

LUCAS VITOR DE CARVALHO SOUSA

**EFEITOS DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS SOBRE O BEM-ESTAR ECONÔMICO NO
BRASIL E EM PAÍSES DO ANEXO I DO PROTOCOLO DE QUIOTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

Sousa, Lucas Vitor de Carvalho, 1988-
S725e
2014 Efeitos de políticas climáticas sobre o bem estar econômico
no Brasil e em países do Anexo I do Protocolo de Quioto / Lucas
Vitor de Carvalho Sousa. – Viçosa, MG, 2014.
xii, 76f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Elaine Aparecida Fernandes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.67-73.

1. Políticas climáticas. 2. Bem-estar econômico. 3.
Spillovers tecnológicos. 4. Simulação. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Economia. Programa de
Pós-graduação em Economia. II. Título.

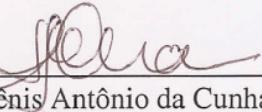
CDD 22. ed. 551.6

LUCAS VITOR DE CARVALHO SOUSA

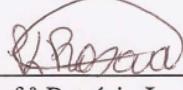
**EFEITOS DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS SOBRE O BEM ESTAR ECONÔMICO
NO BRASIL E EM PAÍSES DO ANEXO I DO PROTOCOLO DE QUIOTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 21/02/2014



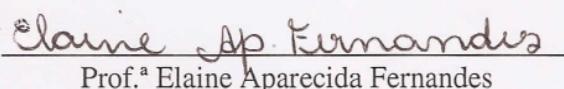
Prof. Dênis Antônio da Cunha



Prof.ª Patrícia Lopes Rosado



Prof. Jader Fernandes Cirino
(Coorientador)



Prof.ª Elaine Aparecida Fernandes
(Orientadora)

Aos meus pais Hélio e Marilucia, à minha irmã Sara, aos meus demais familiares e aos meus amigos.

"Dizem que antes de um rio entrar no mar, ele treme de medo. Olha para trás, para toda a jornada que percorreu, para os cumes, as montanhas, para o longo caminho sinuoso que trilhou através de florestas e povoados, e vê à sua frente um oceano tão vasto, que entrar nele nada mais é do que desaparecer para sempre. Mas não há outra maneira. O rio não pode voltar. Ninguém pode voltar. Voltar é impossível na existência. O rio precisa de se arriscar e entrar no oceano. E somente quando ele entrar no oceano é que o medo desaparece, porque apenas então o rio saberá que não se trata de desaparecer no oceano, mas de tornar-se oceano." Osho.

AGRADECIMENTOS

Há dois anos me preparava para entrar no mestrado. Hoje concluo uma das fases mais desafiadoras da minha vida. Ao longo desses dois anos superei minhas dificuldades, aprendi novas coisas e hoje me sinto muito mais maduro. A conclusão dessa etapa é resultado de um esforço pessoal, mas, sobretudo, do apoio das pessoas que me cercam, por isso, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para esta conquista.

Primeiramente, agradeço a Deus pelo conforto espiritual que procurei ao enfrentar as puxadas disciplinas do mestrado e que foi fundamental para que o meu trabalho fosse concluído.

Aos meus pais, Hélio e Marilucia, que são a razão de minha existência e que sempre estiveram prontos para me ouvirem e me aconselharem. A minha irmã, Sara, e toda a minha família pelo apoio e incentivo incondicional.

Agradeço a Universidade Federal de Viçosa que me mostrou intensamente o que é “estudar, saber, agir e vencer”. Agradeço também os professores e funcionários do Departamento de Economia da UFV por terem colaborado em minha formação acadêmica, principalmente aqueles que contribuíram diretamente: Adriano Provezano Gomes, Francisco Carlos da Cunha Cassuce, Jader Fernandes Cirino, Luciano Dias de Carvalho, Marcelo José Braga (DER-UFV), Newton Paulo Bueno, Sidney Martins Caetano e Silvia Harumi Toyoshima.

Em especial, agradeço a minha querida orientadora professora Elaine Aparecida Fernandes, que me proporcionou muito mais do que uma orientação, mas sim uma verdadeira amizade. E também ao professor Evaldo Henrique da Silva pela paciência e atenção ao esclarecer minhas dúvidas a respeito do modelo desenvolvido nesta dissertação.

Não posso deixar de agradecer o meu amigo Fred, que sempre esteve comigo nos momentos difíceis e alegres. Sua amizade e compreensão foram essenciais para a conclusão dessa etapa da minha vida.

Por fim, agradeço a todos os amigos do mestrado, incluindo os calouros e veteranos pela amizade, paciência e cumplicidade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS	ix
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Considerações iniciais	01
1.2. O problema e sua importância	04
1.3. Objetivos	06
1.3.1. Objetivo geral	06
1.3.2. Objetivos específicos	06
2. O ESTADO DA ARTE SOBRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	07
2.1. Conceito, causas e consequências	07
2.2. Mudanças Climáticas: passado e presente	08
2.3. Conferências globais sobre o meio ambiente e as mudanças climáticas	13
2.3.1. As Conferências das Partes (COPs): acordos e discussões	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1. Crescimento econômico: as questões ambientais e o papel da tecnologia	21
3.2. O modelo de Ramsey: o bem-estar e as questões ambientais	23
3.2.1. O modelo de Investimento e Desenvolvimento Tecnológico - MIND	25
3.2.2. O modelo MIND-RS	27
4. METODOLOGIA	29
4.1. Modelo matemático	29
4.1.1. Setor de Energia Final	34
4.1.2. Setor de Extração de Recurso Fóssil	35
4.1.3. Setor de Energia Renovável	36
4.2. Simulação e otimização dinâmica	37
4.3. Definição dos cenários	38
4.4. Fonte de dados	40
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
5.1. Calibração: valores iniciais e resultado da otimização	41

5.2. Análise dos cenários	43
5.2.1. Cenário de referência (CR) ou <i>benchmark</i>	43
5.2.2. Cenários de políticas climáticas (CPC)	49
5.2.2.1. Cenário CPC-1	49
5.2.2.2. Cenário CPC-2	53
5.2.2.3. Cenário CPC-2S	56
5.3. Discussão geral dos resultados: a grande questão	60
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICE A: PARÂMETROS E VARIÁVEIS DO MODELO	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Comportamento do PIB ao longo de 100 anos para o Brasil	43
Figura 2 – Comportamento do PIB ao longo de 100 anos para o Anexo I	44
Figura 3 - Comportamento das exportações brasileiras de bens de investimento (capital) ao longo de 100 anos	45
Figura 4 - Comportamento das exportações dos países do Anexo I de bens de investimento (capital) ao longo de 100 anos	45
Figura 5 – Comportamento das exportações brasileiras de bens de consumo ao longo de 100 anos	46
Figura 6 – Comportamento das exportações dos países do Anexo I de bens de consumo ao longo de 100 anos	47
Figura 7 – Evolução das emissões totais de CO ₂ nas duas regiões em milhões de toneladas	48
Figura 8 – Comportamento do bem-estar total ao longo de 100 anos e linha de 45°	49
Figura 9 – Evolução das emissões totais de CO ₂ nas duas regiões em milhões de toneladas nos cenários CR e CPC-1	50
Figura 10 – Comportamento do PIB do Anexo I na presença de uma política climática	52
Figura 11 – Comportamento do bem-estar total na presença de uma política climática	52
Figura 12 – Evolução das emissões totais de CO ₂ nas duas regiões em milhões de toneladas nos cenários CR e CPC-1	53
Figura 13 – Comportamento do PIB brasileiro na presença de uma política climática global	54
Figura 14 – Comportamento do PIB do Anexo I na presença de uma política climática global	55
Figura 15 – Comportamento do bem-estar total na presença de uma política climática global	55
Figura 16 – Comportamento do PIB brasileiro na presença de uma política climática global com <i>spillovers</i> tecnológicos	57
Figura 17 – Comportamento do PIB do Anexo I na presença de uma política climática global com <i>spillovers</i> tecnológicos	57
Figura 18 – Exportações de bens de capital do Brasil na presença de uma política climática global com <i>spillovers</i> tecnológicos	58

Figura 19 – Exportações de bens de consumo do Brasil na presença de uma política climática global com <i>spillovers</i> tecnológicos	58
Figura 20 – Emissões totais de CO ₂ nas duas regiões em milhões de toneladas na presença de uma política climática global com <i>spillovers</i> tecnológicos	59
Figura 21 – Comportamento do bem-estar total na presença de uma política climática global com <i>spillovers</i> tecnológicos	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese dos índices utilizados no modelo	29
Quadro A.1 – Descrição dos parâmetros/variáveis e suas respectivas fontes	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores iniciais para o ano 2000	41
Tabela 2 – Valores encontrados para os parâmetros percentuais após a otimização	42

RESUMO

SOUZA, Lucas Vitor de Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2014.
Efeitos de políticas climáticas sobre o bem-estar econômico no Brasil e em países do Anexo I do Protocolo de Quioto. Orientadora: Elaine Aparecida Fernandes. Coorientadores: Jader Fernandes Cirino e Evaldo Henrique da Silva.

A relação entre bem-estar econômico e meio ambiente é um tema controverso e de grande relevância para as economias atuais, ainda mais em um cenário de aumento da temperatura. Esse aumento se dá prioritariamente pela emissão de gases originários de combustíveis fósseis, principal fonte de energia da atividade econômica. Nesse cenário, surge a necessidade de adoção de medidas para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas. Diante disso, 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 (Protocolo de Quioto). Para isso, foi utilizada uma adaptação do modelo de Leimbach e Baumstark (2010), 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 irrissórios para o crescimento econômico e, sobretudo para o bem-estar, mesmo na ausência de *spillovers* tecnológicos. Por outro lado, a política climática global com a presença de *spillovers* tecnológicos mostrou-se mais adequada uma vez que reduz consideravelmente os níveis de emissões de CO₂, divide os custos de mitigação entre as regiões, afeta positivamente o desempenho econômico do Brasil e não há qualquer efeito sobre o bem-estar econômico das regiões analisadas. Contudo, os benefícios sociais, econômicos e ambientais de um planeta menos quente e poluído são substanciais e podem afetar positivamente o bem-estar não econômico. Nesse sentido, um estudo mais apurado de tais benefícios derivados de uma menor pressão antrópica sobre o sistema climático se configura em um objeto de investigação futuro.

ABSTRACT

SOUSA, Lucas Vitor de Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2014.

Effects of climate policies on economic welfare in Brazil and in Annex I countries of the Kyoto Protocol. Adviser: Elaine Aparecida Fernandes. Co-Advisers: Jader Fernandes Cirino and Evaldo Henrique da Silva.

The relationship between economic welfare and the environment is a controversial and highly relevant to today's economies, especially in a scenario of increasing temperature issue. This increase occurs principally by the emission of gases originating from fossil fuels, the main engine of economic activity. In this scenario, arises the need to take measures for mitigation and adaptation of ecosystems to climate change. Therefore, the present 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 (Kyoto Protocol). For this, an adaptation of Leimbach and Baumstark (2010) model, which allows simulations to analyze the main variables that make up the economic system in a climate change scenario was used. The results showed that for any scenario of climate policy the mitigation costs are insignificant for economic growth and especially for the well-being, even in the absence of technological spillovers. On the other hand, global climate policy in the presence of technological spillovers was more appropriate since it considerably reduces the levels of CO₂ emissions, divides mitigation costs between regions, positively affects the economic performance of Brazil and there any effect on the economic welfare of the regions analyzed. However, the social, economic and environmental benefits of a less hot and polluted planet are substantial and can positively affect the well-being uneconomical. Accordingly, a more accurate about the benefits of a lower anthropogenic pressure on the climate system is configured in a study object of future research.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

O crescimento econômico ambientalmente resiliente é um dos maiores e mais complexos desafios da atualidade, ainda mais em um panorama de mudanças climáticas. Segundo o relatório Intergovernamental sobre Mudança do Clima - IPCC (2013), a temperatura média do planeta elevou-se cerca de 0,85°C no período compreendido entre 1880 e 2012, impulsionada principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) de origem antrópica. Mesmo em um cenário com forte mitigação, as projeções mostram que a temperatura da Terra deve aumentar, neste século, aproximadamente 2°C. Embora, este aumento pareça insignificante, ele pode trazer sérias consequências para o bem-estar humano e para os ecossistemas, como escassez de água, desertificação, inundações, entre outras. Nenhum país por si só é capaz de enfrentar tal desafio, que implica em decisões políticas controversas e em mudanças tecnológicas em escala global.

A discussão a respeito dos impactos da ação humana sobre os ecossistemas e o bem-estar é algo relativamente recente. E em âmbito global destaca-se a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), em 1992. Os governos que seguiram essa convenção reconheceram que, no futuro, ela poderia ser a propulsora de medidas mais agressivas quanto às mudanças climáticas, ao considerarem um processo contínuo de revisão, discussão e compartilhamento de informações. Entretanto, as medidas mais concretas ocorreram somente em 1997, no Japão, com a formulação do Protocolo de Quioto.

O Protocolo estabeleceu que os países industrializados (países do Anexo I¹) deveriam reduzir as emissões de GEE em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990 até o período compreendido entre 2008 e 2012. Tal compromisso foi e ainda é uma tentativa de reversão da tendência global de aumento das emissões ocorridas desde a revolução industrial. O Protocolo foi aberto para assinatura em 16 de março de 1998 e estava previsto para entrar em vigor 90 dias após a ratificação de pelo menos 55 países, que juntos produzissem 55% das emissões globais. Entretanto, somente em 2005 o Protocolo de Quioto entrou em vigor com a ratificação da Rússia, em novembro de 2004.

¹ De 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, Ucrânia.

O Anexo I do Protocolo de Quioto é formado por países industrializados responsáveis por grande parte das emissões de GEE globais e que, com exceção dos Estados Unidos, se comprometeram a reduzi-las. Por outro lado, os países que não fazem parte Anexo I são países em desenvolvimento, incluindo países emergentes como a China, Índia e Brasil², que não possuem compromissos formais quanto às metas de mitigação. Esta distinção é respaldada pela própria CQNUMC que fundamenta boa parte do debate sobre a atribuição de responsabilidades entre os países:

As Partes (países) devem proteger o sistema climático em benefício das gerações presentes e futuras da humanidade com base na equidade e em conformidade com suas responsabilidades comuns, mas diferenciadas, e conforme suas respectivas capacidades. Em decorrência, os países desenvolvidos devem tomar a iniciativa no combate à mudança do clima e a seus efeitos (CQNUMC, 1992, p.4).

Esta diferenciação muitas vezes causa certo desconforto entre os governos. De um lado os países em desenvolvimento alegam que as responsabilidades são comuns, porém diferenciadas, dadas as emissões históricas de países desenvolvidos. Por outro lado, os países desenvolvidos afirmam que os países em desenvolvimento também contribuem para as emissões de GEE em escala global e que, portanto, deveriam repartir os custos da mitigação. A Conferência das Partes (COP 17), ocorrida em 2011 na África do Sul, avançou nesses questionamentos, pois lançou a base para um acordo futuro de metas de redução de emissões para os Estados Unidos e a China. Além disso, foi aprovada a ampliação do Protocolo de Quioto e um calendário para criar um novo protocolo em 2015, que possa entrar em vigor até 2020, em que todos os países do mundo serão obrigados a ter metas de redução de emissões.

Com relação ao debate teórico e empírico a respeito das questões ambientais, existe uma discussão muito grande na literatura a respeito do tema crescimento econômico, tecnologia e meio ambiente. Solow (1986) e Stiglitz (1974) mostraram, pela função Cobb-Douglas (que pressupõe substitutibilidade entre os fatores produtivos), não haver indícios de que o crescimento econômico afete negativamente o meio ambiente. Solow (1986) mostrou que se a taxa de crescimento do progresso tecnológico for superior à taxa de degradação ambiental, as economias convergiriam à trajetória de crescimento econômico equilibrado, mesmo com baixos níveis de recursos naturais. O resultado encontrado por Solow (1986) é semelhante ao de Hotelling (1931), sendo que ambos pressupõem que a taxa de desgaste dos recursos naturais se reduziria

² Embora o Brasil não tenha compromissos formais quanto à mitigação de GEE, ele possui uma política bem definida de mudanças climáticas. Por meio da Lei Nº 12.187/2009, foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima que oficializou o compromisso voluntário do Brasil junto a CQNUMC de mitigação de GEE entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas até 2020.

substancialmente se houvesse um pagamento relativo à escassez dos recursos, o que enaltece a importância do uso eficiente dos insumos ambientais.

É importante salientar que alguns estudos aplicados recentes como os de Selden e Song (1994), Grossman e Krueger (1995), Chintrakarn e Millimet (2006), He e Richard (2010), Ma *et al.* (2012) e Carraro, Favero e Massetti (2012) chegam à mesma conclusão dos trabalhos de Solow e Stiglitz. Entre os fatores que podem diminuir a pressão antrópica sobre os recursos naturais, destacam-se as mudanças no comportamento do consumidor, na legislação, na tributação e o desenvolvimento de tecnologias menos poluentes.

Outros autores, como Sachs (1994), May (1995), Daly (1997), Daly e Farley (2004), Mueller (2005), Romeiro (2010), Andrade e Romeiro (2011) argumentam que o progresso tecnológico não seria capaz de suprir as necessidades humanas em uma eventual escassez dos recursos naturais. O capital natural e o capital físico são essencialmente complementares, e não substitutos entre si. O progresso tecnológico apenas aumenta a eficiência quanto ao uso dos recursos naturais, sendo incapaz de substituí-los.

Trabalhos como os de Kagan *et al.* (2003), Del Río González (2004; 2005), Ambec *et al.* (2011) e Plambeck (2012) apontam que o uso eficiente dos recursos naturais por parte das empresas leva a redução das emissões de GEE e com potencial de rentabilidade. As empresas operam, tomam decisões e interagem com outros atores no mercado e uma política empresarial de mitigação melhora as relações públicas, atraem novos consumidores, motivam os funcionários e estimulam os tomadores de decisão a apoiarem iniciativas voltadas para a economia verde³. Além disso, o desenvolvimento tecnológico que minimiza os custos de mitigação fornece o incentivo necessário para que as empresas adotem políticas de produção sustentáveis. Entretanto, como destacam Barrett (2009) e Edmonds *et al.* (2012), apenas o progresso técnico e medidas unilaterais não são suficientes para reduzir as emissões de GEE, o que envolve, conjuntamente, uma verdadeira revolução tecnológica e políticas de governo em escala global.

Dessa forma, a análise da contribuição dos fatores produtivos (capital, trabalho e natureza) para o crescimento econômico é de suma relevância ao entendimento teórico e empírico da melhor exploração dos insumos produtivos, especificamente os recursos naturais. Em adição, levar em consideração o lado econômico, social e ambiental pode gerar melhores resultados em termos de bem-estar para a sociedade. Assim, para reformas estruturais e políticas econômicas que têm por objetivo impactar sobre os níveis de estoque de capital, investimento financeiro e produtivo, infraestrutura básica, qualificação da mão de obra, melhorias nas

³ Entende-se como economia verde o processo produtivo que ao ser implantado gera desenvolvimento sustentável.

condições de trabalho e de utilização dos recursos naturais, é importante o estudo dos fatores que norteiam o crescimento econômico das nações.

1.2. O problema e sua importância

Apesar da existência de um cenário de aumento da temperatura, ainda existe, de fato, um número pequeno de ações concretas de redução das emissões. 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 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 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 busca analisar as inter-relações entre políticas climáticas, crescimento econômico, tecnologia e bem-estar para duas regiões selecionadas: Brasil e os países do Anexo I do Protocolo de Quioto.

A escolha dessas duas 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, muito em função das emissões oriundas da mudança no uso do solo, como o desmatamento e a agropecuária. No entanto, as emissões do setor elétrico brasileiro têm aumentado nos últimos anos, o que justifica maior ênfase sobre o setor. Em 2005, este setor representava apenas 16% das emissões totais de GEE no país, mas em 2010, este percentual passou para 32%, valor próximo das emissões da agropecuária que está em torno de 35% (SEPED, 2013). Por outro lado, 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, se mobilizam 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 adaptação. Já as nações desenvolvidas declaram que os países em desenvolvimento⁴ são responsáveis também por uma fração relevante das emissões e, por isso, deveriam dividir os custos.

Este 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; 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 ALCA⁵ reduziria as emissões de CO₂, por outro lado 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.

Dada essa controvérsia, o presente trabalho procurou responder às seguintes questões, considerando um panorama de interações não linear e dinâmico: o bem-estar e o crescimento econômico do Brasil e dos países do Anexo I em cenários de mitigação de GEE seriam comprometidos? As mudanças tecnológicas podem minimizar os custos de mitigação para essas regiões?

Para responder essas questões 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, bem-estar⁶ e *spillovers* tecnológicos. 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 desta relação para a economia brasileira, considerando os efeitos de *spillovers* tecnológicos, é um tema pouco

⁴ Há inclusive a tentativa de distinguir dois grupos dentre os países em desenvolvimento: BASIC (Brasil, África do Sul, Índia e China) como grupo mais desenvolvido e as demais nações como LDC's, grupo dos menos desenvolvidos.

⁵ Área de Livre Comércio das Américas (ALCA).

⁶ O bem-estar é mensurado em termos de consumo *per capita*.

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.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

De forma geral, o presente trabalho buscou analisar os efeitos de políticas climáticas inspiradas no Protocolo de Quioto e em outras conferências globais sobre o bem-estar e o crescimento econômico do Brasil e dos países do Anexo I do Protocolo de Quioto.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Analisar o comportamento do bem-estar, do crescimento econômico, do comércio internacional e das emissões de CO₂ das regiões analisadas, em um cenário sem compromissos de mitigação de GEE e sem a influência de *spillovers* tecnológicos;
- b) Avaliar a influência dos *spillovers* tecnológicos sobre as variáveis supracitadas em um cenário sem políticas climáticas;
- c) Verificar os efeitos sobre as variáveis mencionadas em um cenário de política climática imposta apenas aos países do Anexo I e sem a influência de *spillovers* tecnológicos;
- d) Analisar o comportamento dessas variáveis em um cenário em que ambas as regiões tenham compromissos de redução de emissões, com e sem *spillovers* tecnológicos.

2. O ESTADO DA ARTE SOBRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

2.1. Conceito, causas e consequências

O termo aquecimento global é utilizado comumente como sinônimo de mudanças climáticas, o que não é adequado. As mudanças climáticas são fenômenos de resfriamento e de aquecimento, ou seja, é um termo mais abrangente, enquanto que o aquecimento global refere-se a elevações nas médias da temperatura.

Na década de 1990, o termo mudança climática foi atribuído a consequências antrópicas. Conforme a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC, 1992), mudança climática significa uma alteração do clima atribuída direta ou indiretamente às atividades humanas que alteram a composição da atmosfera, e que é além da variabilidade climática natural observada ao longo do tempo. Dessa forma, para CQNUMC, o termo mudança climática é utilizado quando se refere a mudanças causadas pelo homem, e variabilidade climática para mudanças naturais, ou seja, sem influência antrópica.

Para o IPCC (2007), mudança climática é qualquer alteração do clima ao longo do tempo seja natural ou de origem antrópica. A definição do IPCC parece ser a mais plausível, uma vez que não é possível saber com exatidão qual é a parcela da mudança climática que é de responsabilidade humana e qual é de origem da variabilidade climática. É possível saber apenas a quantidade de emissões de GEE de origem antrópica, que realmente contribuem para o aquecimento global, mas dificilmente será possível discriminar qual é a participação efetiva da atividade humana e natural no processo de mudanças climáticas.

As principais causas da mudança climática são as emissões de GEE, e grande parte dessas emissões é de origem antrópica. Entre estes gases, destacam-se o vapor d'água, o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonetos (CFCs) e o dióxido de carbono (CO_2), sendo este último o principal gás de efeito estufa que os seres humanos adicionam a atmosfera. Segundo o IPCC (2007), a maior parcela das emissões de GEE antropogênicos é oriunda da queima de combustíveis fósseis e cerca de 30% dessas emissões estão associadas ao uso e mudança de uso do solo, como fertilizantes, pecuária, desmatamento e queimadas.

As mudanças climáticas afetarão elementos básicos da vida humana, como acesso a água, a alimentos, a saúde e ao meio ambiente. Centenas de milhões de pessoas poderão passar fome, escassez de água e inundações costeiras conforme o planeta aquece. Os países em desenvolvimento serão os que mais sofrerão com esse fenômeno uma vez que possuem menor

desenvolvimento tecnológico e recursos financeiros para lidar com as mudanças climáticas (STERN, 2006).

2.2. Mudanças climáticas: passado e presente

Apesar da grande repercussão nos últimos anos, as mudanças climáticas não são novas e nem incomuns. Durante os últimos 4,7 bilhões de anos, o clima da Terra foi modificado por erupções vulcânicas, alterações na intensidade solar, movimento dos continentes em razão das placas tectônicas, colisões com grandes meteoros, entre outros fatores. Ao longo dos últimos 900 mil anos, a temperatura média da troposfera passou por longos períodos de resfriamento e aquecimento global. Esses ciclos alternados de congelamento e degelo são conhecidos como períodos glacial e interglacial - entre as eras do gelo (MILLER JR., 2008).

Há pelo menos 12 mil anos o planeta encontra-se em um período interglacial caracterizado por um clima e temperatura média global da superfície estáveis. Em outras palavras, desde que a agricultura começou a ser desenvolvida, o clima global tem sido favorável a vida da forma como ela é conhecida (MILLER JR., 2008). No entanto, mesmo durante este período de estabilidade, os climas regionais mudaram de forma significativa e recentemente de forma mais rápida devido ao aquecimento global por influência antrópica.

Pode-se dizer que a Revolução Industrial ocorrida entre os séculos XVIII e XIX não foi apenas um marco histórico na mudança do processo produtivo e no uso de novas fontes de energia, como o carvão mineral, mas também o início de grandes intervenções dos seres humanos ao meio ambiente. Ao mesmo tempo em que novas máquinas e produtos eram produzidos a população da Terra chegava a 1 bilhão de pessoas.

As transformações ocorridas nesta época foram além dos muros fabris, com outras descobertas científicas e tecnológicas. Na segunda década do século XIX o físico francês Joseph Fourier descobriu que a atmosfera da Terra funcionava como um isolante térmico, era a descoberta do efeito estufa natural. Na segunda metade deste mesmo século, o físico irlandês John Tyndall comprovou que o vapor d'água e outros gases formam o efeito estufa e concluiu que a camada formada por estes gases são essenciais para a vida vegetal. No fim deste século, o químico sueco Svante Arrhenius completou os estudos anteriores, afirmando que o CO₂ agiu na atmosfera como um regulador de vapor d'água e determinava a temperatura de equilíbrio do planeta no longo prazo. Arrhenius também salientou que a transformação industrial movida a carvão iria colaborar para o crescimento do efeito estufa natural, o que poderia acarretar, no

futuro, em uma elevação da temperatura. No entanto, nesta época, ninguém teve muito interesse na hipótese de aquecimento futuro causado pela indústria (WEART, 2008).

As quatro primeiras décadas do século XX foram marcadas por um ceticismo quanto a um possível aquecimento causado pelas emissões de CO₂. No início do século, o sueco Knut Agstrom descobriu que o CO₂ mesmo em pequenas concentrações na atmosfera absorve intensamente partes do espectro infravermelho. Porém, Agstrom não percebeu a importância de sua descoberta, ele simplesmente demonstrou que este gás poderia provocar aquecimento por meio do efeito estufa. Apesar desta descoberta, a ideia de que a adição de CO₂ poderia mudar o clima, nunca foi amplamente aceita nesse período. Entre os principais argumentos da época, destacam-se a convicção quase universal de que a Terra se regulava automaticamente para um equilíbrio natural e que os oceanos absorviam o excesso de gases que estavam na atmosfera. Assim, havia uma crença confortável de que os sistemas biológicos estabilizavam a atmosfera, absorvendo qualquer excesso. De uma forma ou de outra, qualquer gás emitido pela humanidade à atmosfera seria absorvido, mesmo que levasse um século ou mais, e o equilíbrio se restauraria automaticamente (WEART, 2008). Como destacou Hutchinson (1948), o mecanismo de autorregulação do ciclo do carbono poderia lidar com o então presente influxo de carbono de origem fóssil.

Apesar de um período marcado pelo ceticismo a teoria de que as variações de gás carbônico na atmosfera poderiam mudar o clima nunca foi completamente esquecida. Em 1938, o engenheiro inglês Guy Callendar retomou a teoria do aquecimento e descobriu em suas pesquisas que a temperatura havia aumentado quando comparada ao século anterior. De fato, ao avaliar antigas medições de concentrações de gás carbônico na atmosfera, Callendar concluiu que nos últimos cem anos a concentração de gás havia aumentado aproximadamente 10%, o que poderia explicar o aquecimento observado. Callendar também afirmou que se a quantidade de gás carbônico fosse duplicada poderia ocorrer, gradualmente, um aumento na temperatura de 2°C em séculos futuros e que os oceanos não seriam capazes de absorver todo o excesso de gases presentes na atmosfera. No entanto, os meteorologistas da época deram pouca credibilidade aos estudos de Callendar, alegando que os dados apresentados por ele eram indignos de confiança (WEART, 2008).

A hipótese de que as emissões antrópicas de dióxido de carbono nunca poderiam tornar-se um problema foi derrubada durante a década de 1950. Em consequência da Segunda Guerra Mundial e da Guerra Fria, os cientistas americanos receberam vultosos recursos para o estudo do clima, mas não com o intuito de responder questões sobre o clima futuro, e sim prever necessidades militares prementes. Quase tudo que acontecia com a atmosfera e com os oceanos

poderia ser importante para a segurança nacional. Com o surgimento dos computadores nesta mesma década, as análises atmosféricas tornaram-se mais precisas.

Em 1956, o físico americano Gilbert Plass utilizou os primeiros computadores para analisar a absorção da radiação infravermelha de distintos gases, mas ainda com interesses militares. Plass (1956) concluiu que ao duplicar a concentração de CO₂ a temperatura seria elevada entre 3°C e 4°C e assumindo que as emissões continuassem no ritmo daquela época, a atividade humana elevaria a temperatura média global a uma taxa de 1,1°C por século. Plass (1956) também advertiu que a mudança climática poderia ser um problema grave para as gerações futuras e salientou que se no final do século a temperatura média continuasse a subir, então poderia ser estabelecido que o CO₂ pode, de fato, causar mudanças climáticas.

Ainda em meados do século XX, o químico Hans Suess e o oceanógrafo Roger Revelle, ambos pesquisadores americanos, confirmaram que os oceanos não eram capazes de absorver toda a quantidade adicional de CO₂ emitida para a atmosfera, como era admitido por vários pesquisadores. Suess (1955) conseguiu demonstrar que o carbono fóssil estava realmente aparecendo na atmosfera e Revelle e Suess (1957) salientaram que se a combustão industrial continuasse a subir exponencialmente, o aquecimento provocado pelo efeito estufa poderia tornar-se significativo durante as décadas futuras.

Inicialmente os estudos de Suess e Revelle não foram amplamente aceitos pela comunidade científica, que continuava a negar que não havia nenhum problema com o efeito estufa e que era difícil entender porque os oceanos não eram capazes de absorver o gás carbônico adicional. Essa falta de entendimento foi esclarecida pelos meteorologistas suecos, Bert Bolin e Erik Eriksson. Eles explicaram que apesar da água do mar absorver CO₂ rapidamente, a maior parte do gás absorvido iria evaporar de volta a atmosfera antes mesmo da lenta circulação oceânica. Estes meteorologistas ainda destacaram que a química do ar e da água do mar chegaria a um equilíbrio, no entanto, este processo poderia levar milhares de anos (WEART, 2008).

No fim da década de 1950, alguns cientistas passaram a informar ao público que os gases de efeito estufa poderiam se tornar um problema no futuro. Além disso, reconheceram que a captação de gases pelo oceano era lenta e que possivelmente o nível de concentração de CO₂ na atmosfera estava aumentando. Dessa forma, era importante medir a concentração de CO₂ na atmosfera com maior precisão, o que foi feito pelo pesquisador Charles David Keeling.

Keeling (1960), a partir de avanços tecnológicos do ferramental infravermelho e de equipamentos criados por ele, passou a medir incessantemente o gás carbônico da atmosfera no Havaí e na Antártida. Os resultados de suas medições comprovaram que as concentrações de gás carbônico na atmosfera estavam, de fato, aumentando.

As pesquisas de Keeling (1960) estimularam outros pesquisadores a se interessarem pelo tema e buscarem entender como o nível de dióxido de carbono tinha mudado no passado e qual a influência dele no presente e no futuro. De acordo com Weart (2008), durante os anos de 1970, o efeito estufa tornou-se um tema importante em diversas áreas. Os cientistas concordaram que um pouco mais da metade do efeito antrópico sobre a mudança climática é devido às emissões de CO₂, principalmente aquelas oriundas de combustíveis fósseis, mas também do desmatamento e fabricação de cimento. O resto do efeito é devido ao metano e outros gases emitidos pelas atividades humanas, a poluição atmosférica por fumaça e poeira, e as mudanças no uso do solo.

Os estudos a respeito da concentração de gás carbônico na atmosfera avançaram na década de 1980 por meio de estudos de “testemunho de gelo”⁷. Estes estudos permitiram verificar que o nível de CO₂ na atmosfera era pelo menos 50% menor do que a concentração presente, e a temperatura variava conforme o nível de CO₂ atmosférico. Ainda nesta década, surgiram evidências científicas de que os níveis de CO₂ foram elevados durante os períodos quentes do passado (WEART, 2008), o que corrobora a relação entre aumento de temperatura e aumento da concentração de gás carbônico.

As evidências científicas a respeito do aquecimento global repercutiram internacionalmente, e em 1988, a Organização Meteorológica Mundial (WMO – sigla em inglês) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) criaram o Painel Intergovernamental para Mudança do Clima (IPCC, na sigla em inglês) com a finalidade de melhorar o entendimento científico sobre as mudanças climáticas, potenciais impactos e medidas de mitigação e adaptação. O primeiro relatório foi divulgado em 1990 e concluiu que no século anterior a temperatura global subiu entre 0,3°C e 0,6°C. Além disso, o documento destacou que as emissões oriundas da atividade humana estão sendo adicionadas as emissões naturais de gases de efeito estufa e que este adicional pode resultar no acréscimo ainda maior da temperatura no planeta (IPCC, 1990).

A década de 1990 também foi marcada por novas descobertas a respeito do comportamento do clima. As novas medições de núcleos de gelo indicaram que no fim do último período glacial, o avanço inicial da temperatura na Antártida havia precedido o aumento de CO₂. Esta indicação era uma contradição às conclusões anteriores, pois esperava-se que o crescimento das emissões de CO₂ provocasse o aumento da temperatura. Dessa forma, dava-se a entender que os acréscimos ou decréscimos nos níveis de gás carbônico não haviam iniciado os ciclos glaciais.

⁷ Testemunho de gelo ou núcleo de gelo é uma amostra de gelo retirada de perfurações em calotas polares e que serve para obter informações a respeito do clima passado por meio dos gases aprisionados na amostra.

Na verdade, como destaca Weart (2008), a maioria dos cientistas já havia abandonado esta hipótese. Na década de 1960, estudos minuciosos mostraram que mudanças sutis na órbita da Terra ao redor do sol, chamadas de ciclos de Milankovich, poderiam mudar a temperatura em diferentes latitudes, provocando um pequeno aquecimento regional. Estudos mais detalhados em novos núcleos de gelo sugeriram um *feedback* poderoso e amplificado a estas pequenas mudanças da órbita da Terra. O fato crucial é que um pequeno aquecimento provocaria um rápido aumento dos níveis de gases de efeito estufa. De um lado, os oceanos mais quentes iriam evaporar mais gases, por outro, as vastas tundras do ártico e os pântanos aquecidos emitiriam mais gases, incluindo o gás metano. O efeito da emissão desses gases seria aumentar a temperatura um pouco mais, o que poderia causar mais emissão de gases e assim por diante, em um ciclo de *feedbacks* que levaria o planeta a um período de aquecimento. Anos mais tarde, uma mudança da órbita da Terra poderia fazer o processo reverso. Assim, pequenas alterações da órbita da Terra poderiam definir o período das enormes oscilações dos ciclos glaciais.

Na primeira década do século XXI geoquímicos conseguiram obter resultados para a sensibilidade do clima em períodos anteriores, ou seja, a resposta da temperatura a um aumento dos níveis de CO₂. A conclusão foi de que ao longo de centenas de milhões de anos, a duplicação dos níveis de gás carbônico ocorria conjuntamente com um aumento da temperatura de 1°C a 2°C (WEART, 2008).

No entanto, a crescente elevação das emissões de GEE de origem antrópica está acelerando o processo de aumento da temperatura. Conforme o Relatório Stern, a concentração de GEE na atmosfera poderá atingir o dobro do seu nível pré-industrial já em 2035, o que provocará um aumento da temperatura média global em aproximadamente 2°C. 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 (STERN, 2006).

Em 2007, o quarto relatório de avaliação do IPCC, revelou que entre 1970 e 2004, as emissões globais de GEE apresentaram um crescimento de 70%, e entre os fatores antrópicos, a queima de combustíveis fósseis é a principal causadora das emissões. Além disso, enfatizou que há mais de 90% de probabilidade de que as emissões de GEE antrópicas sejam responsáveis pelas mudanças climáticas ocorridas nos últimos tempos (IPCC, 2007).

Apesar de todas estas evidências a respeito das mudanças climáticas, ainda existe uma minoria de cientistas que não acreditam no aquecimento global. Segundo o estudo de Doran e Zimmerman (2009) menos de 3% dos especialistas em mudança climática não acreditam que as mudanças climáticas são causadas pelas atividades humanas e 96,2% acreditam que as temperaturas globais estão aumentando. É evidente que a grande maioria dos cientistas acredita

no aquecimento global e esta opinião é corroborada pela pesquisa de Anderegg *et al.* (2010) que também constatou que aproximadamente 97% dos cientistas do clima concordam com os relatórios do IPCC.

Embora exista uma minoria cética, o mais recente relatório do IPCC é enfático: o aquecimento do sistema climático é inequívoco, e desde o período pré-industrial a concentração de gás carbônico na atmosfera aumentou cerca de 40%, causada principalmente pelas emissões oriundas de combustíveis fósseis e secundariamente pelas emissões causadas pela mudança no uso do solo (IPCC, 2013).

A questão mais preocupante é que as atividades humanas estão acelerando o processo de emissões de GEE, o que pode amplificar os ciclos de *feedbacks* e colaborar para um processo mais rápido de aquecimento global. Este fato é corroborado pelos relatórios do IPCC de 1995, 2001, 2007 e 2013 que concluem que há evidências claras da influência humana no clima do planeta (IPCC, 1995, 2001, 2007 e 2013).

2.3. Conferências globais sobre o meio ambiente e as mudanças climáticas

As discussões em âmbito global a respeito dos impactos da ação humana sobre os ecossistemas e o bem-estar é algo relativamente recente e tiveram início em 1968 quando foi realizada a primeira reunião do Clube de Roma, cuja finalidade era entender os grandes dilemas da humanidade. Foi estabelecido o objetivo de promover a interdisciplinaridade entre economia, política e ecologia, com o intuito de criar métodos e planos de ação para solucionar a crise social e ecológica que se iniciava. Então, em 1972, os pesquisadores do Clube de Roma produziram uma série de relatórios científicos, que, compilados, compuseram o conhecido livro, *The Limits to Growth* (ou relatório Meadows).

Em geral, este estudo afirmava que o sistema produtivo mundial estava excedendo os limites ecológicos. A principal tese contida nesse documento enunciava que, mantidas as tendências de crescimento da população, industrialização, poluição, produção de alimentos e redução de recursos naturais, o limite de crescimento do planeta seria atingido dentro dos próximos cem anos ou em período inferior (MEADOWS *et al.*, 1973). Nesses termos, a solução encontrada pelo grupo consistiu na proposta de manter uma taxa de crescimento zero, pois, de outro modo, as consequências seriam trágicas.

A reunião do Clube de Roma foi apenas o início de uma série de Conferências dedicadas às questões de equidade e prudência ambiental. Em 1972, foi realizada a primeira grande conferência internacional sobre política ambiental, a Conferência das Nações Unidas sobre o

Meio Ambiente, em Estocolmo. O Brasil despontou como líder dos países periféricos, mostrando-se contrário à imposição de limites para seu crescimento. Nesse evento, alguns dos programas e comissões mais importantes para o meio ambiente foram criados, a saber: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP – que posteriormente tonou-se PNUMA), o Earthwatch⁸ e a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CMMAD). Foi assim que essa discussão entrou definitivamente na pauta de assuntos da ONU.

Na Conferência de Estocolmo foi criado um “meio-termo” em relação a pontos de vista contrários, pois pretendia-se ressaltar a importância do crescimento equitativo que abrangesse o cuidado com o meio ambiente. Em síntese, foi criada uma declaração acerca dos fatores causadores de danos ambientais (industrialização, explosão demográfica e crescimento urbano) e foi proclamado o direito humano a um meio ambiente saudável, bem como o dever de protegê-lo e torná-lo melhor para as gerações futuras (FOLADORI, 2001).

Essa Conferência foi um importante marco para a década de setenta, pois mostrou o início da real preocupação com o meio ambiente na esfera política e em escala global. Entretanto, o tema mudança climática foi muito pouco debatido na agenda, que ficou concentrada em questões ligadas a poluição química, testes nucleares e caça as baleias.

Na década de 1980, as questões ambientais ganharam novo impulso. As principais causas estavam ligadas a uma série de acidentes ambientais, cuja intensidade e frequência aumentaram rapidamente. Foi o caso das secas na Etiópia, das enchentes em Bangladesh, da explosão industrial em Cubatão, da tragédia em Bopal na Índia, da descoberta do “buraco” na camada de ozônio (1985), do desastre nuclear de Chernobyl (1986), da fome na África e Etiópia, dentre outros fenômenos ambientais. Nessa década, o desmatamento foi considerado uma das principais causas dos desastres (FEAM, 1998).

Com todos esses acontecimentos, a CMMAD trabalhou entre 1984 e 1987 na criação de uma agenda que possibilitasse uma mudança global; o resultado foi à publicação do relatório *Our common future* (Relatório Brundtland), no qual se examinavam os problemas críticos entre desenvolvimento e meio ambiente. Neste, é conceituado o termo desenvolvimento sustentável, o qual deveria responder às necessidades do presente de forma equitativa, sem comprometer as possibilidades de sobrevivência e prosperidade das gerações futuras (BRUNDTLAND, 1987). Esse documento mostrava a interdependência entre questões econômicas, sociais e ambientais e que a análise isolada desses fatores simplesmente levaria a conclusões equivocadas. Apesar da abordagem ampla que definiu um nível mínimo de consumo, baseado nas necessidades básicas, o

⁸ O Earthwatch é uma organização sem fins lucrativos que promove ações para compreender e sustentar o meio ambiente natural.

referido Relatório foi negligente quanto aos níveis máximos de consumo e de uso de energia praticados nos países industrializados.

No mesmo ano da publicação do Relatório de Brundtland, 1987, os países entraram em acordo criando o Protocolo de Montreal, que restringiu o uso de materiais químicos que destroem a camada de ozônio. A principal meta foi abolir o uso de vários tipos de CFCs que eram as fontes dessa destruição. Sem, no entanto, ter sido criado para minimizar as mudanças climáticas, o Protocolo de Montreal foi bem sucedido quanto a seus objetivos e teve impacto sobre a mitigação de GEE.

Embora as décadas de 1960 e 1970 tenham sido marcadas por grandes descobertas sobre as mudanças climáticas, este tema só foi discutido com maior relevância nos anos de 1990. A criação do IPCC em 1988 e a primeira publicação de seu relatório em 1990 reuniram argumentos para a formação da CQNUMC, a qual constitui um acordo multilateral entre as Partes (países) em nome de uma preocupação coletiva aos danos socioambientais causados pela humanidade. O acordo teve adesão de 192 países, os quais se dispuseram a cooperar com a formulação de uma estratégia global para a harmonia do sistema climático. Desse modo, a CQNUMC é responsável por monitorar e estimular ações governamentais para redução dos impactos ambientais negativos, causadores das mudanças climáticas.

O primeiro relatório de avaliação do IPCC também foi base para as discussões da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD - 1992), conhecida como Conferência da Terra ou Eco-92, realizada no Rio de Janeiro. Nessa Conferência, a CQNUMC foi colocada para ser assinada pelos países interessados no acordo. Dessa Conferência, resultou a Agenda 21 e a Declaração do Rio, que visavam implantar o paradigma do desenvolvimento sustentável, de acordo com o que havia sido proposto pelo Relatório Brundtland.

A Agenda 21 é um instrumento que esboça diretrizes para o planejamento e a construção de sociedades sustentáveis no mundo, conciliando proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica. Desde então, cada nação deveria desenvolver uma Agenda 21 nacional, (a do Brasil foi concluída em 2002), e, posteriormente municipais, de acordo com as especificidades dos países e suas cidades. A Declaração do Rio, por sua vez, é um documento que reafirmava os princípios da Declaração de Estocolmo, redigida na Conferência de Estocolmo em 1972 cujo objetivo era a criação de meios para cooperação mundial e em seus subníveis, sociedade e indivíduos, com o intuito de proteger o meio ambiente e promover o desenvolvimento, na compreensão de que a Terra é um organismo vivo, do qual todos dependem.

Em 1994, a CQNUMC entrou em vigor e com o objetivo de dar maior importância às questões relacionadas ao meio ambiente e a qualidade de vida das pessoas, a Convenção estabeleceu encontros periódicos com os países membros denominados Conferência das Partes (COP). A COP é um órgão internacional de negociação das regras e políticas referentes à implantação da CQNUMC. Já foram realizadas 19 COPs, algumas consideradas fracassadas outras com grandes avanços no debate internacional sobre as mudanças climáticas. A seção seguinte faz uma breve revisão das principais questões e acordos realizados em cada COP.

2.3.1. As Conferências das Partes (COPs): acordos e discussões⁹

Desde que a CQNUMC entrou em vigor, os países que seguiram esta convenção passaram a se reunir regularmente com intuito de aprofundar os debates sobre mudanças climáticas. Estas reuniões são conhecidas como Conferência das Partes (COP) e nelas são revisadas as normas da convenção, adotadas novas resoluções e definidas a aplicação e funcionamento das diretrizes do acordo, a execução dos mecanismos previstos e o cumprimento das metas instituídas.

Em 1995, em Berlim na Alemanha, ocorreu a primeira Conferência das Partes (COP-1). Nessa conferência começou o processo de negociação de metas e prazos para combater as emissões de gases que geram o efeito estufa pelos países desenvolvidos. Apesar da sensação de incerteza, a COP-1 resultou na adoção do Mandato de Berlim, que propôs a constituição de um protocolo que limitasse a emissão de GEE. Era o ponto de partida para a criação do Protocolo de Quioto, e a partir de então, a COP passou a ser realizada anualmente. Além disso, naquele ano, foi concluído o segundo relatório do IPCC, o qual, juntamente aos esforços da CQNUMC, forneceu argumentos ainda mais consistentes às discussões que, posteriormente, culminaram na adoção do Protocolo de Quioto.

Em 1996 foi realizada em Genebra na Suíça, a COP-2, que por meio da Declaração de Genebra estabeleceu obrigações legais quanto às metas de mitigação de GEE. Nesta conferência, as partes também decidiram que os países em desenvolvimento poderiam solicitar ajuda financeira ao Fundo Global para o Meio Ambiente, com o intuito de desenvolverem programas que minimizem as emissões de GEE.

A terceira COP ocorreu no ano de 1997 em Quioto no Japão e é considerada uma das mais importantes. Na COP-3 foi adotado o Protocolo de Quioto que estabeleceu metas de

⁹ As informações dessa seção foram coletadas no site da CQNUMC (UNFCCC, 2013).

redução de GEE para os países industrializados, denominados países do Anexo I, a serem cumpridas entre 2008 e 2012. Em geral, as metas tinham como objetivo reduzir as emissões de GEE em 5% dos níveis de 1990. Além disso, o Protocolo estabeleceu que os países do Anexo I poderiam compensar suas emissões por meio de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) implantados em países em desenvolvimento. O Protocolo entraria em vigor após a ratificação de pelo menos 55 partes (países) que juntas somassem 55% das emissões globais, o que ocorreu somente em 2005 com a ratificação da Rússia.

Em 1998 foi realizada em Buenos Aires na Argentina, a COP-4. A conferência centrou-se em esforços para colocar em vigor e ratificar o Protocolo de Quioto, adotado na COP anterior. A COP-4 trouxe o plano de ação de Buenos Aires que discutiu um programa de metas paralelas ao Protocolo de Quioto, como a análise dos impactos das mudanças climáticas e alternativas de compensação, formas de financiamento e transferência de tecnologia. O plano de ação de Buenos Aires teve continuidade na COP-5, no ano de 1999, em Bonn na Alemanha. Neste encontro iniciaram-se, também, as discussões sobre mudança do uso do solo que promovem o aumento ou a redução das emissões de GEE, como o desmatamento e o reflorestamento, respectivamente.

A sexta Conferência das Partes (COP-6) ocorreu em 2000 em Haia nos Países Baixos, e foi marcada pela falta de consenso sobre as questões de mitigação. As negociações foram suspensas devido à discordância entre a União Europeia e os Estados Unidos com relação aos sumidouros e as atividades de mudança do uso do solo. Devido à falta de um consenso em Haia, em 2001, foi realizada a segunda parte da COP-6, na qual, após a saída dos Estados Unidos do Protocolo de Quioto, foi aprovada a utilização de sumidouros como forma de cumprir as metas de emissões, discutidos os limites para países em desenvolvimento e assistência financeira por parte dos países desenvolvidos.

Também no ano de 2001 foi realizada a COP-7 em Marraqueche em Marrocos. Sem a presença dos Estados Unidos que alegou que os custos de mitigação seriam muito elevados para economia americana e a contestação da ausência de metas para países em desenvolvimento, a conferência teve como destaque os Acordos de Marraqueche. Entre eles, a definição dos mecanismos de flexibilização, limitação do uso de créditos de carbono gerados em projetos florestais de MDL e o financiamento de iniciativas de adaptação às mudanças climáticas a países em desenvolvimento. Em Nova Déli na Índia, ocorreu a COP-8 em 2002, sem grandes avanços internacionais. Ainda neste ano houve a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+10) que discutiu sobre o uso de fontes de energia renováveis.

A COP-9 foi realizada em Milão na Itália, em 2003. As principais discussões centraram-se na regulamentação de sumidouros de carbono no âmbito do MDL, como o florestamento e o

reflorestamento. Além disso, foram discutidos os detalhes técnicos finais do Protocolo de Quioto e foram adicionados três mecanismos de implementação das medidas de redução de emissão de GEE: o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo¹⁰, a Implementação Conjunta¹¹ e o Comércio de Emissões¹². Por meio do MDL, as nações em desenvolvimento, que não possuíam meta de redução estabelecida, foram incluídas no processo, já que poderiam participar do mercado lançando certificados de redução de emissão.

A COP-10 aconteceu em 2004 na cidade de Buenos Aires na Argentina, onde foram aprovadas as regras para a implantação do Protocolo de Quioto, que entraria em vigor no ano seguinte com a ratificação da Rússia em novembro de 2004. Além disso, foram discutidas a capacitação de países em desenvolvimento, a implementação do sistema global de observação para o clima, e o desenvolvimento e transferência de novas tecnologias.

Em 2005, foi realizada em Montreal no Canadá a COP-11 e também a primeira Conferência das Partes do Protocolo de Quioto, conhecida como CMP-1 ou COP/MOP-1, que passou a ocorrer conjuntamente com as COPs. A agenda das discussões centrou-se nas perspectivas para o segundo período de compromissos do Protocolo após 2012, e no diálogo sobre cooperação de longo prazo para enfrentar as mudanças climáticas, o que reforçou a implantação da Convenção.

A COP-12/CMP-2 ocorreu no ano de 2006 em Nairóbi no Quênia. Os representantes de 189 países assumiram o compromisso de revisar o Protocolo de Quioto e foram estipuladas regras de financiamento de projetos de adaptação de países pobres. O Brasil propôs oficialmente a concepção de um mecanismo de mitigação das emissões de GEE oriundas do desmatamento em países em desenvolvimento.

Em 2007, foi realizada a COP-13/CMP-3, em Bali na Indonésia. Nesta, a partir da análise do quarto relatório do IPCC, por meio do qual ficaram evidentes os sinais nocivos do aquecimento global, foram criadas as bases para gestação de um novo acordo, que pudesse suplementar o Protocolo de Quioto. A conferência também estabeleceu compromissos

¹⁰ CDM – *Clean Development Mechanism*: está definido no 12º artigo do Protocolo de Quioto, esse mecanismo estimula o desenvolvimento sustentável e a redução das emissões por meio do uso de energias limpas, enquanto confere alguma flexibilidade aos países industrializados no cumprimento de seus objetivos. O projeto de CDM ou MDL deve proporcionar redução adicional de emissões comparativamente ao que foi acordado. Os projetos podem ganhar *certified emission reduction (CER)* vendáveis que são créditos de 1 tonelada de CO₂ (UNFCCC, 2012).

¹¹ JI – *Joint Implementation*: definido no artigo 6º do Protocolo de Quioto, oferece uma solução flexível e economicamente eficiente, ao permitir que os países cumpram suas metas compensando as emissões com sumidouros e outras fontes. Dessa maneira é permitido que o país ganhe *emission reduction units (ERU)* (UNFCCC, 2012).

¹² ET – *Emissions Trading*: definido no artigo 17 do Protocolo como o comércio de emissões que permite que, os países que possuem unidades de emissão sobrando, possam vendê-las para aqueles que não conseguem cumprir seus objetivos. A emissão passa a ser uma mercadoria. O caso mais conhecido de negociação é o mercado de carbono, o qual é uma das possíveis fontes poluidoras e causadoras da mudança climática (UNFCCC, 2012).

transparentes e verificáveis para a redução das emissões originadas pelo desmatamento. Tanto a COP-13/CMP-3, quanto a COP-14/CMP-4, em Poznam na Polônia em 2008, significaram uma preparação para a criação de medidas concretas constituintes do novo acordo climático sobre o qual repousaram grandes expectativas de efetivação para a COP/CMP seguinte.

As Convenções costumam ter rodadas difíceis de negociação, predominando uma polarização de interesses entre desenvolvidos e em desenvolvimento em função dos compromissos distintos entre as Partes. Diante das diferentes características dos países envolvidos, as discussões muitas vezes não avançam. Um exemplo importante foi a COP-15/CMP-5, realizada em dezembro de 2009, em Copenhague na Dinamarca, que tinha como objetivo estabelecer o tratado que substituiria o Protocolo de Quioto. A impressão que ficou foi a não cooperação entre os países ou que a Conferência foi vitimada pelo excesso de expectativas e tramas de um pequeno grupo de países que levaram um acordo pronto à reunião.

Com o fracasso da COP-15/CMP-5, qualquer resultado mais positivo que saísse da reunião em Cancún, no México, ocorrida entre 29 de novembro e 10 de dezembro de 2010 (COP-16/CMP-6), seria visto como um sucesso. De fato, bastou um pouco de organização por parte dos mexicanos para que se tivesse uma visão mais otimista a respeito das negociações sobre o clima. Um dos resultados mais importantes da COP-16 foi evitar que o Protocolo de Quioto fosse encerrado prematuramente, porque o Japão, a Inglaterra e outros países estavam desestimulados em fazer esforços para cumprir as metas fixadas pelo protocolo, enquanto os Estados Unidos e a China (os maiores emissores mundiais de GEE) não faziam o mesmo.

Abandonar o Protocolo de Quioto sem substituí-lo por outro resultaria em um grande prejuízo, porque os mecanismos do protocolo, como o MDL, deixariam de ser atrativos e o valor dos certificados de reduções de emissões, que são objeto de transações comerciais, cairia à zero. Embora tenham ocorrido alguns resultados positivos, como a manutenção da meta estabelecida na COP-15 de limitar a um máximo de 2°C a elevação da temperatura média global em relação aos níveis pré-industriais, muitas discussões foram transferidas para as COPs seguintes. Nesse sentido, ainda não se sabe como resolver a insatisfação de parte dos países participantes do Protocolo com as suas metas de redução e nem como forçar os Estados Unidos e a China a participarem do acordo.

A décima sétima sessão da Conferência das Partes (COP-17) conjuntamente a CMP-7, ocorridas em 2011 em Durban na África do Sul, avançou nas negociações, pois lançou a base para um acordo futuro de metas de redução de emissão para os Estados Unidos e a China. Nesta COP foi definido o segundo período de compromissos a ser iniciado em 2013, porém deixou a data de finalização para as reuniões posteriores. Além disso, foi aprovada também uma expansão

do Protocolo de Quioto e um calendário para criar um novo protocolo em 2015 que possa entrar em vigor até 2020, em que todos os países do mundo serão obrigados a ter metas de redução de emissão. O conjunto de decisões tomadas nesta conferência ficou conhecido como Plataforma de Durban, no entanto, o acordo global segue ainda em teoria devido à ameaça de resistência ou dificuldade dos países em mudar padrões como a queima de combustíveis fósseis.

De forma contrária, os resultados da COP-18/CMP-8, realizada em Doha no Catar em 2012, não foram muito satisfatórios. O desfecho mais concreto em relação aos textos aprovados foi à adoção de um segundo período para o Protocolo de Quioto. Esse período se inicia em primeiro de janeiro de 2013 com menos participantes e novas metas. Países da União Europeia, por exemplo, se comprometeram a reduzir em 20% as suas emissões. Entretanto, no fim da conferência, muitas questões importantes não foram resolvidas, como os detalhes da segunda fase do Protocolo de Quioto e a assistência financeira aos países em desenvolvimento para lidar com o aquecimento global.

Por fim, a COP-19/CMP-9 realizada em 2013 em Varsóvia na Polônia, teve como principais decisões avanços na Plataforma de Durban e a criação do Mecanismo Internacional de Varsóvia para Perdas e Danos. Este mecanismo fornecerá para as populações mais vulneráveis melhor proteção contra perdas e danos causados por eventos extremos e elevação do nível do mar. Entre os acordos estabelecidos nessa COP inclui-se também um conjunto de decisões sobre as formas de auxiliar países em desenvolvimento a diminuir as emissões de GEE provenientes do desmatamento, que representam aproximadamente um quinto das emissões antrópicas. A COP 19 também teve papel importante ao estimular as partes a um acordo climático universal em 2015.

Todas essas Conferências mostram que o meio ambiente passou a ser um assunto bastante discutido em termos mundiais e que o Protocolo de Quioto, mesmo diante de problemas, vem sobrevivendo às críticas e dificuldades. Entretanto, a civilização moderna, talvez pela dificuldade em perceber que ainda depende da natureza e sofre efeitos dela, ainda não se despertou como desejado para a importância da relação entre crescimento econômico, qualidade ambiental e bem-estar social.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Crescimento econômico: as questões ambientais e o papel da tecnologia

Solow (1956) foi um dos pioneiros a desenvolver um modelo de crescimento econômico embasado principalmente no capital físico. Diferentemente dos modelos de Harrod (1939) e Domar (1946) em que o equilíbrio se encontrava sobre o fio da navalha (equilíbrio instável), Solow (1956) formulou um modelo de crescimento em que se pressupunha substitutibilidade entre os fatores de produção. Dessa forma, a hipótese de equilíbrio instável pode ser descartada. Entretanto, como o insumo capital que sustentava o crescimento apresentava retornos decrescentes, o único modo de manter o crescimento era por meio de uma variável exógena, qual seja o progresso tecnológico. Assim, mantendo as demais variáveis constantes, somente um choque tecnológico exógeno promoveria o crescimento econômico.

Trabalhos contemporâneos a Solow (1956) tentaram explicar o crescimento econômico de forma endógena. Nos modelos de Romer (1990), Grossman e Hepman (1991), Aghion e Howitt (1992), entre outros, as mudanças tecnológicas e o próprio crescimento econômico eram resultados de um processo endógeno à economia via Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Tais modelos são conhecidos na literatura como modelos de crescimento endógeno ou como a Nova Teoria do Crescimento (JONES, 2000).

Nesses modelos, assim como no de Solow (1956), as variáveis trabalho (L), capital (K), tecnologia (A) também compõem a função de produção, obtendo o produto (Y). Existem dois setores na economia, o de bens, onde o produto é produzido e o de P&D, onde o estoque de conhecimento é incrementado. Diferentemente do modelo neoclássico, o crescimento de A é endógeno e depende do setor de P&D. Parte do trabalho é empregada no setor de P&D e parte no setor de bens. Dessa forma, é razoável supor que novas ideias são determinadas pelo ritmo de crescimento de pesquisadores, que por sua vez, depende da taxa de crescimento populacional, exógena ao modelo.

No modelo de Romer (1990), as ideias são vistas como bens não rivais, porém com diferentes graus de exclusividade. O sinal de TV por assinatura e uma nova fórmula matemática são exemplos de bens/serviços não rivais, mas com distintos graus de exclusividade. O primeiro, desconsiderando a pirataria, consegue distinguir clientes de não clientes, ou seja, há um poder de exclusão em que o usuário é somente aquele que paga para obter o bem em questão. Já o segundo, não consegue restringir o número de usuários, isto é, uma vez que a fórmula foi desenvolvida e divulgada, o indivíduo que a criou não consegue impedir que outros indivíduos a

usem. Há um menor grau de exclusividade. Assim, como destaca Jones (2000), o grau de exclusividade de um bem/serviço é o grau a que o proprietário da ideia pode cobrar pelo seu uso.

A não rivalidade inerente ao conhecimento implica que a função de produção apresente retornos crescentes. Dessa forma, o desenvolvimento de novas tecnologias é o motor do crescimento no modelo de Romer (1990). O progresso tecnológico ocorre através de inovações, na forma de novos produtos, processos e/ou mercados, que são muitas vezes resultado da própria atividade econômica, como o processo de aprendizado das firmas (*learning-by-doing*) e dos investimentos em P&D. Se não houver progresso tecnológico, não haverá crescimento econômico.

Pode-se perceber que o processo de desenvolvimento de novas tecnologias, ou seja, o progresso tecnológico é fator chave para o crescimento econômico tanto para modelos neoclássicos como também para modelos de crescimento endógeno. Porém, muitos desses modelos estão fundamentados nas propriedades da função de produção Cobb-Douglas, que pressupõe substitutibilidade entre os insumos. Como no presente trabalho foram analisadas as relações entre crescimento e meio ambiente, o uso de tal função restringiria a análise, dado que a hipótese de substitutibilidade entre capital construído e capital natural, é um tema controverso.

Autores como Georgescu-Roegen (1986), Daly (1997), Daly e Farley (2004), dentre outros, enxergam a economia como um subsistema aberto de um todo maior, que a sustenta e a contém. Esse sistema maior, como esclarece Daly e Farley (2004), é considerado finito, não aumenta e é materialmente fechado, apesar de aberto a energia solar.

Neste contexto, o progresso científico e tecnológico é essencial para aumentar a eficiência no uso dos recursos naturais (renováveis e não renováveis), mas, não é suficiente para substituí-los. A sustentabilidade da economia, no longo prazo, não é possível sem a estabilização dos níveis de consumo *per capita* de acordo com a capacidade de suporte do planeta. Diante disso, uma função de produção na forma multiplicativa como a Cobb-Douglas pode não representar com fidelidade a realidade.

Na maioria dos estudos econômicos, os teóricos aceitam os pressupostos da função Cobb-Douglas, inclusive o de substitutibilidade entre os insumos produtivos, pela sua simplificação e facilidade matemática e analítica. Contudo, as ideias formadas a partir dessa função, embora atraentes, levam a conclusões limitadas. Assim, uma forma alternativa é a função *Constant Elasticity of Substitution* (CES) que flexibiliza um pouco mais o grau de substitutibilidade entre os fatores produtivos.

3.2. O modelo de Ramsey: o bem-estar e as questões ambientais¹³

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 abaixo.

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

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.

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.

¹³ Esta seção foi baseada em Romer (2006).

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 sujeito a 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.

Como destacam Daly e Farley (2004), na ausência de uma verdadeira medida de bem-estar, a maior parte dos políticos enxerga o Produto Interno Bruto (PIB) como um índice fiel da direção geral da mudança de bem-estar. No entanto, o PIB é uma medida quantitativa da atividade econômica, e não uma medida de bem-estar, que é composta tanto por fatores econômicos, quanto por não econômicos. A presunção geral é que o bem-estar econômico e o bem-estar total caminham na mesma direção. Porém, o bem-estar econômico pode induzir uma diminuição significativa no bem-estar não econômico, como por exemplo, a poluição resultante do processo produtivo e de outros fatores.

O trabalho de Xepapadeas (2005) procurou avançar nessas questões ao introduzir no modelo de Ramsey a poluição. Nesse trabalho, a poluição é tratada como um subproduto dos processos de produção ou consumo; as emissões geradas no sistema produtivo afetam o fluxo ou a acumulação de poluentes no meio ambiente e a poluição gera efeitos negativos tanto na utilidade dos indivíduos como na produtividade. Assim, a dimensão ambiental é introduzida no modelo admitindo que as utilidades das famílias representem as preferências entre o consumo por pessoa, e o estoque total de poluição. Nessa formulação, considera-se que tanto o consumo quanto a emissão de GEE determinam a satisfação dos indivíduos.

Os modelos de Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) e de Leimbach e Baumstark (2010) também são tentativas recentes de incluir as questões ambientais, mais especificamente as políticas climáticas, ao âmbito econômico e a função de bem-estar. 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, Bauer e Kriegler (2005) e de Leimbach e Baumstark (2010) são iniciativas que tentaram incluir ao bem-estar, mesmo que indiretamente, as questões ambientais ligadas as mudanças climáticas.

3.2.1. O Modelo de Investimento e Desenvolvimento Tecnológico - MIND

Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) utilizaram a função de produção CES a fim de avaliar medidas de mitigação de GEE via políticas voltadas à criação de um portfólio tecnológico e de utilização de recursos naturais renováveis.

A formulação teórica do presente estudo baseou-se no modelo construído por estes autores, denominado 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. O modelo considera o mundo como uma unidade, sem diferenciação regional. O progresso tecnológico é considerado endógeno e pode diminuir os custos de mitigação, além disso, o *learning-by-doing* é um potencial redutor de custos.

O modelo MIND é um aprimoramento dos modelos de mudança tecnológica endógena em três aspectos. Primeiro, introduz o setor de P&D separadamente, tanto para o trabalho quanto para a eficiência energética. Segundo, o modelo diferencia o estoque de capital físico no setor de energia, o que possibilita analisar a dinâmica interna do setor, e por último, admite comparar todas as opções de mitigação relevantes, como a eficiência energética, o uso de energia renovável e o sequestro de carbono.

O modelo maximiza uma função de bem-estar social fundamentada no consumo *per capita* e pressupõe que no longo prazo, as políticas climáticas poderiam aumentar a taxa de crescimento da economia, uma vez que o setor de P&D pode crescer sem induzir a demanda de energia adicional. Além disso, o MIND calcula os retornos sociais do setor de P&D, implicando que os *spillovers* intertemporais já são internalizados, ou seja, os *spillovers* são tratados como um fenômeno natural que ocorre via investimentos em P&D.

Embora o investimento seja de suma importância para o avanço técnico dos fatores produtivos, a maioria dos modelos econômicos, por simplicidade, não aborda efetivamente essa relação. Dessa forma, o modelo MIND proporciona a avaliação do enfoque da mudança tecnológica nos fatores produtivos ao considerar o setor de P&D.

A função de produção utilizada no modelo MIND é a CES. Esta função considera que a elasticidade de substituição entre os três fatores (capital, trabalho e recursos naturais - energia) é

um valor constante, mas esse valor pode variar de zero a infinito dependendo do tipo de relação existente entre os mesmos. A expressão (1) ilustra a função de produção utilizada por Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005).

$$Y_A = \Phi_A [\xi_A^L (A * L_A)^{-\rho_A} + \xi_A^E (B * E_A)^{-\rho_A} + \xi_A^K (K_A)^{-\rho_A}]^{-\frac{1}{\rho_A}} \quad (1)$$

em que a mudança tecnológica, Φ_A , é medida através da Produtividade Total dos Fatores (PTF)¹⁴, L_A , E_A e K_A são os fatores trabalho, energia e capital, respectivamente. ξ_A^L , ξ_A^E e ξ_A^K são parâmetros de distribuição dos fatores no produto Y_A . E ρ_A é o parâmetro de substituição que determina a elasticidade de substituição (σ_A). No modelo, foi definido um valor maior do que zero e menor do que um ($0 < \sigma_A = 1 / (1 + \rho_A) < 1$), utilizando a hipótese de que todos os fatores são essenciais para a produção e, portanto, não podem ser inteiramente substituídos¹⁵. Consequentemente, como salientam os autores, a função Cobb-Douglas não seria apropriada para analisar os aspectos macroeconômicos do uso de energia, pois permite que a energia seja assintoticamente substituída por capital físico.

As empresas precisam escolher a taxa de produtividade do trabalho (crescimento de A) e da produtividade (eficiência) energética (B). Além disso, assume-se que a variação do capital no tempo depende da taxa de poupança e da depreciação do capital. A oferta de energia é dividida em combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), energias renováveis (eólica, biomassa e solar) e energias não fósseis (energia nuclear e energia hidroelétrica).

O ponto de partida das análises do modelo MIND é a comparação, por meio de simulações, de um cenário de referência ou *business-as-usual* com um cenário de proteção do clima, cujo objetivo é estabilizar a concentração de CO₂ próximo a 420 ppm, valor recomendado pelo *German Scientific Advisory Board on Global Change* (WBGU) para a estabilização climática. Assim, o cenário de proteção do clima otimiza o bem-estar econômico social concomitantemente a uma política climática que retarda o processo de aquecimento global. Como resultado no modelo MIND, a mitigação das emissões implicou em perda de bem-estar econômico, por outro lado, as perdas são consideravelmente menores quando a tecnologia é utilizada.

¹⁴ A Produtividade Total dos Fatores (PTF) diz respeito à contribuição de todos os insumos produtivos no processo de produção (FERREIRA, 2010).

¹⁵ A função de produção CES pode assumir outros formatos. Se na expressão (1) $\rho \rightarrow 0$, a elasticidade de substituição tende para um, que representa uma função Cobb-Douglas, e os insumos tornam-se substitutos imperfeitos. Se $\rho \rightarrow \infty$, a elasticidade de substituição tende para zero e a função CES converge para uma Leontief, onde se relacionam proporções mínimas entre os fatores de produção, ou seja, há uma relação de complementaridade. Por outro lado, se ρ tender para -1 a função CES converge para uma função linear e a elasticidade de substituição tende para o infinito. Neste caso, há substitutibilidade perfeita entre os fatores de produção (MAS-COLLEL; WHINSTON; GREEN, 1995).

O modelo MIND permitiu compreender melhor o crescimento econômico em um cenário de mudanças climáticas. Entretanto, é um modelo simplificado, pois não considera os fluxos comerciais entre as regiões, uma vez que analisa o mundo como uma única região. Esta limitação foi superada no modelo de Leimbach e Baumstark (2010), o que pode ser visto na seção seguinte.

3.2.2. O modelo MIND-RS

Leimbach e Baumstark (2010), a partir do modelo MIND, 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 Estilizado¹⁶, e é um modelo multirregional composto pelos Estados Unidos, Europa, China e Resto do Mundo, 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 *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*

¹⁶ 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*.

tecnológicos: *spillover disembodied* e *spillover embodied*. Os *spillovers disembodieds* 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 *spillovers embodieds* representam mudanças tecnológicas que são adicionadas ao *know-how* tecnológico incorporado em produtos estrangeiros ou inovações diretamente transferidas – patentes. Em outras palavras, os *spillovers embodieds* 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 *spillovers embodieds* em distintos cenários de políticas climáticas. O conceito de *spillovers embodieds*, 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 acarretou 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 à 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 *embodieds* 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

Nessa seção foram descritos os procedimentos metodológicos baseados no trabalho de Leimbach e Baumstark (2010). Como pode ser verificado, o modelo matemático proposto prevê a modelagem de um sistema de equações dinâmico com estrutura complexa e com equações não lineares. Devido a estas características utilizou-se a simulação que permitiu verificar o comportamento das variáveis em distintos cenários para as regiões Brasil e países do Anexo I.

4.1. 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 o *spillover* 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, o Quadro 1 resume os índices mais utilizados na modelagem¹⁷.

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 ∈ J)	J = {C, I, Q, P, 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; 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	<u>Fatores de produção:</u> K (capital), L (trabalho), E (energia final), PE (energia primária)

Fonte: 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

¹⁷ Para mais detalhes sobre as variáveis e parâmetros do modelo ver o Quadro A.1 no Apêndice A.

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).

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

em que σ é uma taxa pura de preferência intertemporal¹⁸, 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 este 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). Este produto foi estimado por meio de uma função de produção CES conforme a expressão (3).

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

$$\forall j \in \{C, I\}$$

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 (rd_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).

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

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

¹⁸ 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).

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 a quando a produtividade do Brasil for menor do que a do Anexo I, de acordo com a expressão (5).

$$sp_m(i, t) = \begin{cases} \sum_r \left[\left(\frac{X_I(r, i, t)}{K_1(i, t)} \right)^\psi \Omega_m (A_m(r, t) - (A_m(i, t))) \right] : A_m(i, t) < A_m(r, t) \\ 0 : A_m(i, t) \geq A_m(r, t) \end{cases} \quad (5)$$

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. Estes percentuais foram obtidos por meio da otimização dinâmica, que ao maximizar o bem-estar encontraram-se tais valores¹⁹.

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 através 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 $[sY_I(i)]$ 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 setores²⁰, exceto os setores de energia renovável e de energia restante, segue o comportamento padrão conforme a expressão (14).

¹⁹ Para mais detalhes ver seção 4.2.

²⁰ As seções subsequentes mostram mais detalhes a respeito dos setores.

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

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 .

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 dos mesmos. 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).

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

4.1.1. Setor de Energia Final

Nessa subseção 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 se referem 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 $PE(i,t)$ 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*²¹(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* está em função dos investimentos em energia renovável (ver expressão 29), e a produção final nesse setor se difere dos demais por utilizar o conceito de aquisição de capital.

²¹ 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).

4.1.2. 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).

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

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.

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 Rogner²² e dado pela expressão (25).

²² A curva de Rogner descreve os custos de extração em relação à quantidade extraída, sem a distinção entre recursos e reervas. Estes 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).

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

em que $\chi_1(i)$, $\chi_2(i)$ e $\chi_3(i)$ são parâmetros da curva de custo marginal de extração²³ 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).

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

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; $v(i)$ 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.

4.1.3. 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):

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

²³ Os valores para estes e outros parâmetros estão no Quadro A.1 no Apêndice A.

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 .

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, por meio do *software Matlab/Simulink 2011*.

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 e MEDINA, 2006). Dessa forma, a simulação é um dos instrumentos mais adequado 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. Estes 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 destes parâmetros variam entre 0 e 1 ou entre 0% e 100%, no entanto, não se sabe exatamente qual o valor real destes parâmetros. A solução para este 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 restrições²⁴. 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, foram construídos os seguintes cenários:

²⁴ Para mais detalhes ver Gandolfo (2012).

- 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.
- 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, manteve-se desativada a expressão (15), por outro lado foi habilitado o parâmetro $sp_m(i,t)$ da expressão (4) para as duas regiões.
- Cenário CPC-1: o primeiro cenário de política climática (CPC-1) foi delimitado seguindo as recomendações iniciais do Protocolo de Quioto, que impunha restrições aos países do Anexo I. Dessa forma, somente a região composta pelos países do Anexo I deve cumprir metas de emissões, além disso, não existe a influência de *spillovers* tecnológicos. Nesse cenário, o parâmetro $sp_m(i,t)$ da expressão (4) foi desabilitado para as duas regiões e a expressão (15) foi ativada somente para a região do Anexo I.
- Cenário CPC-2: no segundo 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).
- 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 A.1 no 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 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 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 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. Estas 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 A.1 que encontra-se no Apêndice A e a Tabela 1 apresenta os valores iniciais das variáveis utilizadas, no ano 2000, para as duas regiões em estudo²⁵.

Tabela 1 - 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
<u>Exportações de recursos do setor de extração (em milhões de toneladas)</u>	<u>4,306</u>	<u>2,356</u>

Fonte: Leimbach e 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. Nestas situações, utilizou-se o Princípio da Correspondência de Samuelson, que atribui valores

²⁵ 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 EUA, e China e Resto do Mundo de Leimbach e Baumstark (2010).

arbitrários para os parâmetros desconhecidos, mas de tal forma que estes 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 no Quadro A.1 (ver 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 percentuais²⁶. 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 otimização²⁷

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
$sP(i)$	0,5	0,5	% do total de permissões de emissões alocado internamente

Fonte: Resultados da pesquisa.

*Disponibilidade interna.

Como pode-se observar na Tabela 2, os parâmetros $sY_I(i)$, $sD_{II}(i)$, $sD_{IC}(i)$, $sD_{If}(i)$ 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.

²⁶ Os valores iniciais são arbitrários e servem para que o processo de otimização seja iniciado.

²⁷ 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: $sD_{crd_E}(i) = 1 - [sD_c(i) + sD_{crd_L}(i)]$.

5.2. Análise dos cenários

5.2.1. Cenário de referência (CR) ou *benchmark*

Os resultados encontrados para os parâmetros por meio da otimização dinâmica e os demais parâmetros e variáveis coletados empiricamente constituem o arcabouço inicial do modelo estudado, o que permitiu analisar o cenário de referência (CR) ou *benchmark*. No CR não existe restrição quanto às emissões de CO₂ e nem a presença de *spillovers* tecnológicos. Com o intuito de verificar a influência dos *spillovers* tecnológicos nas variáveis econômicas foi construído um cenário comparativo, CR-S, o qual possui *spillovers*, porém sem a existência de restrição quanto às emissões. É importante destacar que o *spillover* não é objeto de política, pois não é uma variável diretamente controlável, pretende-se apenas verificar a influência do mesmo no desempenho econômico das regiões. As Figuras 1 e 2 apresentam a evolução do PIB para o Brasil e o Anexo I nos cenários de referência sem *spillovers* (CR) e com *spillovers* tecnológicos (CR-S)²⁸.

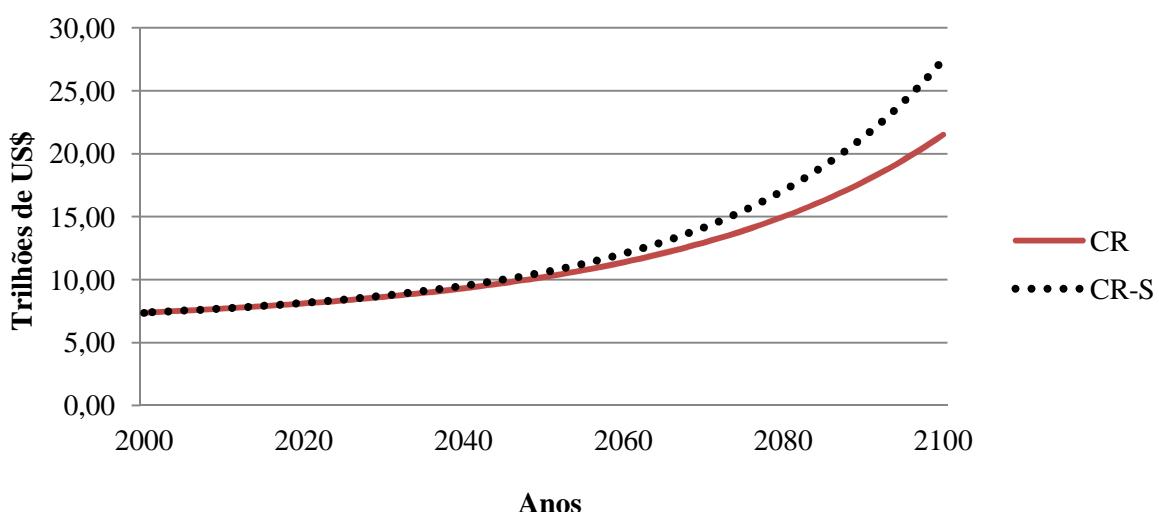


Figura 1- Comportamento do PIB ao longo de 100 anos para o Brasil

Fonte: Resultados da pesquisa.

²⁸ O primeiro ano da simulação comportou-se como um choque em todos os cenários e variáveis analisados, dessa forma o mesmo foi desconsiderado das análises.

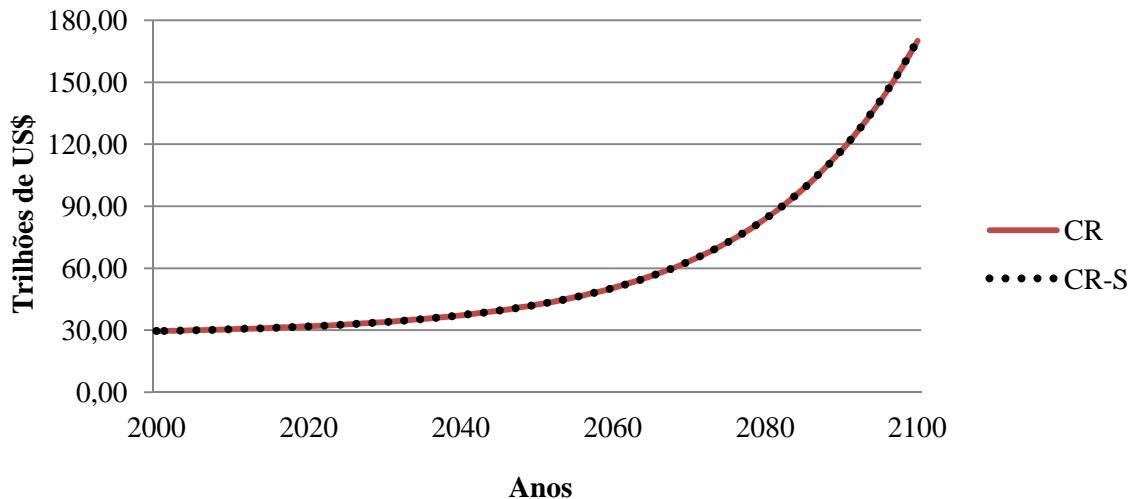


Figura 2 – Comportamento do PIB ao longo de 100 anos para o Anexo I

Fonte: Resultados da pesquisa.

É importante relembrar que o modelo em análise tem como pressuposto que o *spillover* tecnológico 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 *spillovers* mudaria consideravelmente ao longo do tempo. Observar-se-ia maior crescimento da economia, pois as mudanças tecnológicas 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.

O comércio internacional de bens de capital, fonte dos *spillovers*, 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),²⁹ sendo que na segunda metade do século o crescimento médio anual foi de 5,11%.

²⁹ Tudo que é exportado por uma determinada região é importada pela outra.

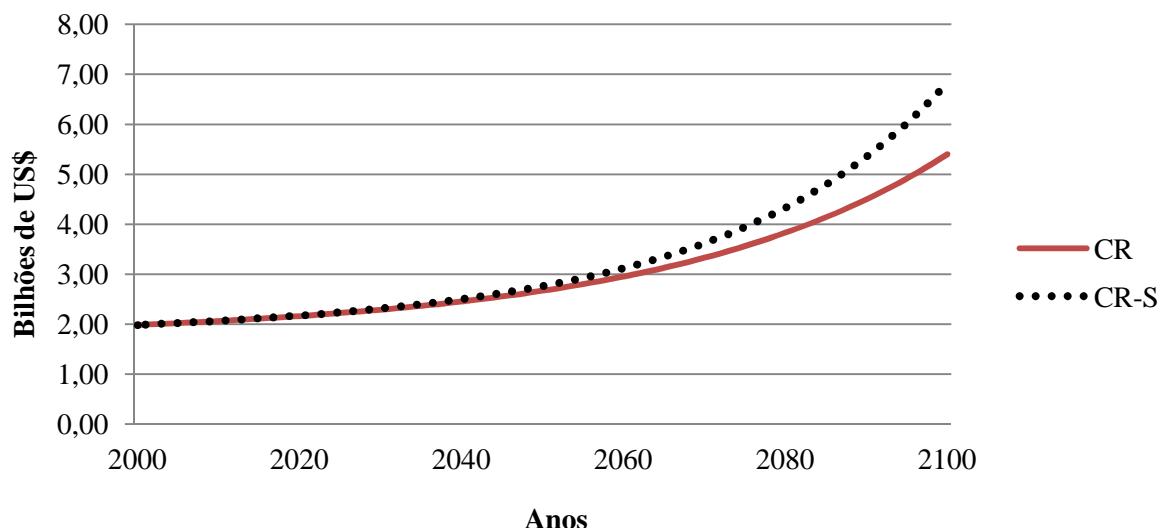


Figura 3 - Comportamento das exportações brasileiras de bens de investimento (capital) ao longo de 100 anos

Fonte: Resultados da pesquisa.

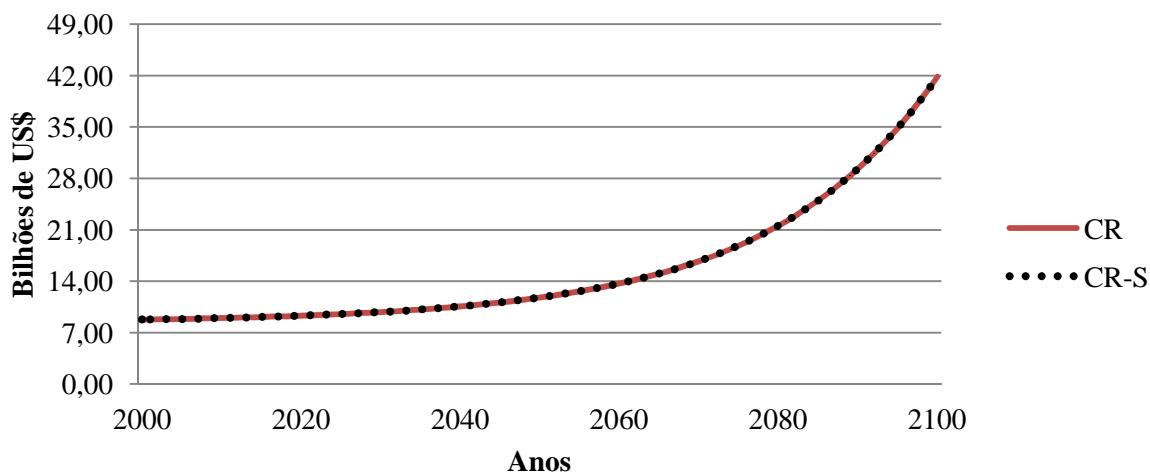


Figura 4 - Comportamento das exportações dos países do Anexo I de bens de investimento (capital) ao longo de 100 anos

Fonte: Resultados da pesquisa.

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 *spillovers* (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 *spillovers* tecnológicos *embodieds*, 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 do *spillover* verificado principalmente neste mesmo período. Como destacam Leimback e Baumstark (2010), o ganho potencial do *spillover*, ou 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 do *spillover*. Esse ganho potencial, por conseguinte, aumenta a intensidade das trocas comerciais entre as regiões.

As exportações de bens de capital e de bens de consumo do Brasil seriam, em média, 8,97% e 10,43% respectivamente maiores no cenário CR-S quando comparadas ao cenário CR. Em termos absolutos, estes 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 dos *spillovers*, 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.

Este 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.

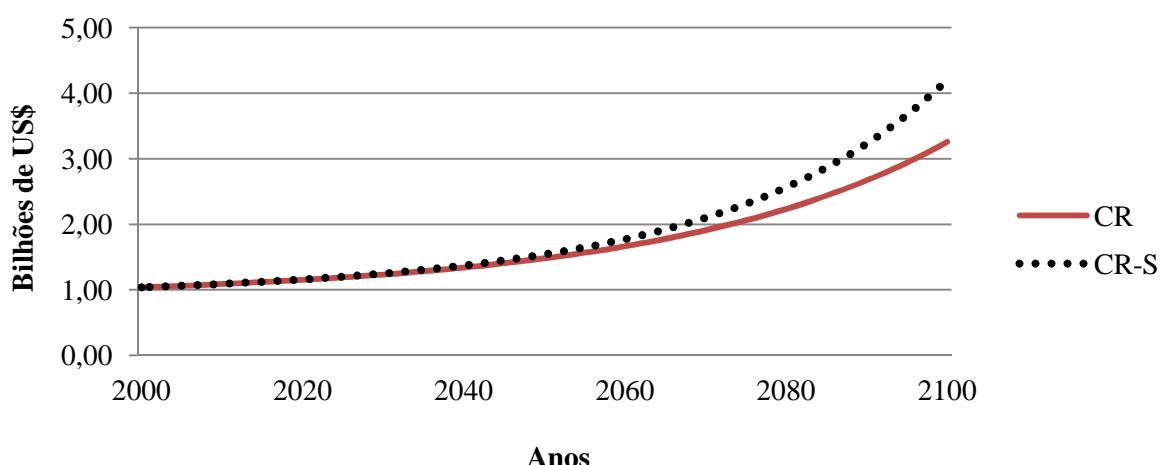


Figura 5 – Comportamento das exportações brasileiras de bens de consumo ao longo de 100 anos
Fonte: Resultados da pesquisa.

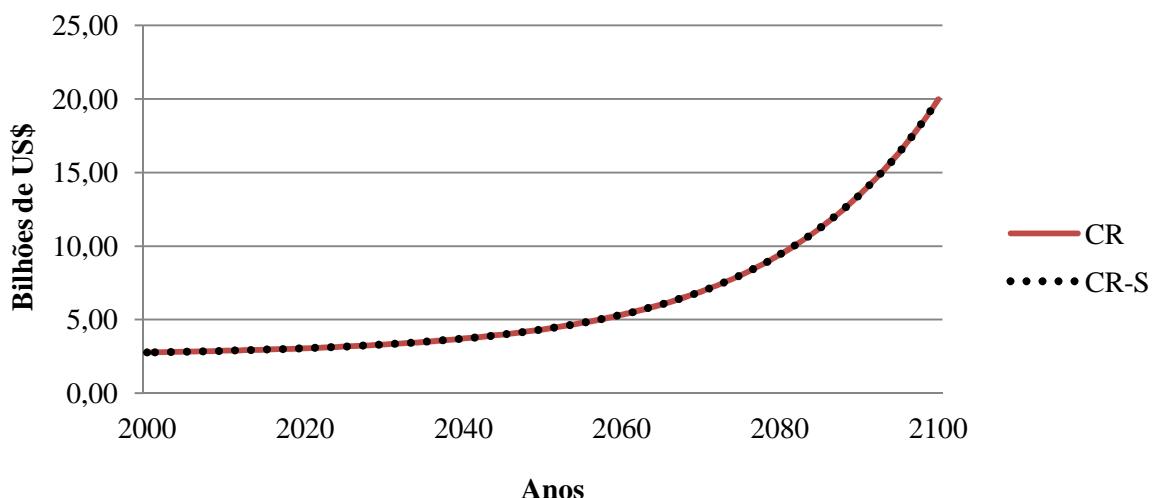


Figura 6 – Comportamento das exportações dos países do Anexo I de bens de consumo ao longo de 100 anos

Fonte: Resultados da pesquisa.

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 cresceriam, respectivamente, 3,77% e 6,18% ao ano. Nota-se ainda que por essa região ser a provedora de *spillovers*, 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 CO₂ das duas regiões não seriam influenciadas pelos *spillovers* tecnológicos, como revela a Figura 7. É importante destacar, que nos cenários CR e CR-S não existe qualquer tipo de restrição ou cooperação quanto às emissões de CO₂. Dessa forma, as regiões comportam-se livremente quanto ao uso de recursos fósseis, principal responsável pelas mudanças climáticas de origem antrópica. 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. De fato, o nível de emissões cresceria 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.

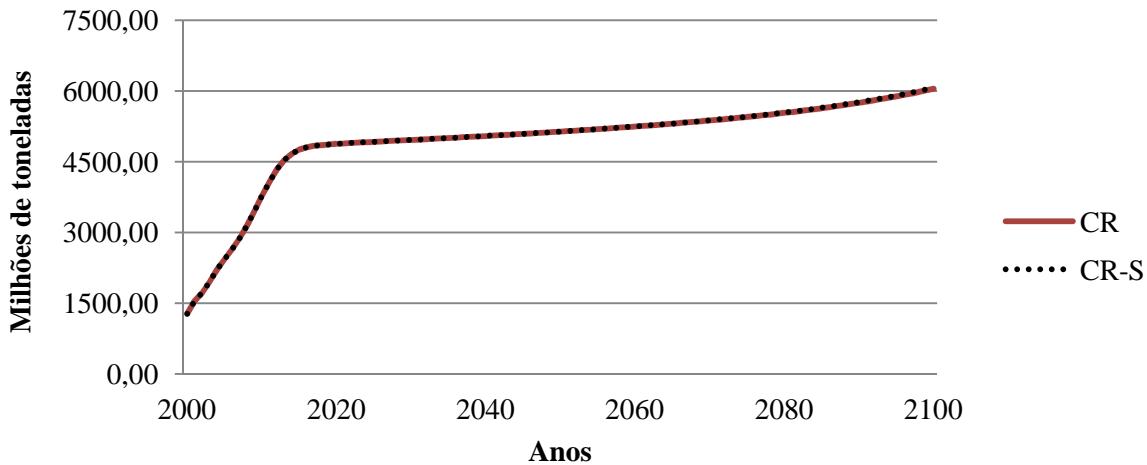


Figura 7 – Evolução das emissões totais de CO₂ nas duas regiões em milhões de toneladas

Fonte: Resultados da pesquisa.

Aparentemente, a não influência dos *spillovers* tecnológicos nas emissões de CO₂ contradiz alguns estudos, como os de Fischer e Newell (2008), IEA (2008), De La Torre, Fajnzylber e Nash (2009) e Mills (2009), que afirmam que o desenvolvimento tecnológico pode mitigar as emissões com menor custo ao crescimento econômico. Porém, deve-se destacar que o *spillover* ocorre no sentido Anexo I para o Brasil, dessa forma, apenas o Brasil é influenciado diretamente pelos *spillovers*. Como as emissões do Brasil são muito inferiores quando comparada 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. Por outro lado, é importante destacar também 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 *spillovers* tecnológicos. Este resultado demonstrou que sem nenhum tipo de restrição, a tendência geral é de aumento das emissões e, por conseguinte, agravamento do processo de aquecimento global.

O bem-estar das regiões também é outra variável que não seria afetada pelos *spillovers* tecnológicos 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 longíssimo prazo (após 100 anos).

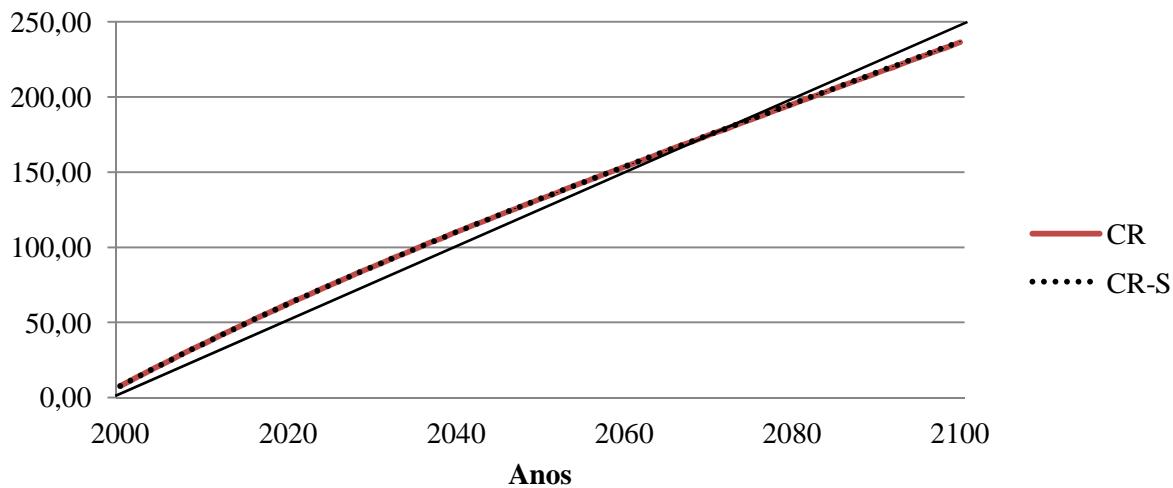


Figura 8 – Comportamento do bem-estar total ao longo de 100 anos e linha de 45º

Fonte: Resultados da pesquisa.

A representatividade do Brasil frente a um bloco de países composto por 42 nações desenvolvidas poderia ser um argumento plausível da não influência dos *spillovers* 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 dos *spillovers* ao bem-estar total são praticamente imperceptíveis, uma vez que o bem-estar econômico é mensurado em termos de consumo *per capita* e os *spillovers* influenciam apenas a região brasileira.

Em geral, os resultados das simulações revelaram que os *spillovers* tecnológicos impactariam significativa e positivamente as variáveis econômicas do Brasil, como o PIB e o comércio internacional. Por outro lado, há indícios de que a ausência de restrições quanto às emissões implicaria no crescimento das mesmas. Isso corrobora o fato da importância da adoção de políticas climáticas que levam a mitigação de GEE.

5.2.2. Cenários de políticas climáticas (CPC)

5.2.2.1. Cenário CPC-1

Na subseção anterior, foi analisado o impacto dos *spillovers* tecnológicos no crescimento econômico e no bem-estar, sem levar em consideração os impactos de uma eventual

restrição de emissões de CO₂. Nesta seção, procurou-se analisar os impactos de uma política climática que minimize as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Como discutido anteriormente, o Protocolo de Quioto estabeleceu metas de redução de emissões de GEE para países industrializados, denominados países do Anexo I (para mais detalhes ver a seção 2). Dessa forma, o primeiro cenário de política climática (CPC-1) foi construído seguindo as diretrizes iniciais do Protocolo de Quioto. Nesse cenário, não existe *spillovers* tecnológicos e somente a região composta pelos países do Anexo I deve cumprir metas de emissões por meio de um montante inicial de permissões. Esse montante restringe os níveis de emissões da região do Anexo I de tal forma que para a mesma emitir mais gases, ela deve comprar da outra região (Brasil) permissões de emissões.

A Figura 9 apresenta os resultados da simulação para o cenário CPC-1 em comparação com o cenário de referência (CR) para as emissões totais de CO₂. Nota-se que a política climática surtiria efeito no médio prazo com uma queda acentuada das emissões a partir do final da década de 2040. O fato de o efeito ocorrer no médio prazo não minimizaria a importância da política climática, que possibilitaria a redução das emissões e, por conseguinte, menor pressão sobre o processo de aquecimento global. Esta queda no nível das emissões está relacionada principalmente a uma mudança na estratégia de investimento, induzida pela política climática, que favorece o uso de energias alternativas em detrimento do uso de energia fóssil, que é o principal causador das emissões de GEE antropogênicos.

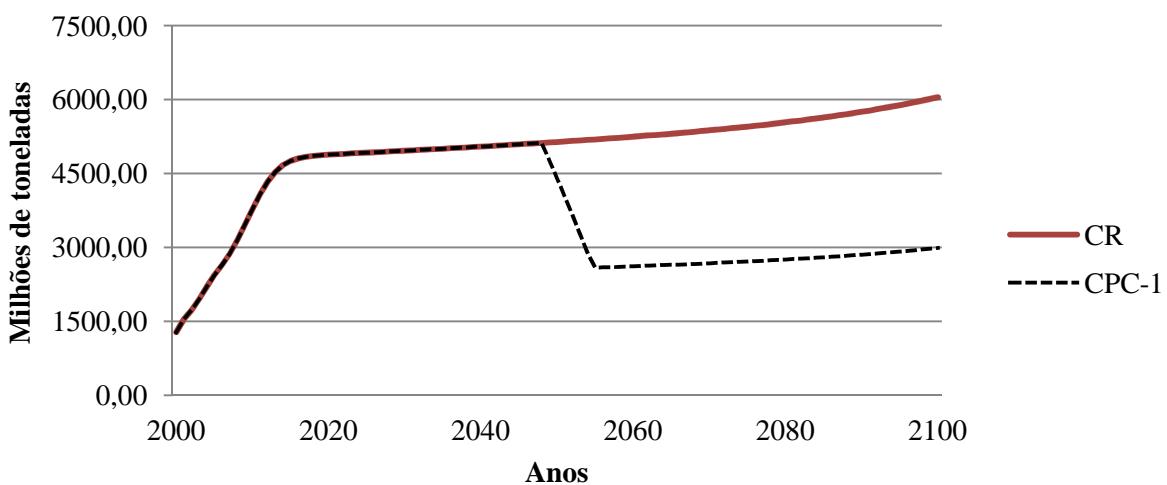


Figura 9 – Evolução das emissões totais de CO₂ nas duas regiões em milhões de toneladas nos cenários CR e CPC-1

Fonte: Resultados da pesquisa.

A sensibilidade da política climática está intimamente ligada ao nível de restrição das emissões. Quanto maior a restrição, mais rápido é o efeito da política, o que demonstra robustez e eficácia da mesma. O pequeno aumento das emissões globais verificado na segunda metade do século (em média 0,35% ao ano) foi decorrente das emissões oriundas da mudança no uso do solo e também pelo fato de o Brasil não ter nenhum tipo de restrição quanto às suas emissões.

O Brasil é um dos países que mais emite GEE no mundo, principalmente devido à mudança no uso do solo. A agricultura extensiva, as queimadas e o desmatamento que são presentes no país contribuem fortemente para suas emissões. O próprio relatório do IPCC aponta para a mudança do uso do solo como um dos principais fatores antrópicos que colaboram para o aquecimento global (IPCC, 2013). Além disso, embora a matriz energética brasileira seja comparativamente menos poluente, a participação das emissões oriundas do setor energético aumentou consideravelmente nos últimos anos. Em 2005, representava apenas 16% das emissões totais, já em 2010, este percentual saltou para 32% (SEPED, 2013). Dessa forma, é fundamental que haja uma política climática em âmbito global, pois somente assim, os níveis de emissões de GEE serão realmente minimizados. Como salientam Barrett (2009) e Edmonds *et al.* (2012), apenas o progresso 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.

É importante ressaltar que o Brasil, no cenário CPC-1, está se comportando livremente, ou seja, sem nenhuma meta de mitigação de GEE. Dessa forma, foi desconsiderado qualquer tipo de compromisso voluntário quanto à mitigação por parte do Brasil. Essa formulação foi feita e é válida para os demais cenários de políticas climáticas, justamente, para avaliar os eventuais impactos dessas políticas sobre o crescimento e o bem-estar econômico brasileiro.

Quanto aos efeitos da política climática no crescimento econômico, a Figura 10 revela que o PIB do Anexo I não deixaria de crescer, porém o mesmo cresceria a um ritmo menor. O custo médio para o crescimento econômico seria de apenas 0,06% ao ano, o que é insignificante perto dos ganhos econômicos, sociais e ambientais que se podem obter em um planeta menos quente e poluído, como menor incidência de doenças respiratórias, eventos climáticos extremos, entre outros. No cenário CPC-1 não houve efeitos sobre o comércio internacional para ambas as regiões e nem sobre o crescimento econômico brasileiro.

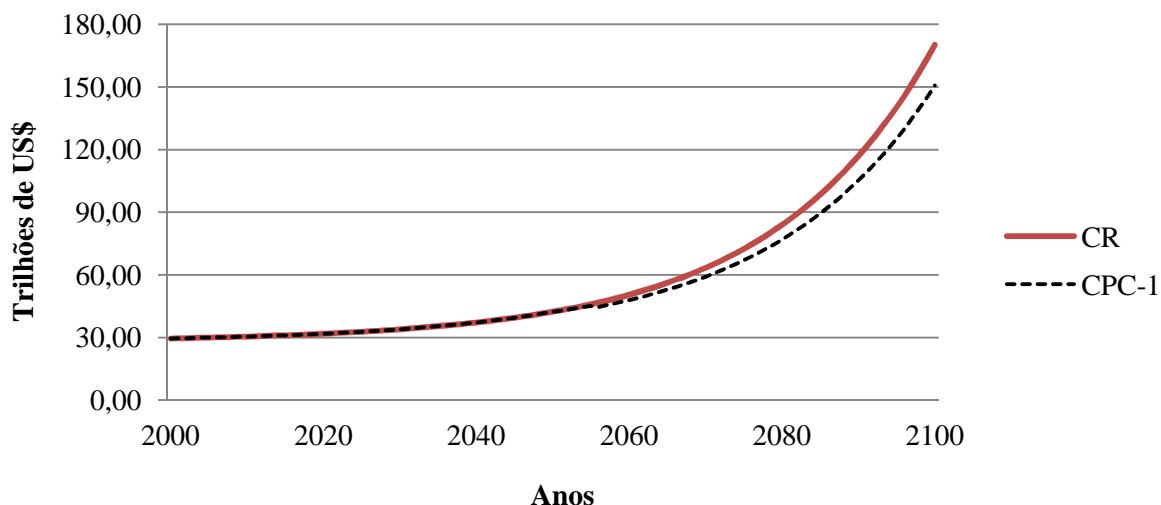


Figura 10 – Comportamento do PIB do Anexo I na presença de uma política climática

Fonte: Resultados da pesquisa.

Com relação ao bem-estar econômico, o impacto da política climática seria insignificante, como pode ser observado na Figura 11. No cenário CPC-1, o bem-estar total diminuiria apenas 0,38% quando comparado ao cenário CR, o que acarretaria em uma perda irrisória de 0,004% ao ano, em média. Esse resultado respalda ainda mais a importância de uma política climática de mitigação de GEE, uma vez que os efeitos sobre o crescimento econômico e o bem-estar são praticamente imperceptíveis.

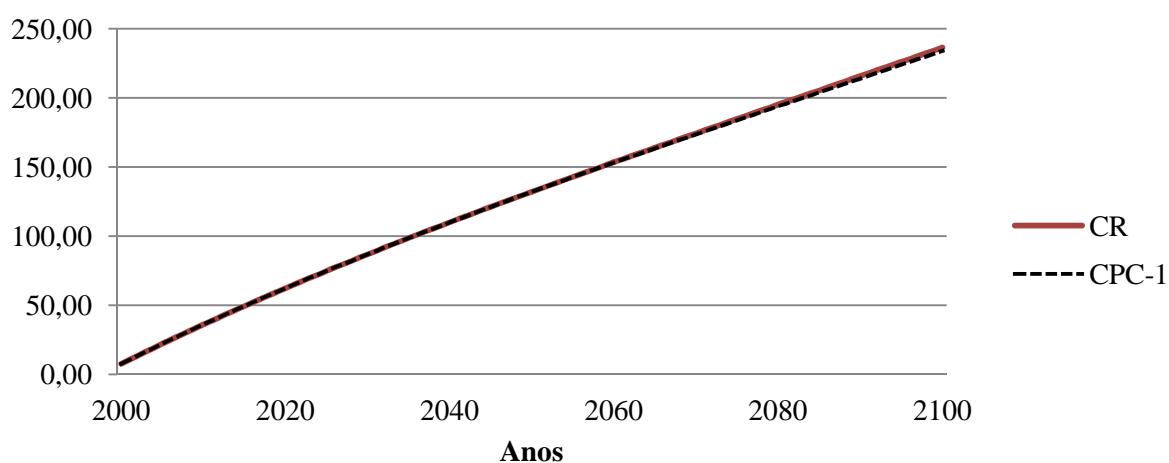


Figura 11 – Comportamento do bem-estar total na presença de uma política climática

Fonte: Resultados da pesquisa.

5.2.2.2. Cenário CPC-2

Como observado na Figura 9, apesar da diminuição substancial das emissões devido à restrição imposta à região do Anexo I, existe uma tendência de crescimento das emissões no longo-prazo, dado que o Brasil não possui nenhum tipo de restrição no contexto do Protocolo de Quioto. Esse fato levou à construção do cenário de política climática CPC-2, em que tanto o Anexo I quanto o Brasil devem cumprir metas de redução de emissões. Além disso, na COP-17 também foi discutida a elaboração de um novo protocolo climático em que todos os países devem cumprir tais metas, dessa forma, é plausível supor um cenário como o CPC-2. É importante ressaltar que neste 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 (Figura 12). Em decorrência disso, fica evidente que uma política climática global é fundamental para a mitigação de GEE. Novamente, essa diminuição se daria principalmente pela mudança na estratégia de investimento de energia fóssil por fontes de energia renováveis e não fóssil, induzida pela política climática.

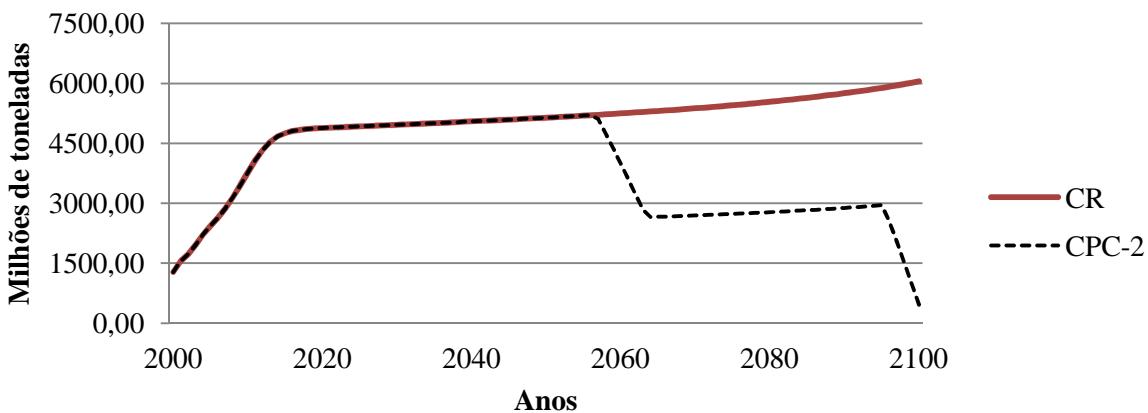


Figura 12 – Evolução das emissões totais de CO₂ nas duas regiões em milhões de toneladas nos cenários CR e CPC-1

Fonte: Resultados da pesquisa.

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 nas Figuras 13 e 14. 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 (Figura 13). 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 0,002% ao ano. Mas, é importante destacar que a política climática no modelo MIND-RS está ligada intimamente ao setor energético, uma vez que o setor agropecuário não foi 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.

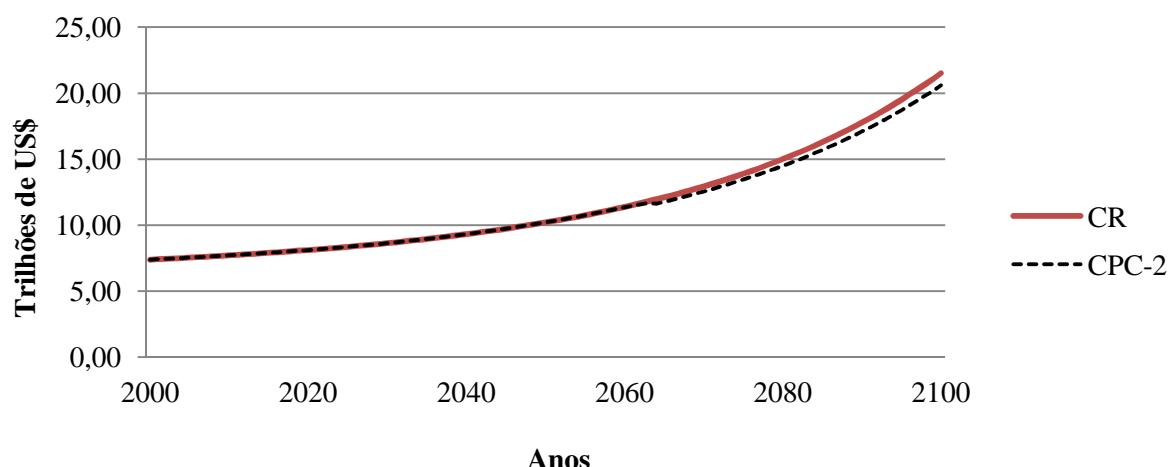


Figura 13 – Comportamento do PIB brasileiro na presença de uma política climática global

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. O desempenho econômico do Anexo I seria relativamente melhor no cenário CPC-2 do que no cenário em que apenas essa região havia obrigações quanto às emissões (cenário CPC-1). Esse resultado demonstra que uma política climática global, além de ser mais eficaz quanto à diminuição das emissões de GEE, também dividiria os custos de mitigação para todas as regiões. Além disso, o impacto sobre o comércio internacional deixaria de ser relevante.

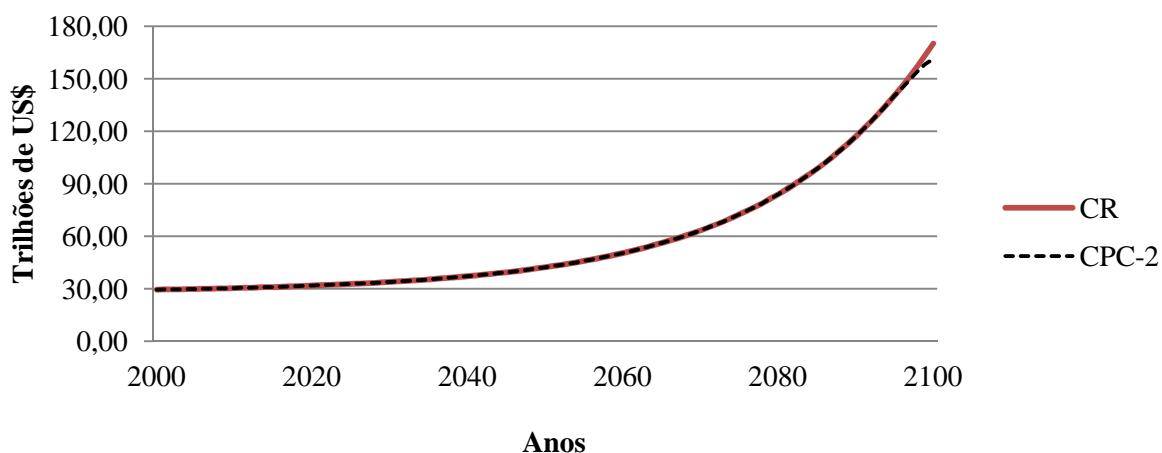


Figura 14 – Comportamento do PIB do Anexo I na presença de uma política climática global

Fonte: Resultados da pesquisa.

De acordo com a Figura 15 a política climática global de restrição de emissões de GEE não teria efeito sobre a trajetória do bem-estar total. Esse resultado foi diferente do encontrado no cenário CPC-1, em que apenas o Anexo I tinha responsabilidades quanto à mitigação de GEE. No cenário CPC-1, o bem-estar diminuiria ligeiramente, enquanto que na política climática global não ocorreriam perdas de bem-estar. 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.

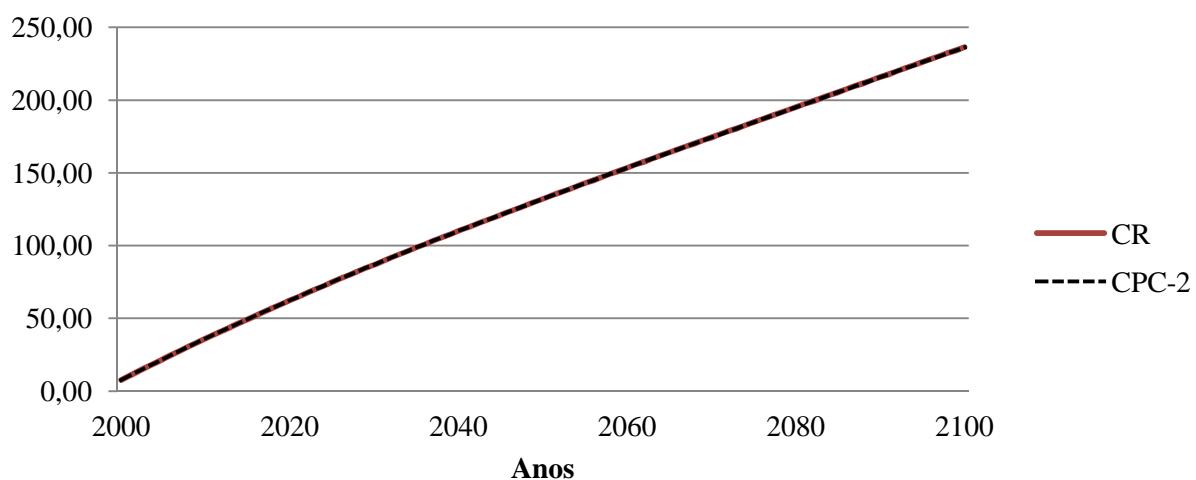


Figura 15 – Comportamento do bem-estar total na presença de uma política climática global

Fonte: Resultados da pesquisa.

5.2.2.3. Cenário CPC-2S

Como visto na seção anterior às 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 se tornar 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. Na seção 5.2.1 foi verificado que os *spillovers* influenciam positivamente a economia brasileira 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, há também a presença de *spillovers* tecnológicos.

As Figuras 16 e 17 mostram o comportamento do PIB brasileiro e do Anexo I, respectivamente, na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos. É importante relembrar que o *spillover* ocorre no sentido Anexo I para o Brasil, dessa forma o desempenho econômico da região Anexo I no cenário CPC-2S é o mesmo quando comparado ao cenário CPC-2 (Figura 17). De fato, os *spillovers* afetariam positiva e significativamente o desempenho da economia brasileira, como pode ser observado na Figura 16.

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, CPC-2.

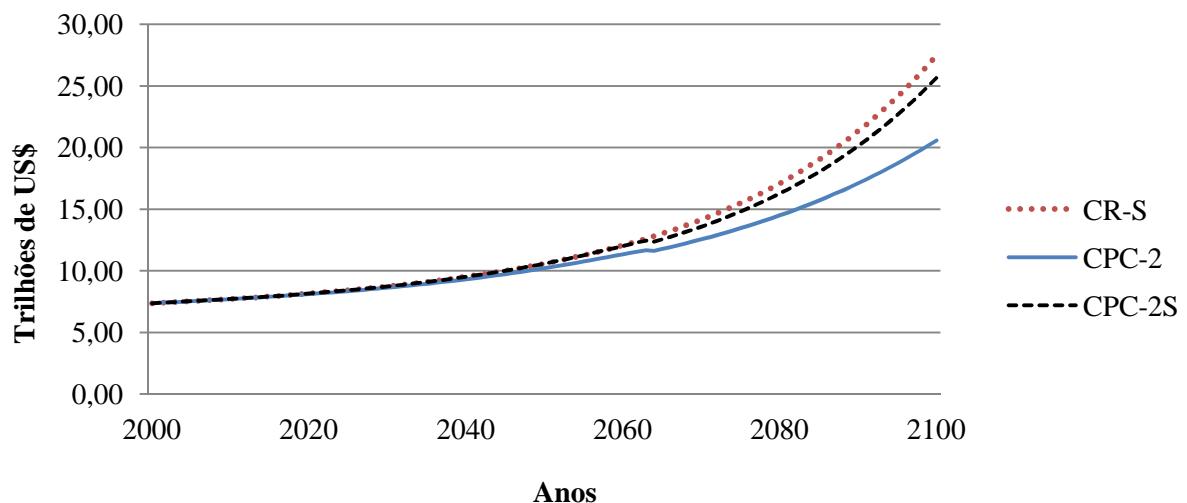


Figura 16 – Comportamento do PIB brasileiro na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos

Fonte: Resultados da pesquisa.

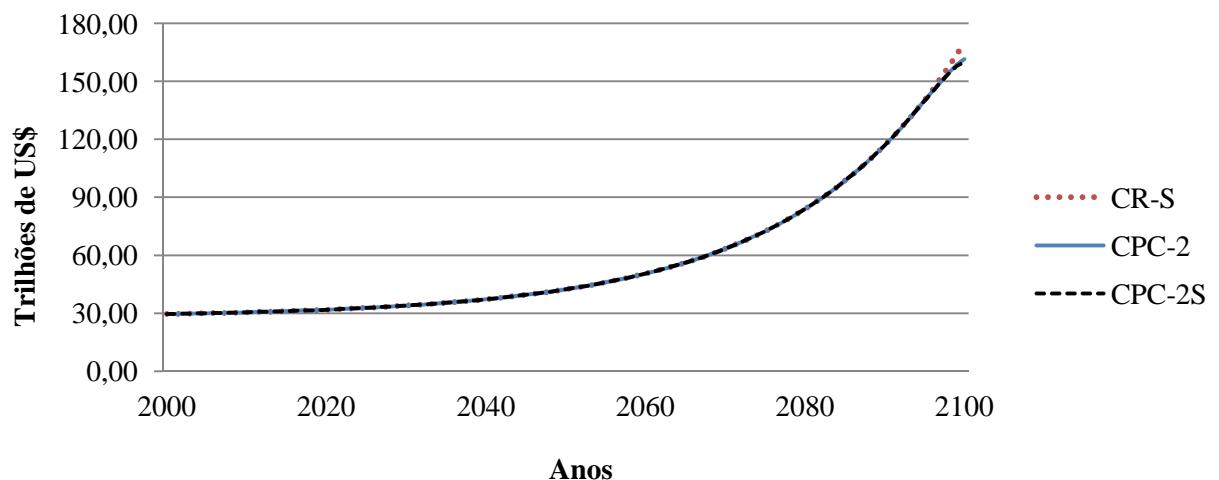


Figura 17 – Comportamento do PIB do Anexo I na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos

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 (Figuras 18 e 19).

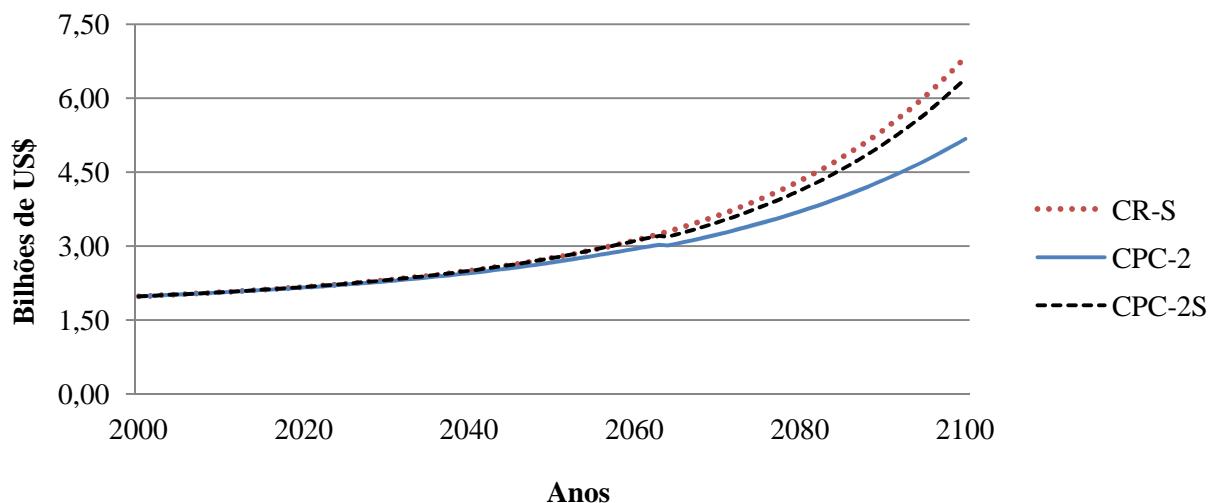


Figura 18 – Exportações de bens de capital do Brasil na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos

Fonte: Resultados da pesquisa.

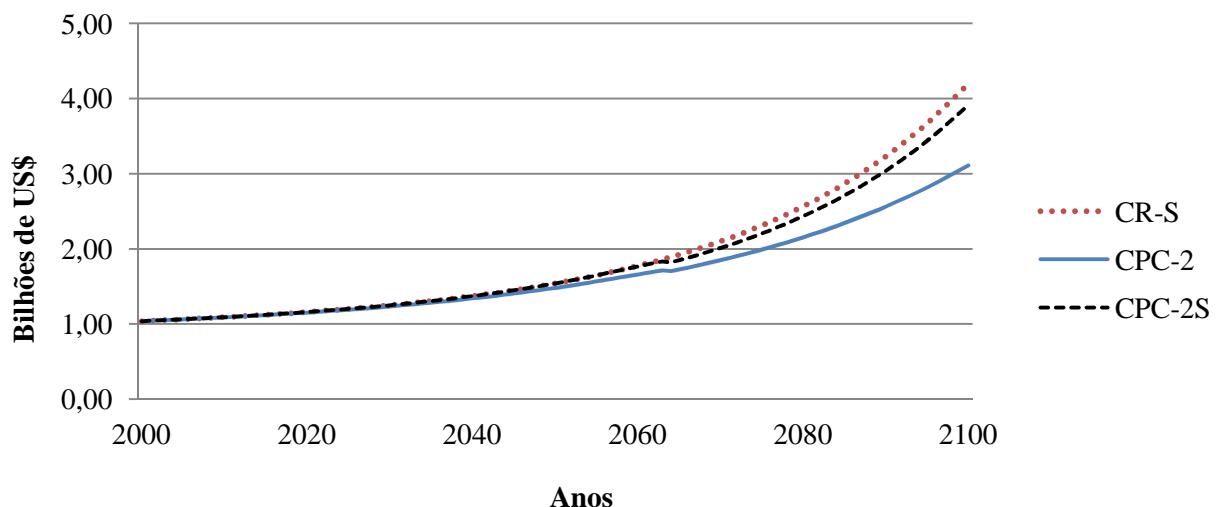


Figura 19 – Exportações de bens de consumo do Brasil na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos

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. Mas, é fundamentalmente importante que as políticas climáticas também provoquem a redução das emissões de GEE. A Figura 20 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% ao ano, com a implantação da política climática as emissões diminuiriam a uma taxa média anual de 2,11%.

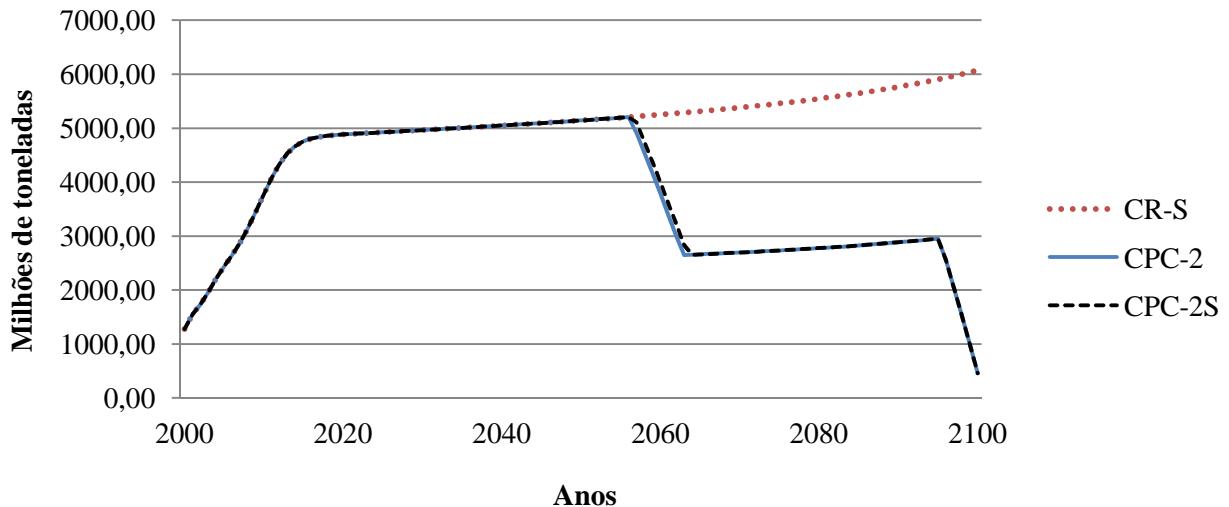


Figura 20 – Emissões totais de CO₂ nas duas regiões em milhões de toneladas na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota-se que o desempenho econômico e comercial das regiões seria relativamente maior na ausência de uma política climática com *spillovers* tecnológicos (cenário CR-S). No entanto, 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 melhoraram 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 as Figuras 16, 17, 18 e 19, apesar do 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 (Figura 20). Este resultado demonstra que, apesar do 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 real, o que pode ser

verificado ao comparar as trajetórias das variáveis econômicas nos cenários CPC-2 e CPC-2S. Além disso, como pode ser visto na Figura 21, 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.

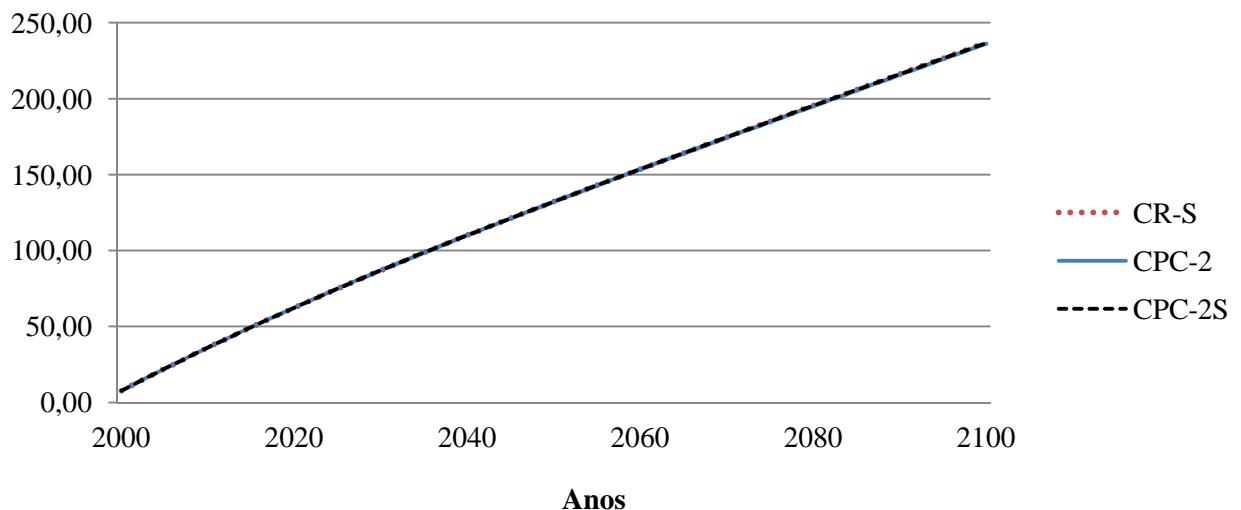


Figura 21 – Comportamento do bem-estar total na presença de uma política climática global com *spillovers* tecnológicos

Fonte: Resultados da pesquisa.

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

Enfim, é importante salientar que o presente trabalho apresenta algumas limitações, o que significa que muito ainda deve ser feito quando o assunto é políticas climáticas 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.

5.3. Discussão geral dos resultados: a grande questão

Em geral, os resultados das simulações mostraram que o crescimento e o bem-estar econômicos são poucos sensíveis as políticas climáticas, principalmente quando as mesmas são

implantadas em escala global. Em outras palavras, o nível de satisfação econômica das sociedades é pouco afetado pela política climática, que se mostrou eficaz quanto à mitigação de GEE. No entanto, se os efeitos econômicos das políticas climáticas são praticamente irrisórios, porque não há um consenso entre os tomadores de decisão quanto à implantação de uma política climática global?

A resposta para esta pergunta não é fácil, mas pode ser orientada a partir de uma visão de curto e longo prazo. Grande parte dos tomadores de decisão está preocupada em solucionar os problemas do presente visando ganhos políticos e almejando uma possível reeleição. As mudanças climáticas por sua vez são tratadas, de fato, como problemas de longo prazo e cercadas de incertezas. Apesar das evidências científicas a respeito dessas mudanças, existem alguns atores políticos que creem que as mesmas sejam mito, e que o crescimento econômico não pode ser sacrificado por algo incerto.

A implantação de uma política climática implica em uma alteração do regime político existente, ou uma inovação política, que contém um risco de falha (HOWLETT, 2012). A maior parte dos políticos é altamente avessa ao risco e procura evitar falhas para as quais pode ser responsabilizada (WALSH, 2006 e SKOGSTAD, 2007). Os políticos avessos ao risco, normalmente, valorizam mais a prevenção de culpa do que a possível obtenção de crédito (TWIGHT, 1991), ainda mais em assuntos que envolvem incertezas. Os governos com aversão ao risco são mais felizes por não fazerem nada ou pouco, do que fazer algo que poderia levá-los a serem culpados por um fracasso.

Esta aversão, no caso de políticas climáticas, se estende tanto que levou alguns governos a se envolverem em uma série de estratégias processuais destinadas a minimizar um problema e negar a necessidade de uma ação substantiva para lidar com ele, em vez de adotar medidas positivas para a sua solução (HOWLETT, 2014). Essas estratégias incluem a tentativa de reduzir o tamanho e a extensão do problema, ou seja, a de tratá-lo de modo parcelado ou atacando a legitimidade e a credibilidade dos defensores de uma atividade mais substantiva (SAWARD, 1992).

Esta é uma característica geral de formulação de políticas, principalmente nos sistemas democráticos, onde as consequências do fracasso na estabilidade do governo e sua permanência no poder são muito mais agudas. Em outras palavras, atribuições de culpa se traduzem através das urnas em uma rápida perda de poder. Por isso, os governos de muitos países e setores que gostariam de minimizar a duração e a extensão de um problema pode fazê-lo de diversas formas, como por exemplo, argumentar que um problema é um fenômeno cíclico em vez de linear e que provavelmente será autocorrigindo a médio e longo prazo (HOWLETT, 2014).

O conflito entre os interesses de curto e longo prazo, em que os interesses de curto prazo são mais importantes ficaram claros na COP 15 realizada em 2009 em Copenhague. Naquele ano os países enfrentavam a pior crise econômica desde a Grande Depressão de 1929. Dessa forma, os olhares dos tomadores de decisão se concentraram em solucionar o problema da crise financeira mundial, em detrimento de problemas que podem acontecer nas próximas décadas. A COP 15 foi considerada fracassada, mas a principal causa de seu fracasso foi à crise econômica mundial, que limitou os avanços internacionais sobre um acordo climático, fazendo com que os países retrocedessem quando o tema é a proteção do clima.

Entretanto, a falta de um acordo climático pode causar uma crise muito mais séria no futuro, pois não se sabe com exatidão os reais impactos de um planeta mais quente. Dessa forma, um acordo climático global pode ser visto como uma abordagem preventiva daquilo que não se tem certeza de que vai acontecer. Como dito, a questão climática está intimamente ligada ao futuro, enquanto que os tomadores de decisão estão preocupados com o presente. No estudo de Bahdur e Tanner (2014), os autores perceberam que o discurso político sobre preparar para as surpresas, contrasta com o contexto político local, focado em lidar com as contingências atuais. Por exemplo, os atores políticos do governo de uma cidade Indiana focaram suas ações em questões que precisavam de atenção imediata, como a coleta de lixo, acidentes e epidemias, e afirmaram que não poderiam se dar ao luxo de pensar em um futuro distante.

Shore e Wright (1997) e Lewis e Mosse (2006) destacam que a política é um processo complexo de conflitos e negociações entre as versões contraditórias de como o mundo deveria ser, como os recursos deveriam ser geridos e como os benefícios deveriam ser distribuídos. Assim, a política é inerente aos valores, conhecimento e poder, e está intimamente ligada a economia.

O processo de moldagem de uma política é um processo frequentemente dominado pelas elites ou interesses, que muitas vezes abrem espaço para o benefício próprio (FRIEND *et al.* 2014). A política também pode ser vista como um contexto mais amplo de governança, em que a ênfase é dada sobre os atores envolvidos, dessa forma enquanto a política pública é de competência do Estado, a governança é vista como a interação entre o Estado, mercados e cidadãos (AGARWAL *et al.*, 2012). No Brasil, por exemplo, uma das políticas econômicas adotadas para a contenção da crise financeira mundial foi conceder incentivos fiscais a compra de veículos automotores, que em sua maioria é operacionalizado por combustíveis fósseis. A adoção dessa política foi resultado da pressão das montadoras de veículos sobre o governo. Enquanto isso, as questões climáticas foram deixadas de lado, o que demonstra mais uma vez que o curto prazo é sempre visto como mais importante do que as questões de longo prazo,

mesmo que estas últimas possam causar consequências desastrosas no futuro. Os governos têm receio de problemas que têm potencial muito grande de alcance e longa duração, enquanto crises de curto prazo são consideradas o *pão com manteiga* na atribuição de culpa (HOOD, 2010).

As mudanças climáticas têm sido apresentadas como um problema perverso, em que a natureza do problema, ou até mesmo o conhecimento necessário para resolvê-lo é incerto (RAYNER e MALONE, 1998). O debate sobre mudanças climáticas tem batalhado contra as incertezas inerentes a ciência do clima e as limitações para prever quando a mudança será provocada e suas eventuais consequências. A ciência tem desempenhado um papel importante na formação de um debate sobre mudança climática, mas muitas vezes permanece contestada. Por outro lado, cada vez mais, o debate tende a mudar de uma abordagem de prever e agir para realmente abraçar as incertezas sobre o futuro do clima, e colocando a público as respostas dos debates, em vez de exclusivamente ao domínio dos especialistas (GIDDENS, 2009).

O conhecimento público é outro fator importante para efetivar um acordo climático global. Como destaca Ostrom (2009), o conhecimento da comunidade é de suma importância em processos de construção da resiliência. Por outro lado, não é segredo entre os cientistas de que as políticas nem sempre são baseadas nas melhores pesquisas disponíveis, embora nos debates sobre as mudanças climáticas seja assumido que a melhor informação levará a um melhor planejamento (FRIEND *et al.* 2014). Porém muitas vezes existem falhas na informação. Por exemplo, o modelo linear de política assume que quanto melhor a informação e quanto mais eficaz forem os meios de comunicação da informação, melhor será a política. Nesse modelo o conhecimento é utilizado racionalmente para informar a tomada de decisão (SIMON, 1995), no entanto, o conhecimento produzido é empregado por aqueles que possuem interesses conflitantes (KEELEY e SCOONES, 2003). Como acrescenta Ribeiro (2005), na prática, a política nem sempre é baseada em informações, e frequentemente, podem ir contra o conhecimento comum. As informações também possuem valor comercial e político, e muitas vezes são rigidamente controladas.

Mesmo em sociedades democráticas, que se pressupõe livre informação, a visibilidade é de fundamental importância na elaboração de políticas climáticas. Apesar de a extensão de um problema ser muitas vezes visto como autoevidente por especialistas, entre o público talvez não seja. Isto é, a mudança climática é muito visível ao público, principalmente às margens de zonas climáticas, por exemplo, a desertificação, o aumento do nível do mar ou no caso de eventos climáticos extremos. Isso leva a crer que para a maioria das pessoas que vivem em zonas de clima não extremas, o impacto das mudanças climáticas permanece no nível abstrato e, portanto,

com pouca visibilidade, e sujeito a níveis existentes de participação política e econômica (HOWLETT, 2014).

É importante destacar que, com exceção dos países afetados diretamente pelas mudanças climáticas, tais mudanças são consideradas por grandes segmentos da população como um processo quase natural, cujas responsabilidades não são necessariamente dos governos (CONNOR e HIGGINBOTHAM, 2013). Além disso, a intensidade da opinião pública, a respeito da necessidade de uma ação governamental, é minimizada por outras preocupações como o crescimento econômico ou o desenvolvimento nacional (HOBSON e NIEMEYER, 2011).

A participação pública na tomada de decisões também poderia gerar maior pressão sobre os governos quanto à adoção de políticas de mitigação de GEE. Como destacam Friend *et al.* (2014), muitos governos locais assumiram o discurso da participação pública, entretanto, o grau dessa participação é questionável. A participação muitas vezes ocorre depois da tomada de decisão, e funciona simplesmente para anunciar decisões para o público. Isso reflete como a governança muitas vezes é gerida, se ela realmente envolve a participação cívica ou se é influenciada pela elite controladora dos mecanismos de poder.

Contudo a resposta à pergunta feita no início dessa seção está intimamente ligada às questões de curto e longo prazo. Os governos e muitas vezes os próprios indivíduos da sociedade estão mais preocupados em resolver os problemas do presente do que os do futuro. A aversão ao risco dos tomadores de decisão é outro fator que contribui significativamente para a implantação de uma política climática global, falta coragem e maior preocupação intergeracional por parte dos tomadores de decisão. Além disso, a ausência de visibilidade concreta das mudanças climáticas colabora para uma menor ou talvez inexistente pressão sobre os governos para a adoção de uma política de mitigação de GEE. Infelizmente, mesmo que os cidadãos fiquem comovidos ao verem comunidades insulares sendo engolidas pelo mar, a maioria só exigirá ações concretas de seus governos quando os eventos extremos ocorrem sobre seus tetos, o que pode ser tarde demais quando o tema é o clima.

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, considerada em desenvolvimento, é grande ofertante de recursos energéticos e a segunda, 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 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. Verificou-se que a política climática aplicada somente à região do Anexo I reduziu os níveis de emissões de CO₂, o que afetou levemente o crescimento econômico dessa região e o nível de bem-estar social. No entanto, no longo prazo, a política climática unilateral tende a elevar os níveis de emissões de CO₂, devido à liberdade conferida a outra região.

O cenário de política climática global mostrou-se mais 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 que a função de bem-estar analisada neste estudo 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 dos mesmos 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 minimizadas 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 sustentabilidade fraca para sustentabilidade forte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGARWAL, A.; PERRIN, N.; CHHATRE, A.; BENSON, C. S.; KONONEN, M. Climate policy processes, local institutions, and adaptation actions: mechanisms of translation and influence. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 3, n. 6, p. 565-579, 2012.
- ANDEREGG, W. R.; PRALL, J. W.; HAROLD, J.; SCHNEIDER, S. H. Expert credibility in climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 27, p. 12107-12109, 2010.
- AGHION, P.; HOWITT, P. A model of growth through creative destruction. **Econometrica**, v. 60, p. 323-351, 1992.
- AMBEC, S.; COHEN, M.; ELGIE, S.; LANOIE, P. The Porter hypothesis at 20: can environmental regulation enhance innovation and competitiveness? **Resources for the Future Discussion Paper**, n. 11-01, 2011.
- ANDRADE, D. C.; ROMEIRO, A. R. Degradação ambiental e teoria econômica: algumas reflexões sobre uma "Economia dos Ecossistemas". **Economia**, v. 12, n. 1, 2011.
- BAHADUR, A. V.; TANNER, T. Policy climates and climate policies: Analysing the politics of building urban climate change resilience. **Urban Climate**, 2014.
- BANCO MUNDIAL. Relatório sobre o desenvolvimento mundial 2010: desenvolvimento e mudança climática. 2010.
- BARRETT, S. The Coming Global ClimateTechnology 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.
- BRUNDTLAND, H. **Our common future**. 1987. Disponível em: <http://www.regjeringen.no/upload/SMK/Vedlegg/Taler%20og%20artikler%20av%20tidligere%20statsministre/Gro%20Harem%20Brundtland/1987/Presentation_of_Our_Common_Future_to_UNEP.pdf>. Acesso em 12/06/2013.
- CARRARO, C.; FAVERO, A.; MASSETTI, E. Investments and public finance in a green, low carbon, economy. **Energy Economics**, v. 34, n. 1, p. 1, 2012.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: teoria e aplicações**. São Paulo: Ed. dos Autores, 2006. 524p.
- CHINTRAKARN, P., MILLIMET, D. L. The environmental consequences of trade: Evidence from subnational trade flows. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 52, p. 430–453, 2006.

CONNOR, L. H.; HIGGINBOTHAM, N. "Natural cycles" in lay understandings of climate change. **Global Environmental Change**, v. 23, n. 6, p. 1852-1861, 2013.

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

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

CQNUMC. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** 2013. Disponível em: < http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/annex_i/items/2774.php >. Acesso em 30 jun. 2013.

CQNUMC. **Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia com o apoio do Ministério das Relações Exteriores da República Federativa do Brasil. 1992. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0005/5390.pdf> Acesso em 29 de mar. de 2013.

DALY, H. E. Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. **Ecological Economics**, v. 22, n. 3, p. 261-266, 1997.

DALY, H. E.; FARLEY, J. **Ecological economics: principles and applications.** Island Press, 2004.

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.

DEL RÍO GONZÁLEZ, P. Public policy and clean technology promotion. The synergy between environmental economics and evolutionary economics of technological change. **International Journal of Sustainable Development**, v. 7, n. 2, p. 200-216, 2004.

DEL RÍO GONZÁLEZ, P. Analysing the factors influencing clean technology adoption: a study of the Spanish pulp and paper industry. **Business Strategy and the Environment**, v. 14, n. 1, p. 20-37, 2005.

DOMAR, E. D. Capital expansion, rate of growth, and employment. **Econometrica, Journal of the Econometric Society**, p. 137-147, 1946.

DORAN, P. T.; ZIMMERMAN, M. K. Examining the scientific consensus on climate change. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 90, n. 3, p. 22, 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.; CALVIN, K.; CLARKE, L.; KYLE, P.; WISE, M. Energy and technology lessons since Rio. **Energy Economics**, 2012.

FEAM. **A Questão Ambiental em Minas Gerais: Discurso e Política.** Fundação Estadual do Meio Ambiente e Fundação João Pinheiro. 1998.

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.

FERREIRA, P. C. Eficiência e produtividade total dos fatores em Minas Gerais. **Ensaios Econômicos**, n. 705, 2010.

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.

FOLADORI, G. **Limites do desenvolvimento sustentável**. Ed. Unicamp. 2001.

FRIEND, R.; JARVIE, J.; REED, S. O.; SUTARTO, R.; THINPHANGA, P.; TOAN, V. C. Mainstreaming urban climate resilience into policy and planning; reflections from Asia. **Urban Climate**, 2014

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

GEORGESCU-ROEGEN, N. The entropy law and the economic process in retrospect. **Eastern Economic Journal**, v. 12, n. 1, p. 3-25, 1986.

GIDDENS, A. The politics of climate change. **Cambridge, UK**, 2009.

GROSSMAN, G. M.; HELPMAN, E. **Innovation and growth in the global economy**. the MIT Press, 1991.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Economic growth and the environment. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 110, n. 2, p. 353-377, 1995.

HARROD, R. F. An essay in dynamic theory. **The Economic Journal**, v. 49, n. 193, p. 14-33, 1939.

HE, J.; RICHARD, P. Environmental Kuznets curve for CO₂ in Canada. **Ecological Economics**, v. 69, n. 5, p. 1083-1093, 2010.

HOBSON, K; NIEMEYER, S. Public responses to climate change: The role of deliberation in building capacity for adaptive action. **Global environmental change**, v. 21, n. 3, p. 957-971, 2011.

HOOD, C. **The blame game: Spin, bureaucracy, and self-preservation in government**. Princeton University Press, 2010.

HOTELLING, Harold. The economics of exhaustible resources. **The Journal of Political Economy**, v. 39, n. 2, p. 137-175, 1931.

HOWLETT, M. The lessons of failure: learning and blame avoidance in public policy-making. **International Political Science Review**, v. 33, n. 5, p. 539-555, 2012.

HOWLETT, M. Why are policy innovations rare and so often negative? Blame avoidance and problem denial in climate change policy-making. **Global Environmental Change**, 2014.

HUTCHINSON, G. E. Circular causal systems in ecology. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 50, n. 4, p. 221-246, 1948.

IEA. **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**: the IPCC scientific assessment. 1990. Disponível em: < http://www.ipcc.ch/ipccreports/far/wg_I/ipcc_far_wg_I_full_report.pdf>. Acesso em: 12 de nov. 2013.

_____. Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC second assessment**: Climate Change 1995. Disponível em: < http://www.ipcc.ch/ipccreports/far/wg_I/ipcc_far_wg_I_full_report.pdf>. Acesso em: 12 de nov. 2013.

_____. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2001**: Synthesis Report. 2001. Disponível em: < <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/synthesis-syr/english/summary-policymakers.pdf>>. Acesso em: 12 de nov. 2013.

_____. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007**: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.

_____. 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. Disponível em: < http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep 2013.pdf>. Acesso em: 09 de out. 2013.

JAFFE, A. B., PETERSON, S. R., PORTNEY, P. R., STAVINS, R. N. 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.

JONES, Charles I. **Introdução à Teoria do Crescimento Econômico**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

KAGAN, R., THORNTON, D., GUNNINGHAM, N. Explaining corporate environmental performance: how does regulation matter? **Law & Society Review**, v. 37, n. 1, p. 51-90, 2003.

KEELEY, J.; SCOONES, I. **Understanding environmental policy processes: cases from Africa**. Earthscan, 2003.

KEELING, C. D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. **Tellus**, v. 12, n. 2, p. 200-203, 1960.

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.

LEWIS, D.; MOSSE, D. (Ed.). **Development brokers and translators: The ethnography of aid and agencies**. Kumarian Press, 2006.

MA, C.; ZHANG, G. Y.; ZHANG, X. C.; ZHOU, B.; MAO, T. Y. Simulation modeling for wetland utilization and protection based on system dynamic model in a coastal city, China. **Procedia Environmental Sciences**, v. 13, p. 202-213, 2012.

MAS-COLLEL, A.; WHINSTON, M.D.; GREEN, J.R.; **Microeconomic Theory**. Oxford University Press. New York. 1995. 501 p.

MAY, P. H. Economia ecológica e o desenvolvimento equitativo no Brasil. In: MAY, P. H. (Org.). *Economia ecológica: aplicações no Brasil*. Rio de Janeiro: Campus, 1995. p. 1-20.

MEADOWS, D. H; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J.; BEHRENS I.; WILLIAM W. **Limites do crescimento**. SP: Editora Perspectiva AS, 1973.

MILLER JR, G. T. **Ciência Ambiental**. Tradução da 11^a ed. São Paulo: Cengage Lerning, 2008.

MILLS, E. Building Commissioning: **A Golden Opportunity for Reducing Energy Costs and Greenhouse Gas Emissions**. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. 2009.

MUELLER, C. C. O debate dos economistas sobre a sustentabilidade: uma avaliação sob a ótica da análise do processo produtivo de Georgescu-Roegen. **Estudos Econômicos** (São Paulo), v. 35, n. 4, p. 687-713, 2005.

OSTROM, E. A general framework for analyzing sustainability of socio-ecological systems. **Science** 325 (5939), 419–422, 2009.

PLAMBECK, E. L. Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management. **Energy Economics**, 2012.

PLASS, G. N. The carbon dioxide theory of climatic change. **Tellus**, v. 8, n. 2, p. 140-154, 1956.

RAYNER, S.; MALONE, E. L. **Human choice and climate change: an international assessment**. Battelle Press: Columbus, OH, 1998.

REVELLE, R.; SUESS, H. E. Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades. **Tellus**, v. 9, n. 1, p. 18-27, 1957.

RIBEIRO, G. Research into urban development and cognitive capital in Thailand. **Journal of Trans-disciplinary Environmental Studies**, v. 4, n. 1, 2005.

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

ROMEIRO, A. R. Economia ou economia política da sustentabilidade. In: MAY, P. H.(Org). *Economia do Meio Ambiente: teoria e prática*. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2010. p. 6-31.

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

ROMER, P. M. Endogenous Technological Change. **The Journal of Political Economy**, v. 98, n. 5, part. 2, p. S71-S102. 1990.

SACHS, I. **Estratégias de transição para o século XXI**. Trad. Istvan Vajda. In: *Para pensar o desenvolvimento sustentável*. 2^a edição. São Paulo: Brasiliense, 1994.

SAWARD, M. **Co-optive politics and state legitimacy**. Dartmouth, 1992.

SELDEN, T. M.; SONG, D. Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions? **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 27, n. 2, p. 147-162, 1994.

SHORE, C.; WRIGHT, S. (Ed.). **Anthropology of policy: Perspectives on governance and power**. Routledge, 1997.

SIMON, H. A. A behavioral model of rational choice. **The quarterly journal of economics**, v. 69, n. 1, p. 99-118, 1955.

SEPED. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, 2013.

SKOGSTAD, G. Policy failure, policy learning and policy development in a context of internationalization. In: **Workshop on Policy Failure, Annual Meeting of the Canadian Political Science Association, Univ. of Saskatchewan, Saskatoon**. 2007.

SOLOW, R. M. A contribution to the theory of economic growth. **The quarterly journal of economics**, v. 70, n. 1, p. 65-94, 1956.

SOLOW, R. M. On the intergenerational allocation of natural resources. **The Scandinavian Journal of Economics**, p. 141-149, 1986.

STERN, N. **Stern Review: The Economics of Climate Change**. 2006. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/destaques/sternreview_report_complete.pdf>. Acesso em: 12 de nov. 2013.

STIGLITZ, J. Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths. **The Review of Economic Studies**, v. 41, p. 123-137, 1974.

SUESS, H. E. Radiocarbon concentration in modern wood. **Science**, v. 122, n. 3166, p. 415-417, 1955.

TWIGHT, C. From claiming credit to avoiding blame: The evolution of congressional strategy for asbestos management. **Journal of Public Policy**, v. 11, n. 2, p. 153-86, 1991.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **Emissions Trading, the Clean Development Mechanism and Joint Implementation Mechanisms of Kyoto Protocol**.

2012. Disponível em: <http://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/items/1673.php>. Acesso em 04 de nov. de 2012.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **Meetings**. 2013. Disponível em: <<http://unfccc.int/meetings/items/6240.php>>. Acesso em: 10 de nov. de 2013.

WALSH, J. I. Policy Failure and Policy Change British Security Policy After the Cold War. **Comparative Political Studies**, v. 39, n. 4, p. 490-518, 2006.

WEART, S. R. **The discovery of global warming**. Harvard University Press, 2008.

APÊNDICE A: PARÂMETROS E VARIÁVEIS DO MODELO

Quadro A.1 - Descrição dos parâmetros/variáveis e suas respectivas fontes

Símbolo	Índice			
Símbolo	Parâmetro ³⁰	Brasil	Anexo I	Fonte
i, r	Região: Brasil e Anexo I			
j	Setor			
m	Fator de produção			
t	Tempo			
z	Passo de tempo (5 anos)			
τ	Vintages do setor de energia renovável			
σ	Taxa de desconto intertemporal	0,01	0,01	Endenhofer et al. (2005)
δ	Taxa de depreciação do capital	0,05	0,05	Endenhofer et al. (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 et al. (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	ad hoc
$\zeta_m(i)$	Produtividade dos investimentos em P&D na melhoria da eficiência do fator m na região i	L = 0,105 E = 0,130	L = 0,105 E = 0,130	ad hoc
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 et al. (2005)
ψ	Elasticidade do spillover	0,6	0,6	É um valor < 1 conforme Leimbach e Baumstark (2010)
Ω_m	Intensidade do spillover	0,15	0,15	Leimbach e Baumstark (2010)

³⁰ Observação: em alguns parâmetros do Anexo I foi considerada a média entre Estados Unidos e Europa na base de dados de Leimbach e Baumstark (2010).

$K_{max}(i, t)$	Máxima produtividade do setor de extração	3,22	3,22	Endenhofer et al. (2005)
$k(i, t)$	Coeficiente de conversão na região i no tempo t	0,5	0,5	<i>ad hoc</i>
$v(i)$	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 et al. (2005)
$\chi_1(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	113	113	Endenhofer et al. (2005)
$\chi_2(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	700	700	Endenhofer et al. (2005)
$\chi_3(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	3500	3500	Endenhofer et al. (2005)
χ_4	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	4	4	Endenhofer 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>
$w(t)$	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	Endenhofer et al. (2005)
$fC(i)$	Custo mínimo do investimento	500	500	Endenhofer et al. (2005)
$\gamma(i)$	Taxa de aprendizagem	0,11	0,14	Leimbach e Baumstark (2010)

Símbolo	Variável/Parâmetro de controle
$\theta_{m,j}$	Participação do fator m no setor j (otimizado automaticamente)
$rd_L(i, t)$	Investimentos em P&D para a eficiência do trabalho na região i no tempo t
$rd_E(i, t)$	Investimentos em P&D para a eficiência energética na região i no tempo t
$I_j(i, t)$	Investimento (capital) no setor j na região i no tempo t
$X_I(i, r, t)$	Exportação de bens de investimento (capital) da região i para a região r no tempo t
$X_C(i, r, t)$	Exportação de bens de consumo da região i para a região r no tempo t
$X_Q(i, r, t)$	Exportação de recurso fóssil da região i para a região r no tempo t
$X_P(i, r, t)$	Exportação de licenças de emissão da região i para a região r no tempo t

Símbolo	Variável de Estado
$K_j(i, t)$	Estoque de capital do setor j na região i no tempo t
$A_L(i, t)$	Produtividade do trabalho na região i no tempo t
$A_E(i, t)$	Produtividade energética na região i no tempo t
$cQ(i, t)$	Extração de recursos acumulada na região i no tempo t
$\kappa(i, t)$	Fator de produção do setor de extração na região i no tempo t

$V(i, t)$	<i>Vintage</i> da energia renovável na região i no tempo t
$\kappa'(i, t)$	Custo variável dos investimentos dos <i>vintages</i> na região i no tempo t
$cN(i, 0)$	Capacidade instalada acumulada na região i no tempo t (= 0,00001 conforme Edenhofer (2005))

Símbolo	Parâmetro percentual
$sD_c(i)$	Percentual da disponibilidade interna de bens de consumo alocado no próprio setor de bens de consumo
$sD_{crd_L}(i)$	Percentual da disponibilidade interna de bens de consumo alocado no setor de P&D do trabalho
$sD_{crd_E}(i)$	Percentual da disponibilidade interna de bens de consumo alocado no setor de P&D da energia
$sD_{Ij}(i)$	Percentual da disponibilidade interna de bens de investimento alocado no setor j
$sQ(i)$	Percentual da produção doméstica de recursos fósseis destinado a disponibilidade interna
$sY_I(i)$	Percentual da produção de bens de investimento alocado no mercado interno
$sY_c(i)$	Percentual da produção de bens de investimento alocado no mercado interno
$sP(i)$	Percentual do total de permissões de emissões alocado internamente

Símbolo	Demais variáveis
W	Bem-estar
$C(i, t)$	Consumo na região i no tempo t
$L(i, t)$	Trabalho na região i no tempo t - exógeno
$E(i, t)$	Energia total na região i no tempo t
$Y_C(i, t)$	Produto do setor de bens de consumo na região i no tempo t
$Y_I(i, t)$	Produto do setor de bens capital (investimento) na região i no tempo t
$I(i, t)$	Capital (investimento) total na região i no tempo t
$Dc(i, t)$	Disponibilidade interna de bens de consumo na região i no tempo t
$D_I(i, t)$	Disponibilidade interna de bens de investimento na região i no tempo t
$D_Q(i, t)$	Disponibilidade interna de recursos fósseis
$Crd_L(i, t)$	Bens de consumo alocados no setor de P&D do trabalho
$Crd_E(i, t)$	Bens de consumo alocados no setor de P&D da energia
$sp_L(i, t)$	<i>Spillover</i> da produtividade do trabalho na região i no tempo t
$sp_E(i, t)$	<i>Spillover</i> da produtividade energética na região i no tempo t
$I_{nf}(i, t)$	Investimento (capital) em outros setores energéticos na região i no tempo t - exógeno
$Ef(i, t)$	Energia fóssil na região i no tempo t
$E_{ren}(i, t)$	Energia renovável na região i no tempo t
$E_{nf}(i, t)$	Energia oriunda de outras fontes energéticas na região i no tempo t
$PE(i, t)$	Energia primária fóssil na região i no tempo t
$mC(i, t)$	Custo marginal da extração na região i no tempo t
$Q(i, t)$	Extração de recurso fóssil na região i no tempo t
$EM(t)$	Emissões globais de CO ₂ no tempo t
$LU(t)$	Emissões de CO ₂ oriundas da mudança no uso do solo no tempo t
$P(i, t)$	Permissão de emissões na região i no tempo t - exógena

Fonte: Elaboração própria a partir de dados contidos nos trabalhos de Leimbach e Baumstark (2010) e Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005).