

CRESCIMENTO, COMÉRCIO, BEM-ESTAR E MEIO AMBIENTE: OS EFEITOS DE EXTERNALIDADES TECNOLÓGICAS

LUCAS VITOR DE CARVALHO SOUSA *
ELAINE APARECIDA FERNANDES †
EVALDO HENRIQUE DA SILVA ‡
JADER FERNANDES CIRINO §

Resumo

O presente trabalho procurou analisar como o crescimento econômico, o comércio internacional, as emissões de CO_2 e o bem-estar variam na presença e na ausência de externalidades tecnológicas incorporadas (*spillovers embodied*) em duas regiões: Brasil e Países do Anexo I do Protocolo de Quioto. Os resultados mostraram que as externalidades tecnológicas afetaram positivamente o desempenho econômico brasileiro, entretanto, não houve qualquer efeito sobre os níveis de bem-estar social e de emissões de CO_2 . Esse fato sugere que apenas o progresso técnico não é capaz de conter a pressão antrópica sobre a atmosfera.

Palavras-chave: Crescimento econômico; bem-estar; externalidades tecnológicas; *spillovers embodied*; emissões de CO_2 .

Abstract

This study sought to analyze how economic growth, international trade, emissions of CO_2 and welfare vary in the presence and absence of embodied technological spillovers in two regions: Brazil and countries of Annex I of Kyoto Protocol. The results showed that technological spillovers positively affected the Brazilian economic performance; however, there was no effect on levels of social welfare and CO_2 emissions. This suggests that the technical progress alone is not able to contain the anthropic pressure on the atmosphere.

Keywords: Economic growth; welfare; technological externalities; embodied spillovers; CO_2 emissions.

JEL classification: E17, O44, Q54 e Q55.

DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/1413-8050/ea136956>

* Universidade de Brasília. Email: lucasvitor.cs@gmail.com

† Universidade Federal de Viçosa. Email: elaineafdil@gmail.com

‡ Universidade Federal de Viçosa. Email: ehsilva@ufv.br

§ Universidade Federal de Viçosa. Email: jader.cirino@ufv.br

1 Introdução

No contexto da globalização, onde as diferentes regiões estão ligadas por diferentes mercados globais de bens e serviços, as externalidades tecnológicas estão se tornando ainda mais importantes na observação da interação entre crescimento, comércio internacional e bem-estar. A difusão de novas tecnologias, especialmente as voltadas para o setor energético, pode ser uma estratégia importante para a redução sustentada das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Diante disso, o presente trabalho procurou verificar como o crescimento econômico, o comércio internacional, as emissões de GEE e o bem-estar variam na presença e na ausência de externalidades tecnológicas nas seguintes regiões: Brasil e Países do Anexo I do Protocolo de Quioto¹.

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. Além das emissões oriundas da mudança no uso do solo, as emissões do setor elétrico brasileiro também têm aumentado nos últimos anos. Em 2005, esse 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.

A literatura especializada classifica as externalidades (ou *spillovers*) tecnológicas em duas categorias básicas: incorporadas (ou *embodied*) e desincorporadas (ou *disembodied*). As primeiras representam a mudança tecnológica que é desencadeada por *know-how* tecnológico incorporado em produtos estrangeiros ou diretamente transferido – patentes. As segundas representam uma espécie de mudança tecnológica conduzida por difusão internacional do conhecimento acumulado em um conjunto global e gratuitamente disponível (Leimbach & Baumstark 2010). Os trabalhos de Coe et al. (1997), Cameron & Redding (2005), Madsen (2007), Badinger & Breuss (2008), Franco et al. (2011), Seck (2012) podem ser citados como exemplos de estudos que utilizam o conceito de externalidades incorporadas. Por sua vez, os trabalhos de Coe & Helpman (1995), Eaton & Kortum (1996), Bernstein & Mohnen (1998), Keller (1998), López-Pueyo et al. (2008) são exemplos de estudos que abordam o conceito de externalidades desincorporadas.

Na maioria das vezes, não importando o tipo de externalidade, os estudos concordam que as mudanças tecnológicas podem reduzir os custos, inclusive os de mitigação de GEE, tornando viável uma série de políticas, principalmente as políticas climáticas (Fischer & Newell 2008, IEA 2008, De la Torre et al. 2009, Mills 2009). Por exemplo, Fischer & Newell (2008) constataram, por meio de simulações, que um portfólio de políticas climáticas que incen-

¹De acordo com a 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.

tive o desenvolvimento tecnológico diminuiria as emissões de GEE a um custo significativamente mais baixo. Diante desse contexto, o presente trabalho procurou analisar os efeitos das externalidades tecnológicas (incorporadas) sobre as seguintes variáveis: crescimento econômico, comércio internacional, bem-estar e emissões de gás carbônico (CO_2) no Brasil e nos países do Anexo I do Protocolo de Quioto. Especificamente, pretendeu-se: a) analisar o comportamento das variáveis supracitadas nas regiões analisadas, em um cenário sem compromissos de mitigação de CO_2 e sem a influência de externalidades tecnológicas; e b) avaliar a influência das externalidades tecnológicas sobre as variáveis mencionadas em um cenário sem restrições de emissões de CO_2 .

Resumidamente, o presente trabalho buscou responder a seguinte questão: em um modelo que leva em consideração o meio ambiente, mudanças tecnológicas afetam o bem-estar social e os níveis de emissões de CO_2 das regiões? Para responder essa pergunta foi utilizada uma variante do modelo de Leimbach & Baumstark (2010) denominado MIND-RS. Esse modelo faz a ligação teórica e metodológica, por meio de simulações, entre políticas climáticas, crescimento econômico, bem-estar (medido em termos de consumo per capita) e externalidades tecnológicas.

A simulação permite construir um modelo que representa o sistema real e, por conseguinte, a realização de experimentos por meio de cenários. Os resultados dos experimentos revelam a situação futura do sistema em estudo, auxiliando na tomada de decisão necessária no momento presente, o que contribui para uma melhor compreensão do sistema (Costa 2002). A simulação é uma ferramenta que permite observar os efeitos das externalidades tecnológicas sobre diferentes variáveis. Conhecer esses efeitos 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 dessas relações para a economia brasileira, é um tema pouco explorado e importante. A análise dessas relações pode sinalizar aos tomadores de decisão a melhor alternativa quanto ao uso dos recursos e os eventuais impactos econômicos e ambientais das externalidades tecnológicas. Deve-se ressaltar ainda que o presente estudo, diferentemente do modelo de Leimbach & Baumstark (2010), implementou grande parte das expressões matemáticas 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. Adicionalmente, este estudo também contribuiu para a literatura ao avançar na modelagem do MIND-RS, uma vez que foram eliminadas do modelo, restrições quanto ao comércio internacional de bens de capital e de recursos energéticos.

2 O modelo MIND-RS

O modelo de Leimbach & Baumstark (2010) é uma tentativa recente de incluir as questões ambientais, mais especificamente as políticas climáticas, ao âmbito econômico. A formulação teórica desse modelo baseia-se no Modelo de Investimento e Desenvolvimento Tecnológico (MIND), construído por Edehofer et al. (2005). O MIND permite analisar a relação entre diferentes me-

didadas 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. Inspirados no MIND, Leimbach & Baumstark (2010) desenvolveram um modelo de otimização intertemporal projetado para analisar cenários de políticas climáticas dentro de um mundo globalizado e caracterizado pela existência de externalidades tecnológicas. Esse modelo foi denominado MIND-RS, do tipo Ramsey Estilizado². É um modelo multirregional composto pelos Estados Unidos, Europa, China e Resto do Mundo, e implantado em tempo discreto.

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 externalidades (*spillovers*) tecnológicas e adota como pressuposto que a externalidade 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 a externalidade tecnológica são considerados endógenos.

O conceito de *spillover* tecnológico (ou externalidade tecnológica) 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 externalidades tecnológicas: desincorporada (ou *disembodied spillover*) e incorporada (ou *embodied spillover*). As externalidades desincorporadas 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, as externalidades incorporadas representam mudanças tecnológicas que são adicionadas ao *know-how* tecnológico incorporado em produtos estrangeiros ou inovações diretamente transferidas – patentes. Em outras palavras, as externalidades incorporadas 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 & Baumstark 2010).

A contribuição do modelo MIND-RS é a inclusão das externalidades incorporadas em distintos cenários de políticas climáticas. O conceito de externalidade incorporada, nesse modelo, é concebido como um processo de expansão

²Ou seja, o modelo MIND-RS também 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, para melhores detalhes sobre o modelo de Ramsey veja Romer (2006).

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 externalidades tecnológicas melhora a eficiência do trabalho e a eficiência energética, o que pode acarretar em dois efeitos de custos de mitigação opostos. Enquanto o efeito de crescimento induzido pela externalidade tende a aumentar os custos de mitigação, a melhora da eficiência energética reduz os custos de mitigação. Dessa forma, quanto maior for a intensidade da externalidade 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 externalidades tecnológicas. Enquanto parte da heterogeneidade do mundo real é desconsiderada, o MIND-RS permite investigar os impactos da modelagem de externalidades tecnológicas (incorporadas) 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.

3 Metodologia

3.1 Modelo matemático

Neste estudo, foram analisadas duas regiões: uma em desenvolvimento, Brasil (como grande ofertante de recursos energéticos), e uma desenvolvida, países do Anexo I (com alta produtividade do trabalho e eficiência energética). Supõe-se que a externalidade tecnológica ocorre no sentido da região desenvolvida para a região em desenvolvimento. 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, a Tabela 1 resume os índices mais utilizados na modelagem.

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 da região i , $w(i, t_0)$, mensurado em termos de consumo per capita por meio da expressão (1).

$$w(i, t_0) = \int_{t_0}^T e^{-\sigma(t-t_0)} L(i, t) \ln \left(\frac{C(i, t)}{L(i, t)} \right) dt \quad (1)$$

em que t_0 é o ano inicial, T o ano final e σ é uma taxa pura de preferência intertemporal³, ou seja, uma taxa de desconto. L representa a população da

³A 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, poupam parte dessa renda e aumentam o consumo futuro devido aos juros obtidos no período (Costa 2011).

Tabela 1: .

Índice	Varição	Definição
t	$0, 1, 2, \dots, T$	Período de tempo
i, r	Brasil e Anexo I	Regiões
$j(j \in J)$	$J = \{C, I, Q, f, ren, nf\}$	<u>Bens comercializáveis e setores:</u> C = bens de consumo; I = bens de investimento ou de capital; Q = energia fóssil ou setor de extração; f = setor de transformação de energia fóssil; ren = setor de energia renovável; nf = setor de energia restante.
m	K, L, E, PE	<u>Fatores de produção:</u> K (capital) L (trabalho) E (energia final) PE (energia primária)

Fonte: Adaptado de Leimbach & Baumstark (2010).

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 2.

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

em que ρ é o parâmetro de substituição, ξ_m é um parâmetro que representa o peso dos insumos no produto total e ϕ é a produtividade total dos fatores. Por sua vez, 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 $\theta_{j,j} = \theta_{E,j}$, ou seja, quando a participação do fator trabalho for igual à participação do fator energia no produto. As variáveis de produtividade estão sujeitas à investimentos em P&D (rd_m), de acordo com Edenhofer et al. (2005) e Leimbach & Baumstark (2010), e também à externalidades (*spillovers*) tecnológicas [$sp_m(i, t)$], conforme a expressão (3).

$$\dot{A}_m(i, t) = \zeta_m(i) \left(\frac{rd_m(i, t)}{Y_C(i, t) + Y_I(i, t)} \right)^{\alpha_m} A_m(i, t) + sp_m(i, t) \quad \forall m \in \{L, E\} \quad (3)$$

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 (3), a produtividade dos fatores de produção (A_m) é uma relação entre os investimentos em P&D e o produto agregado, adicionada das externalidades tecnológicas.

As externalidades incorporadas aumentam tanto a produtividade do trabalho quanto a energética. Esse efeito 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 . Em outras palavras, ocorre quando a produtividade do Brasil for menor do que a do Anexo I, de acordo com a expressão (4).

$$sp_m(i, t) = \begin{cases} \left[\sum_r \left[\left(\frac{X_I(r, i, t)}{K_I(i, t)} \right)^\Psi \Omega_m(A_m(r, t) - A_m(i, t)) \right] : A_m(i, t) < A_m(r, t) \right. \\ \left. 0 : A_m(i, t) \geq A_m(r, t) \right] \end{cases} \quad (4)$$

em que Ψ é uma medida de elasticidade do *spillover* (externalidade tecnológica) 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 (5).

$$D_C(i, t) = Y_C(i, t) + \sum_r X_C(r, i, t) - \sum_r X_C(i, r, t) \quad (5)$$

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 (6), (7) e (8).

$$C(i, t) = [sD_C(i)] * [D_C(i, t)] \quad (6)$$

$$Crd_L(i, t) = [sD_crd_L(i)] * [D_C(i, t)] \quad (7)$$

$$Crd_E(i, t) = [sD_crd_E(i)] * [D_C(i, t)] \quad (8)$$

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 encontra-se tais valores.

Parte da produção de bens de consumo é exportada conforme a expressão (9).

$$X_c(i, r, t) = [1 - sY_c(i)] * Y_c(i, t) \quad (9)$$

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 (10), 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 capital 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.

$$D_I(i, t) = Y_I(i, t) + \sum_r X_I(r, i, t) - \sum_r X_I(i, r, t) - I_{ren} - I_{nf} \quad (10)$$

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 (11).

$$I_j(i, t) = [sD_{I,j}(i)] * [D_I(i, t)] \quad \forall j \in \{C, Q, f, I\} \quad (11)$$

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 . Esse percentual 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 (12).

$$X_I(i, r, t) = [1 - sY_I(i)] * Y_I(i, t) \quad (12)$$

em que $[sY_I(i)]$ é o percentual da produção de bens de investimento destinado ao mercado interno, outra vez estimado através do processo de otimização.

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 (13).

$$\dot{K}_j(i, t) = I_j(i, t) - [\delta_j(i)] * [K_j(i, t)] \quad \forall j \in \{C, I, Q, f\} \quad (13)$$

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 .

As expressões 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 (i e r) conforme a expressão (14).

$$W(i, r, t_0) = \int_{t_0}^T e^{-\sigma(t-t_0)} L(i, t) \ln\left(\frac{C(i, t)}{L(i, t)}\right) dt + \int_{t_0}^T e^{-\sigma(t-t_0)} L(r, t) \ln\left(\frac{C(r, t)}{L(r, t)}\right) dt \quad (14)$$

em que $W(i, r, t_0)$ é o bem-estar total, ou seja, a soma do bem-estar da região i e da região r .

Setor de energia final

Nesta subseção foi descrito o comportamento dinâmico do setor energético, composto pelos setores de energia fóssil, renovável e não fóssil. Como pôde ser visto na seção anterior, a energia é um dos insumos produtivos que compõe a função de produção (expressão (2)) que dá origem ao produto agregado das economias em estudo. O modelo MIND-RS desmembra o setor energético em três fontes, energia fóssil, não fóssil e renovável, e ao mesmo tempo permite substitubilidade entre as fontes energéticas.

Dessa forma, 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 ou não fóssil $[E_{nf}(i, t)]$, conforme a expressão (15). As outras fontes de energia se referem à energia nuclear.

$$E(i, t) = E_f(i, t) + E_{ren}(i, t) + E_{nf}(i, t) \quad (15)$$

Para o setor de energia fóssil, a produção final é dada pela expressão (16), que é uma função de produção CES.

$$E_f(i, t) = \Phi_f(i) [\xi_K^f K_f(i, t)^{\rho_f} + \xi_{PE}^f (D(i) * PE(i, t))^{\rho_f}]^{\frac{1}{\rho_f}} \quad (16)$$

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 $PE(i, t)$ 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*⁴ (V) ativos e em carga de fatores (l) acumulados no passado, conforme a expressão (17).

$$E_{ren}(i, t) = \sum_{\tau} l(t - \tau) V(i, t - \tau) w'(\tau) \quad (17)$$

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* está em função dos investimentos em energia renovável, e a produção final nesse setor se difere dos demais por utilizar o conceito de aquisição de capital. O *vintage capital* está em função dos investimentos em energia renovável e dos custos desses investimentos, o que pode ser visto pela expressão (18).

⁴Modelos 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 & Rustichini 1991).

$$V(i, t + 1) = z \frac{I_{ren}(i, t)}{fC(i) + k'(i, t)} \quad (18)$$

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 .

No setor de energia renovável existe variação tecnológica endógena. Essa é baseada na acumulação de capacidade instalada cN , de acordo com a expressão (19).

$$cN(i, t) = cN(i, t - 1) + V(i, t) \quad (19)$$

A produtividade do setor de energia renovável muda de acordo com os custos de investimento dado pela expressão (20).

$$k'(i, t) = k'(i, 0) \left(\frac{cN(i, t)}{cN(i, 0)} \right)^{-\gamma(i)} \quad (20)$$

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

Com a relação à produção 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 produção (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).

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

em que mC é o custo marginal de extração (ou seja, o preço do recurso); $\kappa(i, t)$ 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.

Como a produção de recurso fóssil depende do estoque de capital do setor, e este é formado em parte pelo capital produzido no exterior, a produção de recurso fóssil também é influenciada pelas externalidades tecnológicas. Assim, o capital físico produzido no exterior também pode melhorar a produtividade desse 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 a disponibilidade interna e encontrado por meio da otimização dinâmica.

O custo marginal de extração é derivado da curva de Rogner⁵ 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 $\chi_1(i)$, $\chi_2(i)$ e $\chi_3(i)$ são parâmetros da curva de custo marginal de extração⁶ da região i ; χ_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 CO_2 , 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 CO_2 é emitida. É importante destacar que, como o setor de extração pode ser influenciado pelas externalidades tecnológicas, os níveis de emissões também podem ser afetados pela melhora na produtividade do setor de extração de recurso fóssil.

3.2 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

⁵A 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).

⁶Os valores para esses e outros parâmetros estão na Tabela A.1 no Apêndice Apêndice A.

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 do mesmo 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 & 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 asseguram 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 nesse 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 desses parâmetros. 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 (14)), 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.

3.3 Definição dos cenários e fonte de dados

A possibilidade de construir cenários alternativos é mais um atributo que corrobora o uso da simulação neste estudo, pois permite analisar o impacto das externalidades tecnológicas sobre o bem-estar e o crescimento econômico 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 in-

dicar 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:

1. Cenário CR: no cenário de referência (CR) ou *benchmark* não existe restrição quanto às emissões de CO_2 e nem a presença de externalidades tecnológicas. 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 foi desativado o parâmetro $sp_m(i, t)$ da expressão (3) para as duas regiões.
2. Cenário CR-S: com a finalidade de examinar a influência das externalidades tecnológicas 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 externalidades tecnológicas. Nesse cenário, foi habilitado o parâmetro $sp_m(i, t)$ da expressão (3) para as duas regiões.

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 na Tabela A.1 no Apêndice Apêndice A. 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 & 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 OCDE. Com relação aos dados de importação e exportação, os mesmos foram coletados no Comtrade. Os valores iniciais das demais variáveis foram baseados no trabalho de Leimbach & Baumstark (2010).

4 Análise dos resultados

Como visto na seção 3, 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 na Tabela A.1 que encontra-se no Apêndice Apêndice A e a Tabela 1 apresenta

os valores iniciais das variáveis utilizadas, no ano 2000, para as duas regiões em estudo⁷.

Tabela 2: Valores iniciais para o ano 2000

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 & Baumstark (2010), Banco Mundial, OCDE Comtrade

Esse processo de alimentação do modelo com valores iniciais para as variáveis e os parâmetros de forma a 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 o mesmo 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.

Além dos valores iniciais apresentados na Tabela A.1 (ver Apêndice Apêndice A) 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 percentuais⁸. O objetivo da otimização foi encontrar o melhor valor para cada parâmetro de forma que o bem-estar de cada região fosse máximo.

Como pode-se observar na Tabela 2, os parâmetros $sY_I(i)$, $sD_{II}(i)$, $sD_{IC}(i)$ e $sD_{If}(i)$ não sofreram nenhuma alteração após o processo de otimização para ambas as regiões. De fato, após a análise de sensibilidade desses parâmetros,

⁷Os 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 EUA, 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.

⁸Os valores iniciais são arbitrários e servem para que o processo de otimização seja iniciado.

Tabela 3: Valores encontrados para os parâmetros percentuais após a otimização*

Parâmetro	Brasil	Anexo I	Descrição
$sY_c(i)$	0,7947	0,8246	% da produção de bens de consumo alocado internamente
$sY_I(i)$	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
$sD_crd_L(i)$	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

* 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: $sD_crd_E(i) = 1 - [sD_c(i) + sD_crd_L(i)]$.

** Disponibilidade Interna.

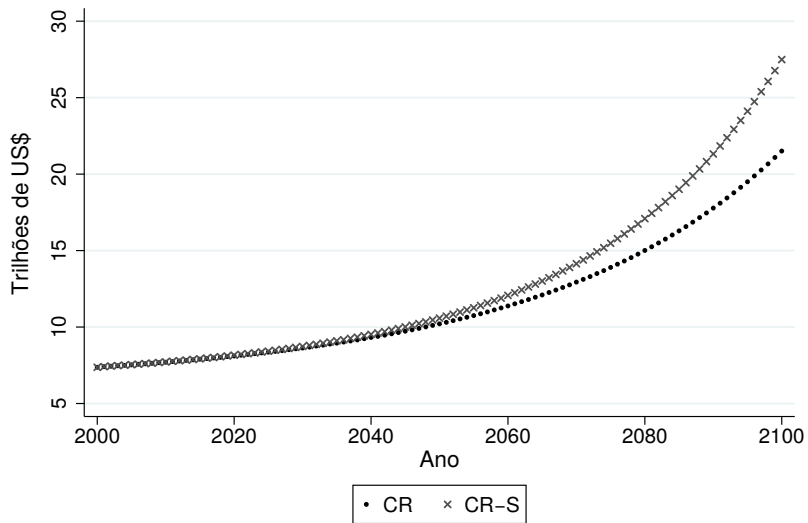
Fonte: Resultados da pesquisa.

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. Após encontrados os parâmetros necessários por meio ou não da otimização dinâmica, procedeu-se a análise dos cenários selecionados conforme a seção metodológica.

No cenário de referência (CR) não existe restrição quanto às emissões de CO_2 e nem a presença de externalidades tecnológicas. Esse cenário foi construído com a finalidade de comparação. Com o intuito de verificar a influência das externalidades tecnológicas nas variáveis econômicas foi construído o cenário CR-S, o qual possui externalidades, porém sem a existência de restrição quanto às emissões. É importante destacar que as externalidades não são objeto de política, pois não é uma variável diretamente controlável. Sua utilização na presente análise tem como objetivo verificar a influência das mesmas no desempenho econômico das regiões e nas emissões de CO_2 . As Figuras 1 e 2 apresentam a evolução do PIB para o Brasil e o Anexo I nos cenários de referência sem externalidades (CR) e com externalidades (*spillovers*) tecnológicas (CR-S)⁹.

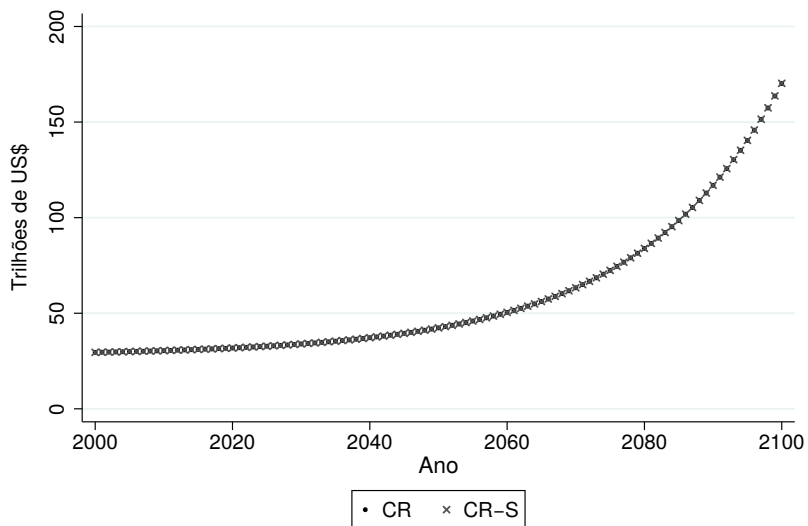
É importante lembrar que o modelo em análise tem como pressuposto que a externalidade tecnológica ocorre da região desenvolvida (Anexo I) para a região em desenvolvimento (Brasil). Assim, apenas o Brasil seria afetado diretamente por essa variável. A trajetória simulada do PIB brasileiro na presença de externalidades mudaria consideravelmente ao longo do tempo. Observar-se-ia maior crescimento da economia, pois as mudanças tecnológi-

⁹O primeiro ano da simulação comportou-se como um choque em todos os cenários e variáveis analisados, dessa forma o mesmo foi desconsiderado das análises.



Fonte: Resultados da pesquisa.

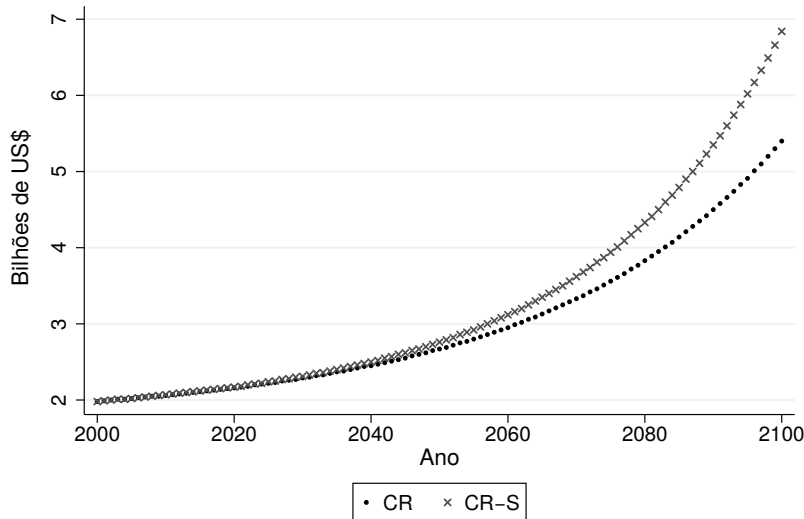
Figura 1: Comportamento do PIB brasileiro ao longo de 100 anos



Fonte: Resultados da pesquisa.

Figura 2: Comportamento do PIB do Anexo I ao longo de 100 anos

cas incorporadas ao capital físico estrangeiro quando é importado refletem nos níveis de eficiência ou produtividade da economia importadora. De fato, a maior produtividade provocada pelo cenário CR-S faria com que a economia brasileira se tornasse, em média, 9,68% maior ao longo do período estudado. Ao se observar o último ano do período analisado (2100), verificou-se um crescimento de 27,81% quando comparado ao cenário CR.



Fonte: Resultados da pesquisa.

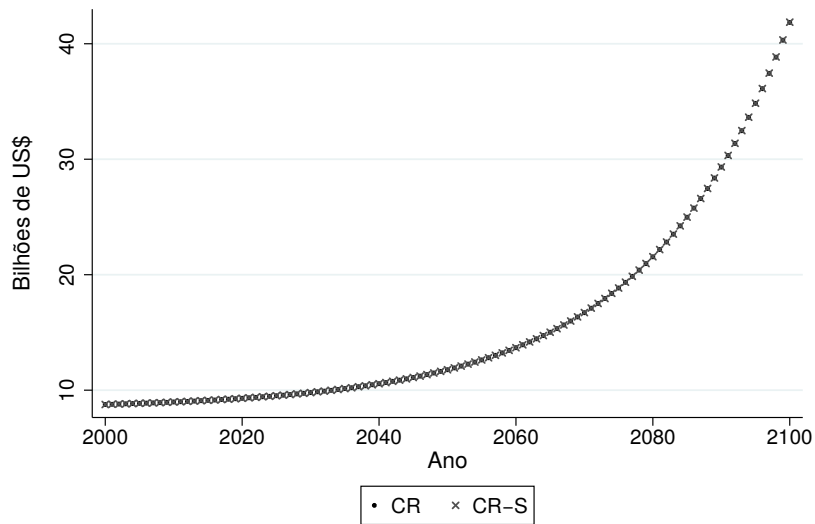
Figura 3: Comportamento das exportações brasileiras de bens de investimento (capital) ao longo de 100 anos

O comércio internacional de bens de capital, fonte das externalidades tecnológicas, apesar de um período de menor crescimento verificado na primeira metade do século, cresceria significativamente a partir da década de 2050 (Figuras 3 e 4). As importações de bens de capital (investimento) cresceriam em média 3,77% ao ano nos dois cenários (Figura 4),¹⁰ sendo que na segunda metade do século o crescimento médio anual seria de 5,11%.

A importação de capital estrangeiro provocaria um processo de expansão do *know-how* tecnológico brasileiro permitindo maior competitividade dos produtos produzidos no Brasil. Isso tanto é verdade que, no cenário CR-S as exportações de bens de capital (investimento) e de bens de consumo seriam maiores do que no cenário com ausência de externalidades (CR - Figuras 3 e 5), principalmente a partir da década de 2050. As mudanças tecnológicas adicionadas ao *know-how* tecnológico incorporado ao capital estrangeiro e importado pelo Brasil melhorariam a produtividade e o *know-how* tecnológico doméstico ao provocar externalidades tecnológicas incorporadas, o que foi refletido no comércio internacional.

A maior intensidade das exportações de bens de capital do Anexo I que seria observada a partir de meados do século, justificaria o efeito da externalidade verificada principalmente neste mesmo período. Como destacam Leimbach & Baumstark (2010), o ganho potencial da externalidade tecnológica, ou

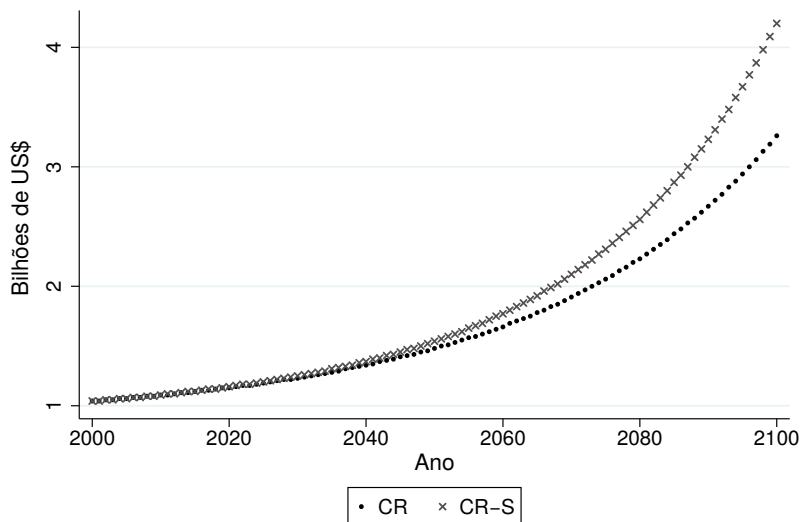
¹⁰Tudo que é exportado por uma determinada região é importada pela outra.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Figura 4: Comportamento das exportações dos países do Anexo I de bens de investimento (capital) ao longo de 100 anos

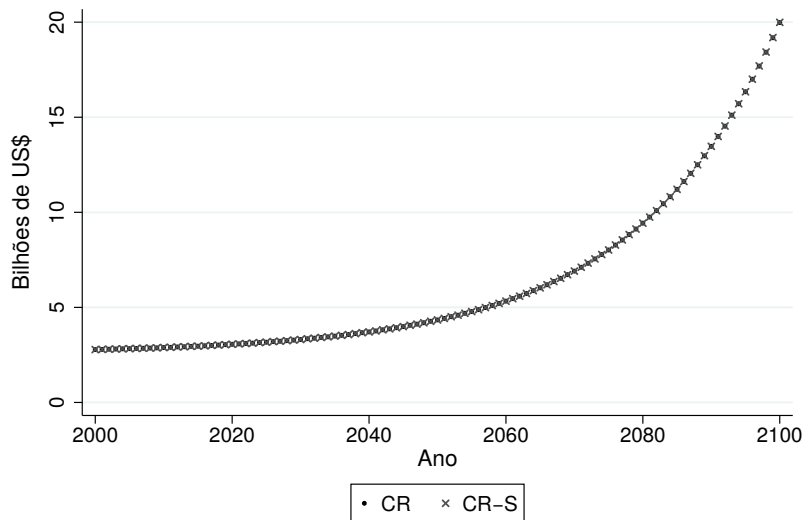
seja, melhora da produtividade, depende da defasagem tecnológica entre os parceiros comerciais de cada região. Quanto maior o diferencial de produtividade maior será o efeito potencial da externalidade. Esse ganho potencial, por conseguinte, aumenta a intensidade das trocas comerciais entre as regiões.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Figura 5: Comportamento das exportações brasileiras de bens de consumo ao longo de 100 anos

As exportações de bens de capital e de bens de consumo do Brasil seriam,



Fonte: Resultados da pesquisa.

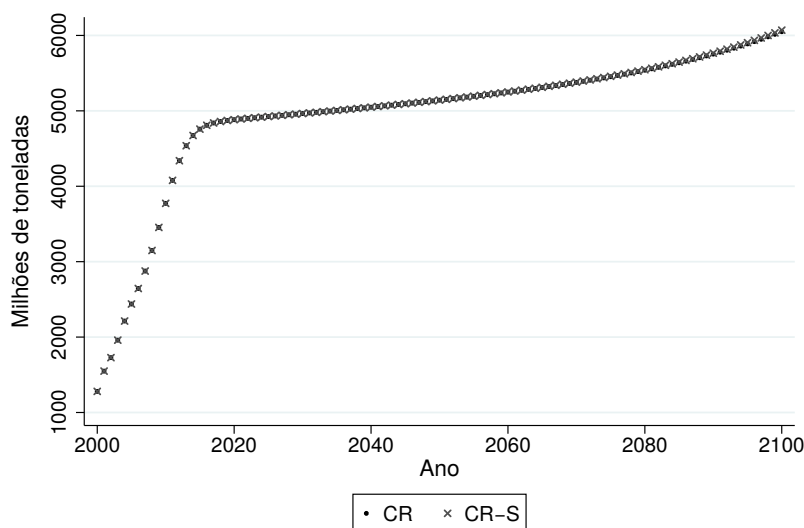
Figura 6: Comportamento das exportações dos países do Anexo I de bens de consumo ao longo de 100 anos

em média, 8,97% e 10,43% respectivamente maiores no cenário CR-S quando comparadas ao cenário CR (Figuras 3 e 5). Em termos absolutos, esses percentuais representariam a expansão de US\$ 176 milhões nas exportações de bens de consumo e de US\$ 268 milhões nas exportações de bens de capital brasileiras. Ao analisar somente o período de maior influência das externalidades, ou seja, as últimas cinco décadas do período analisado, haveria a expansão de 15,21% das exportações brasileiras de bens de consumo e de 13,71% das exportações de bens de capital quando comparado ao cenário CR. É importante destacar que tanto no cenário CR quanto no CR-S, a balança comercial brasileira seria deficitária, no entanto, no cenário CR-S o déficit é relativamente menor.

Esse resultado contrapõe a realidade do comércio internacional brasileiro, que apresentou superávits comerciais nos últimos anos. No entanto, é importante salientar que no presente estudo foi analisada somente a dinâmica econômica entre o Brasil e países do Anexo I, desconsiderando outros parceiros comerciais importantes, como a China e o MERCOSUL.

Também, seria evidente a expansão das exportações dos países que compõem o Anexo I observada principalmente na segunda metade do século. Em média, as exportações de bens de capital e de bens de consumo dessa região cresceriam, respectivamente, 3,77% e 6,18% ao ano. Nota-se ainda que por essa região ser a provedora de externalidades tecnológicas, as exportações de bens de capital e de bens de consumo seguem a mesma trajetória (Figuras 4 e 6), independentemente do cenário utilizado.

Diferentemente do comércio internacional e do desempenho do PIB, as emissões de CO_2 das duas regiões não seriam influenciadas pelas externalidades tecnológicas, como revela a Figura 7. Aparentemente, a não influência das externalidades nas emissões de CO_2 contradiz alguns estudos, como os de Fischer & Newell (2008), IEA (2008), De la Torre et al. (2009), Mills (2009),



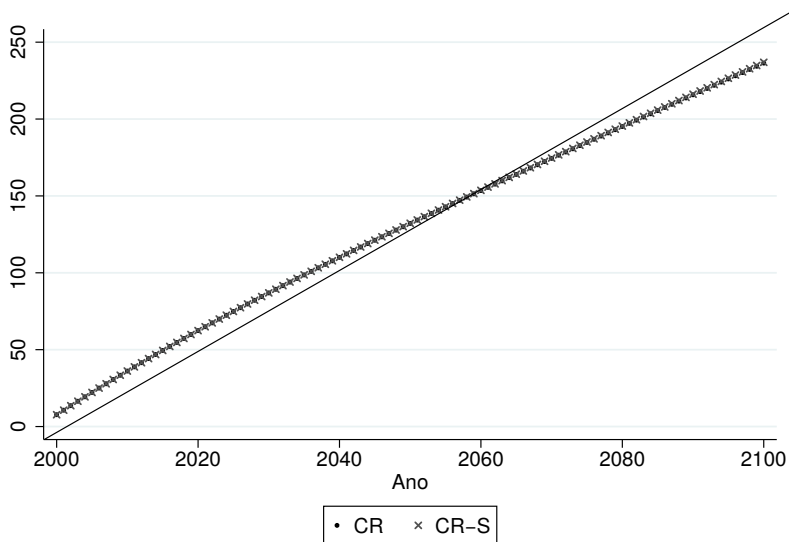
Fonte: Resultados da pesquisa.

Figura 7: Evolução das emissões totais de CO₂ nas duas regiões

que afirmam que o desenvolvimento tecnológico pode mitigar as emissões com menor custo ao crescimento econômico. Porém, é importante destacar que nos cenários CR e CR-S não há qualquer política climática que imponha restrições quanto às emissões. Assim, não há qualquer incentivo para que as regiões se esforcem para mitigar suas emissões, mesmo com a influência de externalidades tecnológicas. De fato, o nível de emissões crescerá rapidamente nas duas primeiras décadas do período estudado e com menor intensidade nos períodos posteriores. Apesar desse menor ritmo de crescimento, as emissões subiriam, em média, 3,72% ao ano durante o período analisado.

O bem-estar das regiões também é outra variável que não seria afetada pelas externalidades tecnológicas como pode ser verificado na Figura 8. Destaca-se que o valor obtido para o bem-estar a cada ano não é importante, mas sim o comportamento do mesmo ao longo do período. O bem-estar é influenciado pela população, que fornece o trabalho exogenamente, e pelo consumo de bens e serviços, ou seja, o bem-estar é influenciado pelos níveis de consumo *per capita*. Observa-se que tanto no cenário CR quanto no CR-S, o bem-estar seguiria a mesma trajetória, com uma pequena redução no ritmo de crescimento na oitava década do período analisado. Apesar da tendência de crescimento, o bem-estar tenderia a se estabilizar no longuíssimo prazo (após 100 anos).

A representatividade do Brasil frente a um bloco de países composto por 42 nações desenvolvidas poderia ser um argumento plausível da não influência das externalidades sobre o bem-estar total. Como a região Brasil é relativamente pequena em termos de produção, consumo, comércio internacional, entre outros, quando comparada à região Anexo I, os impactos das externalidades tecnológicas ao bem-estar total são praticamente imperceptíveis. Isso ocorre, uma vez que o bem-estar econômico é mensurado em termos de consumo *per capita* e as externalidades influenciam diretamente apenas a região brasileira.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Figura 8: Comportamento do bem-estar total ao longo de 100 anos e linha de 45°

5 Considerações finais

Nos últimos anos, a literatura a respeito da inter-relação entre crescimento econômico e meio ambiente aumentou significativamente. E parte considerável dos trabalhos empíricos e teóricos a respeito desse tema, apontam o progresso tecnológico não só como o provedor do crescimento econômico, mas também como um dos instrumentos mitigadores dos impactos antrópicos sobre o meio ambiente. Esse fato motivou a presente análise que procurou estudar essa relação para Países do Anexo I do Protocolo de Quioto e Brasil.

Os resultados mostraram que quando o Brasil importa bens de capital do Anexo I, as mudanças tecnológicas incorporadas ao capital físico estrangeiro refletem nos níveis de produtividade da economia brasileira. Esse efeito é conhecido como externalidade (ou *spillover*) tecnológica e melhora o *know-how* tecnológico brasileiro. De fato, as externalidades tecnológicas incorporadas (*embodied*) aumentaram a produtividade do trabalho e a eficiência energética do Brasil, o que refletiu positivamente em seu desempenho econômico. A economia brasileira cresceu mais e também expandiu suas exportações na presença dessas externalidades.

Por outro lado, o comportamento das emissões de CO_2 permaneceu o mesmo, tanto no cenário com externalidades (CR-S) quanto no sem externalidades (CR). Embora as emissões tenham tendência de crescimento, o resultado encontrado é parcialmente positivo, pois as externalidades tecnológicas permitiram maior crescimento sem incrementos das emissões de CO_2 . Evidentemente, é fundamental a implantação de políticas climáticas que visem a mitigação dessas emissões, pois as externalidades tecnológicas por si só não repercutiram em menores emissões. Tais políticas induziriam o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e os custos de mitigação podem ser minimizados pelas externalidades tecnológicas. Além disso, tecnologias mais limpas pode-

riam provocar um efeito mitigador das externalidades tecnológicas sobre as emissões.

Referências Bibliográficas

- Badinger, H. & Breuss, F. (2008), 'Trade and productivity: an industry perspective', *Empirica* 35(2), 213–231.
- Benhabib, J. & Rustichini, A. (1991), 'Vintage capital, investment, and growth', *Journal of Economic Theory* 55(2), 323–339.
- Bernstein, J. I. & Mohnen, P. (1998), 'International r&d spillovers between us and japanese r&d intensive sectors', *Journal of International Economics* 44(2), 315–338.
- Cameron, G.; Proudman, J. & Redding, S. (2005), 'Technological convergence, r&d, trade and productivity growth', *European Economic Review* 49(3), 775–807.
- Chwif, L. & Medina, A. C. (2006), *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: teoria e aplicações*, primeira edn, Ed. dos Autores, São Paulo.
- Coe, D. T. & Helpman, E. (1995), 'International R&D spillovers', *European Economic Review* 39(5), 859–887.
- Coe, D. T., Helpman, E. & Hoffmaister, A. W. (1997), 'North-south R&D spillovers', *Economic Journal* 107(440), 134–149.
- Costa, A. A. B. (2002), 'Simulação de sistemas.', Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.
- Costa, A. A. B. (2011), 'A relação intertemporal entre educação e consumo: os consumidores mais escolarizados são os mais pacientes?', Cedeplar-UFMG, Belo Horizonte-MG.
- CQNUMC (2013), 'Convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima.', Disponível em: <http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/annex_i/items/2774.php>. Acesso em 30 jun. 2013.
- De la Torre, A., Fajnzylber, P. & Nash, J. D. (2009), 'Low carbon, high growth: Latin american responses to climate change-an overview.', World Bank Publications.
- Eaton, J. & Kortum, S. (1996), 'Trade in ideas patenting and productivity in the oecd', *Journal of International Economics* 40(3), 251–278.
- Edenhofer, O., Bauer, N. & Kriegler, E. (2005), 'The impact of technological change on climate protection and welfare: Insights from the model MIND', *Ecological Economics* 54(2), 277–292.
- Fischer, C. & Newell, R. G. (2008), 'Environmental and technology policies for climate mitigation', *Journal of Environmental Economics and Management* 55(2), 142–162.

- Franco, C., Montresor, S. & Vittucci Marzetti, G. (2011), 'On indirect trade-related R&D spillovers: the "average propagation length" of foreign R&D', *Structural Change and Economic Dynamics* 22(3), 227–237.
- Gandolfo, G. (2012), *Economic dynamics: study edition*, fourth edn, Springer, Roma, Italy.
- IEA (2008), 'Worldwide trends in energy use and efficiency: Key insights from IEA indicator analysis.', Paris: International Energy Agency.
- Keller, W. (1998), 'Are international R&D spillovers trade-related? analyzing spillovers among randomly matched trade partners', *European Economic Review* 42(8), 1469–1481.
- Leimbach, M. & Baumstark, L. (2010), 'The impact of capital trade and technological spillovers on climate policies', *Ecological Economics* 69(12), 2341–2355.
- López-Pueyo, C., Barcenilla-Visús, S. & Sanaú, J. (2008), 'International R&D spillovers and manufacturing productivity: A panel data analysis', *Structural Change and Economic Dynamics* 19(2), 152–172.
- Madsen, J. B. (2007), 'Technology spillover through trade and TFP convergence: 135 years of evidence for the OECD countries', *Journal of International Economics* 72(2), 464–480.
- Mills, E. (2009), 'Building commissioning: A golden opportunity for reducing energy costs and greenhouse gas emissions.', Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Rogner, H. H. (1997), 'An assessment of world hydrocarbon resources', *Annual review of energy and the environment* 22(1), 217–262.
- Romer, D. (2006), *Advanced Macroeconomics*, second edn, McGraw-Hill, New York.
- Seck, A. (2012), 'International technology diffusion and economic growth: Explaining the spillover benefits to developing countries', *Structural Change and Economic Dynamics* 23(4), 437–451.
- SEPED (2013), 'Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil.', Brasília: Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento.

Apêndice A Parâmetros e variáveis do modelo

Tabela A.1: Valores dos parâmetros e suas respectivas fontes*

Símbolo	Parâmetro	Brasil	Anexo I	Fonte
σ	Taxa de desconto intertemporal	0,01	0,01	Edenhofer et al. (2005)
$\rho(i)$	Parâmetro de substituição no setor de bens de consumo e investimento	0,3	0,4	Leimbach & Baumstark (2010)
ρ_f	Parâmetro de substituição no setor de energia fóssil	0,3	0,3	Leimbach & 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	Edenhofer et al. (2005)
ξ_{mf}	Peso do fator m no setor de energia fóssil	0,5	0,5	Leimbach & Baumstark (2010)
$\phi_j(i)$	Produtividade Total dos Fatores no setor j (I e C) na região i	0,330	0,395	Leimbach & Baumstark (2010)
$\Phi_f(i)$	Produtividade Total dos Fatores no setor de energia fóssil na região i	3,55	3,47	Leimbach & 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	Edenhofer et al. (2005)
Ψ	Elasticidade do <i>spillover</i>	0,6	0,6	É um valor < 1 conforme Leimbach & Baumstark (2010)
Ω_m	Intensidade do <i>spillover</i>	0,15	0,15	Leimbach & Baumstark (2010)
$\kappa_{max}(i, t)$	Máxima produtividade do setor de extração	3,22	3,22	Edenhofer et al. (2005)
$k(i, t)$	Coefficiente de conversão na região i no tempo t	0,5	0,5	<i>ad hoc</i>

Tabela A.1: Valores dos parâmetros e suas respectivas fontes* (continuação)

Símbolo	Parâmetro	Brasil	Anexo I	Fonte
$\nu(i)$	Inverso da taxa de aprendizagem no setor de extração de recursos	1/0,11	1/0,14	Leimbach & Baumstark (2010)
μ	Fator de amortecimento da aprendizagem	0,4	0,4	Edenhofer et al. (2005)
$\chi_1(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	113	113	Edenhofer et al. (2005)
$\chi_2(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	700	700	Edenhofer et al. (2005)
$\chi_3(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	3500	3500	Edenhofer et al. (2005)
$\chi_4(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	4	4	Edenhofer et al. (2005)
$l(t)$	Fator de carga dos <i>vintages</i> da produção de energia renovável	0,5	0,5	<i>ad hoc</i>
w'	Fator de ponderação que representa a parte ainda ativa dos <i>vintages</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	Edenhofer et al. (2005)
$f_C(i)$	Custo mínimo do investimento	500	500	Edenhofer et al. (2005)
$\gamma(i)$	Taxa de aprendizagem	0,11	0,14	Leimbach & Baumstark (2010)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados contidos nos trabalhos de Leimbach & Baumstark (2010) e Edenhofer et al. (2005).

* Observação: 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, para alguns casos, conforme a base de dados de Leimbach e Baumstark (2010).