
$\chi_1(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	113	113	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
$\chi_2(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	700	700	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
$\chi_3(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	3500	3500	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
χ_4	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	4	4	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
$l(t)$	Fator de carga dos <i>ventages</i> da produção de energia renovável	0,5	0,5	<i>ad hoc</i>
$w(t)$	Fator de ponderação que representa a parte ainda ativa dos <i>ventages</i> da produção de energia renovável (4 lags)	Lag 1 = 1 Lag 2 = 0,85 Lag 3 = 0,7 Lag 4 = 0,5	Lag 1 = 1 Lag 2 = 0,85 Lag 3 = 0,7 Lag 4 = 0,5	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
$fC(i)$	Custo mínimo do investimento	500	500	Endenhofer Bauer, Kriegler (2005)
$\gamma(i)$	Taxa de aprendizagem	0,11	0,14	Leimbach e Baumstark (2010)

Elaboração dos autores, com base em dados contidos nos trabalhos de Leimbach e Baumstark (2010) e Endenhofer, Bauer e Kriegler (2005).

Nota: ¹ Em alguns parâmetros do anexo I, foi considerada a média entre Estados Unidos e Europa e, para o Brasil, a média entre China e resto do mundo, em alguns casos, conforme a base de dados de Leimbach e Baumstark (2010).