

**GEOVÂNIA SILVA DE SOUSA**

**POLÍTICAS CLIMÁTICAS, CRESCIMENTO ECONÔMICO E  
BEM- ESTAR: UMA ABORDAGEM DINÂMICA  
MULTIREGIONAL**

Tese apresentada a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S725p  
2015

Sousa, Geovânia Silva de, 1978-  
Políticas climáticas, crescimento econômico e bem-estar :  
uma abordagem dinâmica multirregional / Geovânia Silva de  
Sousa. – Viçosa, MG, 2015.  
xv, 87f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Marília Fernandes Maciel Gomes.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.80-84.

1. Mudanças climáticas. 2. Spillovers tecnológicos.  
3. Bem-estar. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento  
de Economia Rural. Programa de Pós-graduação em Economia  
Aplicada. II. Título.

CDD 22. ed. 363.7

GEOVÂNIA SILVA DE SOUSA

**POLÍTICAS CLIMÁTICAS, CRESCIMENTO ECONÔMICO E BEM-ESTAR: UMA ABORDAGEM DINÂMICA MULTIRREGIONAL**

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

APROVADA: 26 de fevereiro de 2015.

  
Simone de Faria Narciso Shiki

  
Patricia Lopes Rosado

  
Evaldo Henrique da Silva

  
Elaine Aparecida Fernandes

  
Marília Fernandes Maciel Gomes  
(Orientadora)

*"Sou por meu gosto pesquisador. Experimento toda a sede de conhecer e ávida inquietude de progredir, do mesmo modo que toda aquisição proporciona".*

*Immanuel Kant*

*Aos meus pais, Tânia e Julival.  
Aos meus irmãos, Josemary, Josival e Jhonatas.  
E aos demais familiares e amigos.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, força, coragem, e perseverança renovados a cada dia.  
Aos meus pais Tânia Maria e Julival Nery, por terem sido instrumentos de Deus para que eu viesse ao mundo, pelo carinho, apoio e incentivo.

À minha orientadora professora doutora Marília Fernandes Gomes Maciel pela paciência, disponibilidade, dedicação e contribuição, exemplo de pessoa e profissionalismo.

À minha co-orientadora professora doutora Elaine Aparecida Fernandes pela força, disponibilidade, dedicação, contribuição e pelo acolhimento em um momento delicado nesse período de Doutorado.

Ao professor doutor Evaldo Henrique da Silva pela disponibilidade, dedicação, e pelas valiosas contribuições.

À professora doutora Patrícia Alves Rosado Pereira pela amizade, presença, força, e disponibilidade em ajudar.

Aos Coordenadores, professores, à ex-secretária Carminha e ao secretário Romildo, do Departamento de Economia Rural, pelos ensinamentos e por estarem sempre dispostos a nos ouvir e auxiliar.

Aos meus colegas e amigos: Elizama Oliveira, Lora dos Anjos, Felipe Silva, Douglas Marcos, Paloma Paes, Mateus Miranda, Mírian Rocha e Glaucia Padrão por terem tornado meus dias menos áridos nessa caminhada. Agradeço, especialmente, ao colega Lucas Vitor Carvalho Sousa pela paciência na transmissão dos conhecimentos acerca do modelo utilizado neste estudo.

Um agradecimento especial aos irmãos da Fraternidade Pequena Via pelo apoio, carinho, atenção, acolhimento, por constituírem a minha família em Viçosa.

Por fim, o meu muito obrigada a todos que foram manifestações do amor e da ternura de Deus nessa minha jornada.

## **BIOGRAFIA**

Geovânia Silva de Sousa, filha de Julival Nery de Souza e Tânia Maria Silva de Souza.

Em fevereiro de 2002 iniciou o Curso de graduação em Ciências Econômicas pela Universidade Estadual de Santa Cruz, graduando-se em Agosto de 2006.

Em março de 2008 ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, na Universidade Estadual de Santa Cruz, submetendo-se à defesa da dissertação em Junho de 2010.

Em março de 2011 ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado em Economia Aplicada, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se a defesa de tese em fevereiro de 2015.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURA	vii
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações iniciais	1
1.2. O problema e sua importância	4
1.3. Objetivos	8
<b>2. CRESCIMENTO E MEIO AMBIENTE: EVOLUÇÃO TEÓRICA</b>	<b>10</b>
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>33</b>
3.1 Linhas básicas do modelo	33
3.2 Equações do modelo	39
3.3. Calibração e Otimização do modelo	49
3.4. Cenários Simulados	51
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>53</b>
4.1 Desempenho das Economias Desenvolvidas e em Desenvolvimento sob a influência dos spillovers tecnológicos <i>embodied</i> no desempenho das economias desenvolvidas e em desenvolvimento	53
4.2 Implementação da Política Climática de Mitigação de GEE e seus efeitos sobre a dinâmica das economias desenvolvidas e em desenvolvimento	63
4.2.1 Efeitos da Política Climática de Mitigação de GEE sobre a dinâmica das economias desenvolvidas	65
4.2.2 Influência da Política Climática de Mitigação de GEE nas economias dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento	66
4.3 Dinâmica das economias desenvolvidas e em desenvolvimento sobre a influência dos spillovers tecnológicos e dos compromissos de mitigação dos GEE	73
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>80</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Estrutura macroeconômica do modelo MIND-RS	30
Figura 2	Comportamento do PIB da China na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	54
Figura 3	Comportamento do PIB da América Latina na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	55
Figura 4	Comportamento do PIB da Europa na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	56
Figura 5	Comportamento do PIB dos Estados Unidos na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	57
Figura 6	Comportamento das Exportações de bens de capital da china na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	58
Figura 7	Comportamento das Exportações de bens de capital da América Latina na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	58
Figura 8	Comportamento das Exportações de bens de capital dos Estados Unidos na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos.	59
Figura 9	Comportamento das Exportações de bens de capital da Europa na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	59
Figura 10	Comportamento das Exportações de bens de consumo da China na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	60
Figura 11	Comportamento das exportações de bens de consumo da América Latina na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	60
Figura 12	Comportamento das exportações de bens de consumo dos Estados Unidos na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	61
Figura 13	Comportamento das Exportações de bens de consumo da Europa na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos no período de 100 anos	61
Figura 14	Comportamento do Bem-Estar das economias desenvolvidas e em desenvolvimento na presença de <i>spillovers</i> tecnológicos, no período de 100 anos.	63

Figura 15	Nível de emissões de CO <sub>2</sub> dos Estados Unidos considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos	69
Figura 16	Nível de emissões de CO <sub>2</sub> da América Latina considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos	69
Figura 17	Nível de emissões de CO <sub>2</sub> da Europa considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos	70
Figura 18	Nível de emissões de CO <sub>2</sub> da China considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos	71
Figura 19	Comportamento do Bem-Estar das economias desenvolvidas e em desenvolvimento considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos	72
Figura 20	Bem-estar econômico das nações desenvolvidas e em desenvolvimento sob influência de políticas climáticas de redução das emissões e <i>spillovers</i> tecnológicos ao longo de 100 anos	77

## **LISTA DE QUADRO**

Quadro 1 - Modelos teóricos e empíricos de crescimento econômico e seus avanços	31
Quadro 2 - Variáveis e Parâmetros utilizados no modelo MIND – RS	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores iniciais das variáveis utilizadas no modelo MIND-RS para o ano 2000	49
Tabela 2 - Comparativo do nível de emissão de CO <sub>2</sub> das nações desenvolvidas e em desenvolvimento nos cenários CEB e CES	62
Tabela 3 - Variação média do PIB dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento no CEB e no CEP-2, no período de 100 anos	67
Tabela 4 - Exportações médias de bens de capital e de consumo dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento sobre a incidência de políticas de redução de emissão, no período de 100 anos	68
Tabela 5 - Exportações médias de bens de capital e de consumo dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento sobre a incidência de políticas de redução de emissão, no período de 100 anos	68
Tabela 6 - Variação média do PIB dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento no CEB e no CES - P, no período de 100 anos	74
Tabela 7 - Exportações médias de bens de capital e de consumo dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento sobre desenvolvimento sob influência de políticas climáticas de redução das emissões e <i>spillovers</i> tecnológicos ao longo de 100 anos	75
Tabela 8 - Comparativo do nível de emissão de CO <sub>2</sub> das nações desenvolvidas e em desenvolvimento nos cenários CEB, CEP, e CES-P	76

## RESUMO

SOUSA, Geovânia Silva de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2015. **Políticas Climáticas, Crescimento Econômico e Bem-Estar: uma abordagem dinâmica multirregional.** Orientadora: Marília Fernandes Maciel Gomes. Coorientadores: Elaine Aparecida Fernandes e Dênis Antônio da Cunha.

A contenção do aumento da temperatura, gerado pelos altos níveis de concentração dos GEE na atmosfera, tem sido um desafio para os cientistas e formuladores de políticas. Um dos maiores entraves à implementação de políticas climáticas de mitigação têm sido os custos incorridos para as economias. Nesse sentido, buscou-se analisar, neste estudo, o desempenho das economias desenvolvidas e em desenvolvimento com a implementação da política climática de redução das emissões, na presença dos *spillovers* tecnológicos. Para tanto, foi elaborado uma variante do modelo MIND, que permitiu estender as análises para diversas regiões, considerando o comércio bilateral e os *spillovers* tecnológicos, em um contexto de mudanças climáticas. Com base nas análises feitas, constatou-se influência positiva dos *spillovers* tecnológicos, uma vez que a elevação no desempenho econômico das regiões bem como nas negociações internacionais e no bem-estar não acarretaram elevação no nível de emissões, visto que estes níveis se mantiveram inalterados. A política climática aplicada somente para os países desenvolvidos, conforme proposto inicialmente pelo protocolo de Kyoto, não foi suficiente para causar impactos positivos ou negativos sobre as variáveis. Quando aplicada para ambos, países desenvolvidos e em desenvolvimento, verificou-se pequena redução no desempenho das economias e no bem-estar, todavia a intensidade da redução nos níveis de emissões de CO<sub>2</sub> foi expressiva, demonstrando com isso que a cooperação entre os países em prol da estabilização da temperatura atmosférica implica maior eficiência da política climática. Por conseguinte, ao considerar a política climática global em conjunto com os *spillovers* tecnológicos, que aumentam a eficiência energética, houve redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub> e elevação tanto no crescimento como no nível de bem-estar, associadas a uma distribuição aceitável dos custos entre as economias. Depreende-se que a alternativa mais eficaz no sentido de mitigar as emissões de GEE e alcançar a estabilidade da

temperatura seja a instituição de uma política climática global, associada aos *spillovers* tecnológicos, ao passo que as economias foram positivamente influenciadas, houve também considerável redução nos níveis de emissões. Ademais, a adição dos *spillovers* tecnológicos significa maior potencial de redução das perdas, ou potencialização dos ganhos de bem-estar. Adicionado a isso, a estabilidade climática implica melhor funcionamento dos ecossistemas, reduzindo as incertezas relacionadas às questões ambientais, que se refletem diretamente na sobrevivência da espécie humana.

## ABSTRACT

SOUSA, Geovânia Silva de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2015. **Climate Policy, Economic Growth, and Well-Being:** a multiregional dynamic approach. Adviser: Marília Fernandes Maciel Gomes. Co-Advisers: Elaine Aparecida Fernandes and Dênis Antonio da Cunha.

The containment of the increasing temperature generated by high concentration levels of greenhouse gas (GHG) in the atmosphere has been a challenge for scientists and public policymakers. One of the biggest obstacles to the implementation of climate mitigation policies have been costs incurred for the economies. In this sense, this study sought to analyze the performance of developed and developing economies with the implementation of climate policy for gases emissions in the presence of technological spillovers. Therefore, a variant of the Mind model was created, which allowed extending the analysis for different regions considering the bilateral trade and technological spillovers in a context of climate changes. On the basis of analysis, it was found positive influence of technological spillovers, since the increasing economic performance in the regions, as well as in international negotiations and wellbeing, did not cause increasing emission levels, which maintained unchanged. The climate policy applied only to developed countries, as initially proposed by the Kyoto Protocol, was not enough to cause positive or negative impacts on the variables. When applied to both developed and developing countries, there was slight reduction in performance of economies and well-being, but the levels' reduction intensity of CO<sub>2</sub> emissions was significant, showing that the cooperation among the countries in favor of the atmospheric temperature stabilization involves more efficiency of climate policy. Therefore, when considering the global climate policy together with technological spillovers that increase energy efficiency, there was significant reduction of CO<sub>2</sub> emissions and increasing of both growth and the well-being level associated with an acceptable distribution of costs among economies. It is concluded that the most effective alternative to mitigate GHG emissions and achieve temperature stability could be the establishment of a global climate policy associated with technological spillovers, since there was also considerable reduction in gas emission, while the economies were positively influenced. Furthermore, the addition of technological spillovers means greater potential for

reducing losses or potentiation of well-being gains. Added to this situation, the climate stability entails better functioning of ecosystems, reducing the uncertainties related to environmental issues, which directly affects the human species survival.

# **INTRODUÇÃO**

## **1.1 Considerações iniciais**

Nas últimas décadas, a preocupação com as mudanças climáticas vem se pautando no limite de emissões estabelecido pelo Protocolo de Kyoto, que foi determinado tendo em vista a contenção do aumento da temperatura atmosférica e os custos dos impactos gerados para a economia e para o meio ambiente, especialmente ao bem-estar e ao bom funcionamento dos ecossistemas.

No sentido de minimizar os efeitos adversos dos altos níveis de temperatura sobre a vida do planeta, foram promovidos debates e reuniões pelas Nações Unidas. A reunião que aconteceu no Rio de Janeiro em 1992 deu origem à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre mudança no clima (CQNUMQ), que estabeleceu como meta estabilizar as concentrações dos gases promotores do aquecimento global.

Nessa convenção, 196 países<sup>1</sup> assinaram um acordo de cooperação internacional, comprometendo-se com o desenvolvimento de uma estratégia global para refrear as mudanças no clima. Reconheceu-se que a problemática do aquecimento atmosférico é uma responsabilidade comum a toda a sociedade, sendo necessárias a participação e a contribuição de todos os países, com o fracionamento dos custos incorridos com a redução das emissões antrópicas dos gases causadores do efeito estufa (GEE) (UNFCCC, 2015).

Mesmo com o reconhecimento da responsabilidade comum dos países, por uma questão histórica de altas taxas de emissões dos GEE e por apresentarem um sistema econômico mais estável, os países desenvolvidos seriam os principais responsáveis por grande parte dos custos incorridos, como, por exemplo, pelo desenvolvimento, aplicação

---

<sup>1</sup>Os países signatários da Convenção Quadro das Nações Unidas (CQNUMQ) são caracterizados como: Países do Anexo I (países industrializados), Países do Anexo II (países desenvolvidos que pagam os custos para países em desenvolvimento) e Países em desenvolvimento, também chamados países do não Anexo I.

e difusão de tecnologias capazes de controlar e por minorar a concentração dos GEE na atmosfera.

Apesar da urgência da aplicabilidade de medidas para a contenção do aquecimento global, as diretrizes definidas pela CQNUMQ não condiziam com o cenário real, sendo, portanto, necessária a adoção de medidas mais enérgicas. Com isso, foram organizadas comissões permanentes e promovidos encontros das Partes<sup>2</sup> (COP) para negociar metas e prazos para redução de emissões dos GEE para os países desenvolvidos.

Em 1997, na Conferência das Partes três (COP 3), em Kyoto, no Japão, foi elaborado o Protocolo de Kyoto com o intuito de equalizar as emissões, em que foi proposto uma redução de no mínimo 5% dos níveis de emissões dos GEE observados no ano de 1990, em um período de compromisso entre os anos 2008 e 2012, sendo ratificado por 192 países (UNFCCC, 2015).

Nesse protocolo, ficou estabelecido que os Países inseridos no Anexo I<sup>3</sup> seriam os responsáveis pela elaboração e implementação de políticas e medidas capazes de minimizar os impactos das mudanças climáticas sobre o comércio internacional, o bem-estar econômico e social, especialmente dos países do chamado não Anexo I, em que está inserida a América Latina, uma região composta por uma diversidade de países, desde os pobres àqueles em franco desenvolvimento (ONU, 1998).

Dessa forma, os países dessa região, designados como não-Anexo I, ficaram isentos de políticas de contenção às mudanças climáticas, uma vez que o protocolo de Kyoto, adotado em 1997, não especificou metas de redução das emissões como fez aos países do Anexo I.

Nos últimos anos, a América Latina tem passado por um processo de expansão econômica. Em conjunto com esta expansão, vieram elevados níveis de emissões de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera. O Produto Interno Bruto (PIB) da região cresceu 62% no último decênio, e as emissões da região, em 2011, representaram 9%

---

<sup>2</sup>Por Partes, segundo ONU (1998), entende-se os países signatários.

<sup>3</sup>Os países que compõem o 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.

do total do mundo. Assim, trajetórias de emissões, como as apresentadas pela América Latina, afetarão significativamente os esforços globais de neutralização das emissões.

Os compromissos de redução não são homogêneos, e variam entre os países. O percentual de redução previsto no protocolo para a União Europeia, por exemplo, era de 92%, e para outros países, como a Austrália, o percentual presumido era de 108%. Aos países em desenvolvimento, não foram determinados compromissos para reduzir suas emissões de gases do efeito estufa (BERNSTEIN, 1999).

O desacordo dos países em relação à responsabilidade comum, porém diferenciada quanto aos compromissos de redução das emissões, acarretou a não ratificação do acordo internacional por alguns países desenvolvidos, como os Estados Unidos. Em virtude disso, o protocolo começou a vigorar somente em 2005, oito anos após sua elaboração, com a ratificação da Rússia, somando 55 países que representavam 55% das emissões globais.

Tendo em vista o vencimento do prazo do protocolo e a necessidade de revisão das metas de redução bem como a participação dos países em desenvolvimento na cooperação para reduzir a concentração dos gases de efeito estufa, foi realizada a COP 20, em dezembro de 2014.

Nessa conferência, foi possível observar que houve uma mudança visionária dos países em relação ao aquecimento global, demonstrando certa preocupação quanto às mudanças irreversíveis, e os danos, para os mais diversos segmentos da sociedade, que o aumento da temperatura pode gerar, levaram a debate a implementação de um acordo universal, em que todos os países estariam empenhados em descarbonizar progressivamente a economia global no sentido de alcançar a neutralidade climática, emitindo apenas níveis de gás carbônico capazes de ser absorvidos pela atmosfera.

Estabeleceu-se, na COP 20, que os países desenvolvidos deveriam incentivar os países em desenvolvimento a mostrar seus esforços e necessidades para contribuir de forma ativa na redução da emissão dos GEE. Além disso, garantir o fornecimento de recursos financeiros e a transferência de tecnologia e capacitação para que os países em desenvolvimento enfrentem os custos de lidar com os efeitos adversos das alterações climáticas e melhorem suas ações para se adaptarem à mudança climática.

Dessa forma, os compromissos e contribuições dos países em desenvolvimento bem como dos países pobres estão atrelados ao cumprimento do acordo pelos países desenvolvidos, especialmente no que tange aos recursos financeiros e à transferência de tecnologia (UNFCCC, 2015). A transferência de tecnologia é, portanto, apresentada como um mecanismo capaz de induzir os países ao controle de emissões, haja vista que as economias estão cada vez mais interligadas pelos fluxos de comércio, investimento, tecnologia e ideias.

Segundo Meinshausen *et al.* (2009), uma alternativa para a redução sustentada das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e de estabilização de sua concentração, em um nível abaixo da meta de estabilização, está na difusão de novas tecnologias, o que pode ocorrer por meio de transações de mercado e transbordamento da tecnologia (*spillover*) (KELLER, 2004). Assim, os países desenvolvidos criam novas tecnologias, que, por meio do comércio de bens e serviços entre os países, são incorporadas pelas economias em desenvolvimento (BOSETTI, 2008).

Barrett (1994), Barrett (2002), Carraro e Siniscalco (1994), Grubb, Hope e Fouquet (2002), Philibert (2004), Buchner *et al.* (2005) e McJeon *et al.* (2011), entre outros, apontam a cooperação tecnológica entre os países como alternativa de redução dos custos da mitigação.

Neste contexto, a redução substancial das emissões de GEE exige cooperação entre os países e esforços econômicos globais que implicam mudanças tecnológicas e decisões políticas que envolvem um custo, e conhecer esses custos é fundamentalmente importante para viabilizar a implementação dos acordos internacionais, cujo objetivo maior é refrear as mudanças no clima.

## **1.2 Problema e sua importância**

As emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEEs) observadas ao longo do período de 1970 a 2010 aumentaram significativamente. Entre os anos 1970 e 2000, houve aumento de 0,4 GtCO<sub>2</sub>eq, 1,3% por ano, enquanto o aumento registrado entre os anos 2000 e 2010 foi em média 1,0 giga toneladas de carbono equivalente (GtCO<sub>2</sub>eq),

2,2% das emissões por ano, sendo a queima de combustíveis fósseis o principal responsável por essa elevação, com cerca de 78% das emissões totais de GEE (IPCC, 2014).

Na COP 20, observou-se que, para limitar o aumento da temperatura média entre 2°C e 1,5°, é necessário que a redução das emissões de gás do efeito estufa global seja de 40 a 70% abaixo dos níveis de 2010 até 2050, e próxima de zero até ao final do século. Sendo os combustíveis fósseis a principal fonte de energia utilizada no processo produtivo e os responsáveis pelo aumento progressivo da concentração dos GEE na atmosfera, ter-se-ia nesse caso um forte impacto no processo produtivo, consequentemente no crescimento econômico e assim redução no bem-estar humano.

O próprio IPCC (2007), em seu quarto relatório, mostrou que os custos macroeconômicos da mitigação dos GEE, considerando as trajetórias das emissões e visando à estabilização entre 445 e 710 ppm CO<sub>2</sub>-eq, representariam uma redução média de 3% do PIB global no período entre 2000 e 2030.

Sob a prerrogativa de que a implementação das políticas climáticas de redução das emissões dos GEEs acarretaria a redução do bem-estar econômico, alguns países desenvolvidos, entre outros, os Estados Unidos, utilizaram tal argumento para não ratificar o acordo internacional de redução das emissões dos GEEs durante os anos de vigência do protocolo de Kyoto.

Neste sentido, o presente estudo pretende responder aos seguintes questionamentos: Quais os custos regionais da redução das emissões dos GEE? Quais os seus efeitos sobre o comércio internacional, o crescimento econômico e o bem-estar para países desenvolvidos (Europa e EUA) e para países em desenvolvimento (América Latina, China)? Existem vantagens e incentivos para a participação de acordos climáticos internacionais?

A contenção do aumento da temperatura atmosférica em decorrência da concentração dos GEE tem sido um desafio para cientistas e formuladores de políticas, assim, conhecer a estrutura dos custos da mitigação desses gases, sua distribuição regional, a interligação entre a política climática e o crescimento econômico, o bem-estar e o comércio internacional, é de vital importância para elaboração de políticas climáticas que considerem as especificidades dos países, especialmente dos países

pobres e em desenvolvimento, uma vez que a redução das emissões de GEE requer um esforço global.

A literatura apresenta uma gama de teorias que fundamentam a relação entre as questões econômicas e o meio ambiente. Hotelling (1931) pressupõe que se houvesse um pagamento relativo à escassez dos recursos aconteceria uma redução do seu desgaste, e o uso dos recursos naturais passaria a ser mais eficiente. Stiglitz (1974) e Solow (1986) mostraram que o crescimento econômico não acarreta danos ao meio ambiente se o progresso tecnológico for maior que o desgaste ambiental.

A base teórica deste estudo está no modelo de Ramsey-Cass-Koopmans, desenvolvido por Xepapadeas (2005). No modelo de Ramsey-Cass-Koopmans, há inserção do planejador social nas análises de crescimento, que busca maximizar o bem-estar da sociedade pela escolha entre o consumo ou a poupança. Xepapadeas (2005) introduz a questão ambiental como uma variável endógena ao modelo. Como principais argumentos que relacionam o módulo econômico ao módulo ambiental, o autor apresenta os seguintes pontos: a poluição como um subproduto dos processos de produção ou consumo; as emissões geradas no módulo econômico, afetando o fluxo ou a acumulação de poluentes no meio ambiente; e a poluição gerando efeitos negativos tanto na utilidade dos indivíduos como na produtividade.

Empiricamente, os estudos de Edenhofer *et al.* (2005), Leimbach e Baumstark (2010) e Sousa e Fernandes (2014) analisaram, com base no modelo MIND, as questões econômicas relacionadas às questões ambientais especialmente no que se refere às políticas climáticas, crescimento econômico, *spillovers* tecnológicos e bem-estar.

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

Leimbach e Baumstark (2010) desenvolveram o Modelo MIND-RS, que é um modelo dinâmico multirregional que subsidia teoricamente o presente trabalho. Tais autores encontraram dois efeitos opostos em relação aos custos de mitigação ao considerarem os transbordamentos na análise: i) aumentam devido a um efeito de crescimento, ii) reduzem por meio de melhorias na eficiência energética. Pela complexidade matemática e analítica que envolve o desempenho econômico ligado às questões ambientais e buscando uma melhor representação da realidade, esse modelo utiliza uma função de produção do tipo *Constant Elasticity of Substitution*(CES), que permite certa flexibilidade no que tange ao grau de substituição entre os fatores produtivos.

Sousa e Fernandes (2014) são outros autores que buscaram avaliar a interligação entre políticas climáticas, crescimento econômico, *spillovers* tecnológicos e bem-estar, tendo utilizado, para tanto, o modelo de otimização intertemporal e a avaliação integrada. Os autores chegaram à conclusão de que para qualquer cenário de política climática, os custos de mitigação são irrisórios para o crescimento econômico e, sobretudo, para o bem-estar.

Outros estudos, como os de Kemfert (2004), Nagashima e Dellink (2008), Bosetti *et al.* (2008), Verdolini e Galeotti (2009) e Dechezlepretre *et al.* (2009), buscaram avaliar os custos de mitigação e a estabilidade dos acordos internacionais, considerando os *spillovers* tecnológicos. De modo geral, concluíram que os efeitos da estabilização dos gases de efeito estufa nos custos são muito pequenos.

O presente estudo utilizou uma versão adaptada do modelo de Edenhofer *et al.* (2005), elaborado de modo que fossem feitas análises para diversas regiões, considerando o comércio bilateral e os *spillovers* tecnológicos embodied, em um contexto de mudanças climáticas que se aproxima do modelo da Leimbach e Baumanstark (2010), o Modelo MIND-RS, um modelo de análise dinâmico, multirregional, de investimento e desenvolvimento do tipo Ramsey estilizado. Diferentemente dos modelos de Edenhofer *et al.* (2005) e da Leimbach e Baumanstark (2010), foram inseridos no modelo parâmetros percentuais no sentido de especificar o processo de otimização da função objetivo do modelo, função de Bem-estar. Ademais,

foi inserida, ao modelo, variáveis referentes à América Latina, região economicamente em expansão e de suma importância para o comércio internacional.

Tendo em vista o cenário de debate em relação à cooperação tanto dos países desenvolvidos como dos países em desenvolvimento na descarbonização da atmosfera, com o objetivo de proteger o sistema climático para benefício das gerações presentes e futuras, pretende-se, com esse estudo, ampliar a literatura que trata dos custos incorridos com a implementação de políticas climáticas e fornecer subsídios para a elaboração de metas, projetos e políticas específicas, capazes de contribuir com o debate acerca da participação dos países na elaboração de um projeto universal de neutralização das emissões dos gases de efeito estufa.

### **1.3 Objetivos**

De forma geral, o presente estudo busca analisar as implicações das políticas climáticas de redução das emissões de GEE, na presença de *spillovers* tecnológicos, sobre o comércio internacional, o crescimento econômico e o bem-estar dos países desenvolvidos (EUA, Europa) e em desenvolvimento (América Latina, China), no período de 2000 a 2100.

Especificamente, pretende-se:

- a) Analisar o comportamento do comércio internacional, o crescimento econômico e o bem-estar dos países desenvolvidos (EUA, Europa) e em desenvolvimento (América Latina, China), sem restrição de emissões e desconsiderando os *spillovers*;
- b) Examinar a influência dos *spillovers* tecnológicos sobre o comportamento das variáveis econômicas comércio internacional, crescimento econômico e bem-estar dos países desenvolvidos (EUA, Europa) e em desenvolvimento (América Latina, China);
- c) Analisar o comportamento das variáveis econômicas comércio internacional, crescimento econômico e bem-estar das regiões, considerando a implantação de metas de redução da emissão de GEE apenas para países desenvolvidos (EUA, Europa);

- d) Verificar o comportamento das variáveis econômicas comércio internacional, crescimento econômico e bem-estar das regiões, considerando a implantação de metas de redução da emissão de GEE tanto para os países desenvolvidos (EUA, Europa) quanto para os países em desenvolvimento; e
- e) Avaliar se os compromissos de mitigação na presença de *spillovers* influenciam no comportamento das variáveis econômicas comércio internacional, crescimento econômico e bem-estar das regiões selecionadas.

## 2 CRESCIMENTO E MEIO AMBIENTE: EVOLUÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, busca-se apresentar a evolução teórica acerca do crescimento econômico e meio ambiente, perpassando pelos modelos de Harrod-Domar (1946) até o modelo MIND-RS (2010).

No decorrer dos séculos XV e XVIII, pode-se observar uma diversidade de transformações políticas e socioeconômicas, mudanças essas que deram origem à primeira Revolução Industrial, caracterizada pelo aumento da produção, da população e pelo acelerado processo de urbanização. A falta de planejamento dessa dinâmica foi marcada pelo uso predatório de recursos naturais. Nesse período, algumas economias experimentaram um século de crescimento sustentado com o enriquecimento dessas nações, enquanto outras permaneceram pobres. Tendo em vista essa divergência de crescimento, autores como Ramsey (1928), Harrod (1939), Domar (1946), Solow (1956), Arrow (1962), Cass (1965) Koopmans (1965), Uzawa (1965), Romer (1986, 1990), Lucas (1988), Grossman e Helpman (1991), Aghion e Howitt (1992), Edenhofer (2005) e Leimbach e Baumanstark (2010) buscaram investigar os mecanismos indutores do crescimento econômico das nações.

Uma das teorias seminais que buscaram investigar o crescimento econômico foi a de Harrod (1939) e Domar (1946). Observando a forma como determinadas forças influenciam na magnitude das variáveis macroeconômicas para ajustar o sistema econômico, os autores buscaram unir o princípio da aceleração<sup>4</sup> e a teoria do multiplicador econômico para desenvolver uma teoria dinâmica, pautada em três axiomas: 1) o nível de renda de um país é o determinante mais importante do seu nível de poupança; (2) a taxa de aumento de sua renda é um fator determinante da demanda; e (3) o equilíbrio de mercado, obtido pela igualdade entre a oferta e a demanda, tem a finalidade de explicar os ciclos econômicos, sem inserir em suas análises as questões relacionadas ao meio ambiente.

---

<sup>4</sup>Entende-se por Princípio da aceleração uma taxa de alteração da demanda no presente.

No modelo Harrod-Domar (1946), o equilíbrio do sistema é garantido por sua dinamicidade. Tal dinamismo acontece na relação marginal produto-capital pela propensão marginal a poupar, ou seja, com base no aumento da oferta pelos investimentos e pela determinação da demanda agregada via multiplicador. Há uma única taxa que garante o crescimento equilibrado, todavia, inexistem mecanismos de garantia quanto à efetividade dessa taxa de crescimento, acarretando um crescimento instável.

Depreende-se do modelo Harrod-Domar que haverá uma oscilação no crescimento das economias entre períodos de crescimento vertiginoso e períodos de bruscas quedas do nível de atividade econômica, uma vez que, apesar de existir a possibilidade da obtenção de uma trajetória de crescimento estável, a independência das variáveis constitutivas da condição de equilíbrio torna essa possibilidade improvável. Somado a isso, tem-se que o efeito cumulativo dos desvios da taxa efetiva de crescimento com relação à taxa garantida acarreta instabilidade no crescimento.

A hipótese de crescimento instável, contudo, foi questionada por Solow (1956) e Trevor Swan (1956) sob o argumento de que uma economia pode atingir, no longo prazo, um crescimento estável desde que seja possível a substitutibilidade do fator capital por trabalho.

A teoria do crescimento de Solow foi desenvolvida na década de 1950 e apresentada no artigo “A Contribution to the Theory of Economic Growth”, pelo qual, no ano de 1987, lhe foi conferido o Prêmio Nobel de Economia. A abordagem teórica do crescimento feita por Solow-Swan (1956) mostra, com respaldo na poupança, no crescimento demográfico e no progresso tecnológico, a dinâmica de uma economia que busca atingir um estado de equilíbrio estável no longo prazo.

Para alcançar esse fim, são requeridos seis pressupostos fundamentais:

- I) A função de produção apresenta rendimentos constantes à escala;
- II) Sobre a acumulação de capital incidem os rendimentos marginais decrescentes;
- III) O fator trabalho cresce a uma taxa constante, positiva e exógena;
- IV) Da mesma forma, a tecnologia cresce a uma taxa constante, positiva e exógena, e é tomada como bem público livremente disponível;

- V) A taxa de poupança também é constante, positiva e exógena;
- VI) O mercado é perfeitamente competitivo. Sob tais aspectos, Solow mostra que uma economia pode crescer de forma positiva e sustentável no longo-prazo.

O modelo de crescimento de Solow parte do pressuposto de que a função de produção depende dos fatores capital<sup>5</sup>, trabalho e tecnologia. O pressuposto dos rendimentos constantes de escala indica que o tamanho de um sistema econômico, mensurado com base no número de trabalhadores efetivos, não afeta tanto a produção como quando considerado o capital por trabalhador. Assim, uma unidade extra de capital por trabalhador pode gerar uma quantidade adicional maior na produção. Ou seja, quando o capital é baixo, o trabalhador dispõe de pouco recurso para trabalhar, porém, visto que incidem sobre a acumulação de capital rendimentos decrescentes de escala, unidades adicionais de capital representarão ganhos significativos para a atividade produtiva (ROMER, 2011).

As variáveis capital, trabalho e tecnologia no modelo crescem a taxas constantes. Embora sejam considerados o crescimento populacional e a tecnologia, o estoque de capital constitui um fator preponderante para aumentar o produto total da economia (AGUIÓN, 1998). Quanto maior o estoque de capital, maior o produto. Esse produto é dividido entre consumo e investimento. Sendo capital e produto elevados, as taxas de investimento também serão altas, contudo, a depreciação será, da mesma forma, elevada. A fração do produto destinada para o investimento é exógena e constante. Assim, uma unidade de capital investido produz uma nova unidade de capital, havendo, em contrapartida, depreciação do capital existente.

Considerando o efeito da depreciação, o modelo de Solow pressupõe que os trabalhadores poupem uma taxa “s” constante de sua renda, pois sobre o efeito da depreciação, com o passar do tempo, essa taxa “s” constante desaparece, ou seja, o valor do capital e o da depreciação serão os mesmos, indicando que a economia chegou ao seu equilíbrio de longo prazo.

Dessa forma, sempre que o capital for escasso, sua produtividade será maior, conseqüentemente, os rendimentos também serão maiores, levando as pessoas a poupar mais do que o suficiente para cobrir a depreciação do capital acumulado, o que

---

<sup>5</sup> Por capital, entende-se tanto capital humano como capital físico (AGUIÓN, 1998).

caracterizará um iminente crescimento econômico no curto prazo. Contudo, a atuação da lei dos rendimentos marginais decrescentes fará com que a renda cresça menos que o capital social, ou seja, a poupança passará a crescer a níveis mais baixos que a depreciação, até que chegue a um mesmo ponto - o ponto de estabilidade da economia.

No estado estacionário, o capital por trabalhador e a produção são constantes. Havendo, contudo, crescimento populacional, o número de trabalhador estará aumentando a uma taxa  $n$ , bem como o capital e a produção total, que também crescerão a uma taxa  $n$ , acarretando crescimento sustentável na produção. Somado a isso, uma elevação na taxa de crescimento de trabalhadores terá como consequência uma redução no nível de capital por trabalhador que, por conseguinte, provocará redução da produção por trabalhador. Com isso, países com maior crescimento populacional terão um menor PIB *per capita*. Tal comportamento tem sido usado para demonstrar a discrepância entre as nações (AGUIÓN, 1998).

Outra forma de tentar explicar a discrepância entre os países, conforme Aguión (1998), é pelo progresso tecnológico. No modelo de Solow, a relação entre trabalho e capital é constante, assim, uma forma de expandir a capacidade produtiva e compensar o efeito dos rendimentos marginais decrescentes tem como base mudanças tecnológicas. Assim sendo, à medida que há um aperfeiçoamento da tecnologia disponível, acontecerá um aumento da eficiência da mão de obra. Isso implica que, mesmo não sendo alterado o número de trabalhadores, a produção por trabalhador poderá ser aumentada, gerando ganhos no processo produtivo. Portanto, ainda que a trajetória do crescimento seja determinada por parâmetros como taxa de poupança ( $s$ ), depreciação ( $\delta$ ) e crescimento populacional ( $n$ ), o único parâmetro capaz de afetar diretamente o crescimento é a taxa exógena de tecnologia. Sob esse prisma, somente o progresso tecnológico pode explicar as disparidades econômicas entre os países.

Ademais, o modelo de Solow suscita a possibilidade de convergência econômica entre países pobres e países ricos. Segundo Solow, uma economia pobre, com menor estoque de capital, crescerá muito mais rapidamente no sentido de alcançar o estado estacionário. E quando esta convergência acontecer, as economias terão o mesmo nível de capital, produto e consumo. Contudo, tendo diferentes taxas de poupança, as economias podem crescer em direção ao seu próprio estado estacionário.

Solow (1956) atribui o crescimento econômico ao progresso tecnológico dado exogenamente. De acordo com Jones (2000), o progresso tecnológico no modelo de Solow surge automaticamente na economia sem considerar a influência de outros fatos, tal qual um “maná que cai do céu”, não havendo explicação quanto à origem ou causas. O acúmulo de capital físico, por si só, não é capaz de explicar o elevado crescimento ao longo do tempo em termos de produto *per capita*, ou as diferenças desse produto entre as nações.

A teoria da estabilidade do crescimento de Solow (1956), assim como outras teorias que abordam o crescimento econômico, deixou de considerar, segundo Romer (2011), as limitações ambientais. A exaustão dos recursos naturais não renováveis, explorados a altas taxas, como observou Hotteling (1931), instigou estudos de Solow (1974, 1986) e de Stiglitz (1974), cuja abordagem permeia o campo da disponibilidade dos recursos ambientais, de seus preços e dos limites que eles podem impor ao crescimento.

Solow (1974) foi motivado a descobrir o que a teoria econômica versava sobre a exaustão dos recursos naturais pela leitura de Hottelin (1931):

Contemplation of the world's disappearing supplies of minerals, forests, and other exhaustible assets has led to demands for regulation of their exploitation. The feeling that these products are now too cheap for the good of future generations, that they are being selfishly exploited at too rapid a rate, and that in consequence of their excessive cheapness they are being produced and consumed wastefully has given rise to the conservation movement (HOTTELIN, 1931, p. 1).

Assim, a forma como os recursos vinham sendo explorados e a preocupação com os limites que tal situação poderia impor ao crescimento levou-o a investigar o custo de oportunidade em relação ao uso dos recursos naturais não renováveis e sua possível degradação. Para tanto, inseriu os recursos naturais não renováveis em uma função de produção homogênea de grau  $1 - h$  do tipo Cobb-Douglas:  $Q = F(K, L)R^h$  ( $0 < h < 1$ ).

A função do tipo Cobb-Douglas permite a substitutibilidade entre os fatores capital e trabalho, de modo que, para manter a mesma quantidade produzida  $Q$ , reduzindo uma unidade de trabalho, deve-se aumentar a quantidade de capital em uma unidade.

A sensibilidade em relação ao preço dos fatores é dada pela elasticidade de substituição. Quando a elasticidade de substituição entre capital e trabalho é baixa, significa que a variação nos preços é baixa, sendo difícil a substituição entre os insumos capital e trabalho.

O progresso técnico no modelo de Solow, que considera os limites ambientais, é mensurado pela relação entre as elasticidades de substituição do capital e a elasticidade de substituição do trabalho, de modo que para que haja um aumento no progresso tecnológico é preciso um aumento no capital. Por sua vez, a redução do progresso tecnológico está relacionada à redução de mão de obra. Se não houver alteração na relação entre capital e trabalho ao longo do tempo, tem-se uma taxa Hicks neutral<sup>6</sup>.

A formação de capital, nesse modelo, depende das variáveis *per capita* capital, disponibilidade de recurso natural e consumo, além do crescimento populacional e do progresso tecnológico, sendo condutora da economia para um crescimento equilibrado a taxa de consumo dos recursos naturais. Solow (1986) afirma que, mesmo com os recursos naturais tendendo ao declínio, pode existir crescimento sustentável se o progresso tecnológico for maior que o consumo dos bens ambientais. Assim, a inovação tecnológica nesse modelo permite que haja suprimento da demanda atual dos bens ambientais sem comprometer as gerações futuras.

Destarte, uma falha apresentada no modelo de Solow é que a taxa de poupança (investimento), conseqüentemente a relação entre o consumo e rendimento, é exógena e constante. Os consumidores são incentivados a consumir uma parte de sua renda no presente e poupar outra parte para o consumo futuro. Vedando os consumidores de um comportamento maximizador de sua utilidade, a análise não permite discussão de como os incentivos afetam o desempenho da economia, ou seja, não dá para saber quais foram as mudanças no sistema econômico decorrentes das variações nas taxas de juros e alíquotas de impostos ou outras variáveis.

No sentido de sanar essa falha, Ramsey Cass Koopmans (1965) apresenta um modelo caracterizado pela maximização da Utilidade individual ou do bem-estar, resultando em uma poupança endógena. O cerne do modelo está em quanto do produto

---

<sup>6</sup> A taxa Hicks Neutral refere-se a mudanças feitas na função de produção seguindo determinadas condições de neutralidade econômica. Ou seja, a mudança é considerada neutra no sentido de Hicks se não afetar o equilíbrio entre trabalho e capital na função de produção do modelo Solow.

nacional deve ser destinado para o consumo de modo a maximizar a utilidade atual, e quanto deve ser poupado (e investido) de modo a aumentar a produção e o consumo futuro, portanto, produzir utilidade futura.

Com isso, o modelo de crescimento ótimo desenvolvido por Ramsey (1928), mais tarde refinado por Cass (1965) e Koopmans (1965), passou a considerar um planejador social que busca maximizar a utilidade individual ou o bem-estar coletivo, pela escolha entre o consumo ou a poupança. E, assim, como no modelo de Solow, tanto a poupança quanto o consumo são assumidos como dados, porém, a evolução do estoque de capital é determinada pela interação entre as maximizações de famílias e firmas em mercados competitivos. Contudo, o resultado, diferentemente do modelo de Solow-Suan (1956), foi uma taxa de poupança endógena.

O modelo 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. Pressupõe que existe um número grande de famílias idênticas que 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 relação entre consumo de cada membro da família no tempo e o número médio de indivíduos presentes em cada família, ponderada por uma taxa de preferência temporal. Quanto maior o valor dessa taxa, menor é o consumo futuro das famílias, ou seja, as famílias irão preferir consumir no presente a poupar para o consumo futuro.

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. A função de produção das firmas depende dos fatores capital ( $K$ ), trabalho ( $L$ ) e tecnologia ( $T$ ). Como a função de produção tem retornos constantes e o mercado é competitivo, as firmas recebem lucro zero.

A família representativa, então, maximiza sua satisfação sujeita à sua restrição orçamentária, considerando suas interações com as firmas. As firmas pagam pelo trabalho e pelo capital fornecido pelas famílias, e as famílias consomem os produtos

gerados pelas firmas. Dessa forma, o nível de satisfação ou bem-estar da família representativa está ligado ao consumo de produtos sujeitos 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 sobre o 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.

Assim, o modelo de Ramsey Cass Koopmans (1965) diferencia-se do modelo de Solow–Suan (1956) por apresentar a poupança como um fator endógeno ao sistema, determinada pela decisão dos agentes quanto à maximização da sua utilidade no presente ou no futuro.

Mesmo tendo o modelo de Ramsey apresentado argumentos esclarecedores acerca do crescimento, autores como Meade (1961), Arrow (1962), Uzawa (1965), Romer (1986), Lucas (1988), Grossman e Helpman (1989) e Romer (1990) se sentiram motivados a investigar a origem do crescimento.

Nos modelos apresentados pelos autores supracitados, o crescimento passa a ser determinado por forças internas ao sistema, no qual as externalidades têm um papel fundamental e os rendimentos marginais do “fator acumulável” são tidos como constantes ou crescentes, garantindo, assim, um crescimento equilibrado de longo prazo. Para tanto, fatores como inovação tecnológica endógena, capital humano e os arranjos institucionais passam a integrar as análises do processo de crescimento.

Arrow (1962) interpreta a invenção como produção de conhecimento. Segundo o autor, o aprendizado é consequência do aumento do capital físico, uma vez que as firmas ao longo do processo produtivo buscam novas formas de produzir. Com isso, o conhecimento adquirido na profissão ou no desenvolvimento de um processo é considerado público e responsável pelo aumento do produto na economia. Assim, introduz o conceito do *learning by doing*, que é a base de sustentação para o modelo de crescimento endógeno de Romer (1986, 1990).

Uzawa (1965), por sua vez, associa o crescimento da tecnologia ao capital humano. Segundo o autor, para haver progresso tecnológico, são necessários serviços de trabalho na forma de insumos educacionais. Ademais, analisa trajetórias ótimas de crescimento, sem se preocupar com a estabilidade.

Lucas (1988) tomou como base o modelo de Uzawa (1965) para investigar a influência do capital humano no crescimento endógeno, observando trajetórias de estabilidade. Diferentemente do que acontecia no modelo de Solow (1956), em que o crescimento tecnológico exógeno era o responsável pelo crescimento sustentado, Lucas demonstra que a acumulação de capital humano pode resultar em um crescimento econômico sustentável. O autor defendeu a hipótese de que o capital humano aumenta a produtividade do trabalho, apontando a acumulação de capital físico como principal responsável pelo crescimento econômico.

O modelo prevê, segundo Barro e Sala-i-Martin (2003), que a superação de uma economia que teve grande parte do seu capital físico devastado por uma guerra é mais rápida do que a superação de uma epidemia que dizimou grande parte do capital humano. Então, se o capital físico é maior que o capital humano, a motivação maior será para alocar o capital humano no setor de bens ao invés de alocá-lo no setor de pesquisa, uma vez que sua produtividade é mais elevada nesse setor. Com isso, a taxa de crescimento da economia tende a ser reduzida.

A ideia básica do modelo é que as pessoas dividem seu tempo entre trabalho e treinamento, então, há, nesse caso, um trade off quando se considera que a formação pessoal consiste em abrir mão do seu rendimento presente para aumentar a produtividade futura, conseqüentemente, seu rendimento futuro.

Assim, quanto maior o nível de formação, maior a produtividade, conseqüentemente, maior será o aumento no produto do trabalho marginal que segue a formação e, portanto, maior a taxa de salário futuro. Isto significa que os incentivos à formação educacional são maiores e, assim, será também a taxa de crescimento da economia. Ou seja, quanto maior o ímpeto em elevar o nível de formação pessoal, menor o privilégio para os consumidores no presente em relação ao consumo futuro, mas os trabalhadores estarão dispostos a abandonar o consumo presente para dedicar-se à formação pessoal.

Dessa forma, para verificar a dinâmica do crescimento econômico, o modelo de Lucas é estruturado em um sistema de equações diferenciais capazes de refletir o comportamento das variáveis econômicas observadas no mundo real. Para tanto, ele integra, aos modelos de crescimento da época, a interação entre capital físico e humano e uma mudança tecnológica, a especialização do próprio capital humano através de aprendizagem em espécies diferentes (*learning-by-doing*), bem como a interação entre comércio e desenvolvimento, na pressuposição de que o bem-estar dos consumidores seja dado por uma função de utilidade intertemporal de elasticidade de substituição constante. Integra também, aos modelos de crescimento da época, a "eficácia" de formação, isto é, a taxa de aumento da produtividade da mão de obra, dada por uma unidade adicional de treinamento exógena.

Nesse sentido, inova em relação aos modelos anteriores ao considerar o aperfeiçoamento do capital o indutor do crescimento, expondo a possibilidade de haver efeitos de transbordamentos (*spillovers*) de capital humano entre os diferentes países. A classe trabalhadora poderia agora ser dividida entre os capacitados e os não capacitados. A igualdade dos níveis de renda entre as nações passa a depender da relação entre os diversos países, podendo existir convergência entre os dotados de maior capital humano, destarte, essas economias apresentariam os melhores níveis de renda.

Romer (1986, 1990) retoma o pensamento de Arrow (1962), que considera o aprendizado consequência do aumento do capital físico. O modelo de crescimento endógeno, proposto por Romer (1986, 1990), fundamenta-se em três premissas: 1) o aperfeiçoamento tecnológico constitui o motor para o crescimento da economia; 2) a mudança tecnológica surge em grande parte pela interação entre os países, configurando-se como endógena ao invés de exógena; e 3) o conhecimento adquirido para trabalhar com matérias-primas difere de outros bens econômicos, com isso as instruções adquiridas podem ser usadas repetidas vezes, sem nenhum custo adicional. O desenvolvimento de novas e melhores instruções é equivalente a incorrer em um custo fixo, premissa que, segundo Romer (1990), caracteriza a tecnologia<sup>7</sup>.

Para elaboração do modelo, a economia foi dividida em três setores: o setor de pesquisa, que utiliza o capital humano e o estoque de conhecimento existente para

---

<sup>7</sup>O modelo de Romer (1990) separa o conhecimento (H) da tecnologia (A).

produzir novos conhecimentos, resultando nas patentes; o setor de bens intermediários, que usa o conhecimento do setor de pesquisa na produção dos bens de capital; e o setor de bens finais, que usa trabalho, capital humano e o conjunto de produtos do setor de bens intermediários, podendo esta produção ser tanto consumida quanto estocada como novo capital. As variáveis básicas do modelo são capital, trabalho, capital humano e tecnologia.

Romer (1990) promoveu algumas simplificações para que a análise dinâmica e os efeitos de interesse pudessem ser feitos e aferidos de modo mais simples. A primeira simplificação considera a população e a oferta de trabalho constantes. A segunda considera fixos o estoque total de capital humano na população, a fração fornecida ao mercado também e, por consequência, a oferta agregada dos fatores mão de obra e capital humano. A terceira é que a análise dinâmica, nesse modelo, limita-se à análise de equilíbrios com taxas de crescimento constantes.

A produção final é expressa, no modelo, como uma função do trabalho, do capital humano e da quantidade de bens de capital, de modo que um dólar adicional de um bem intermediário não tem efeito sobre a produtividade marginal de outro bem intermediário usado na produção. O capital total da economia é mensurado pela diferença entre a produção total de bens e o consumo total.

Assume-se no modelo que o equilíbrio se baseia no pressuposto de que qualquer pessoa envolvida na pesquisa tem livre acesso a todo o estoque de conhecimento, que quanto maior a quantidade de capital humano direcionado para a pesquisa, maior a taxa de produção de novos projetos, e que quanto maior o estoque total de projetos e conhecimento, maior a produtividade do pesquisador.

A característica fundamental da especificação usada por Romer (1990) é que o conhecimento entra na produção de duas formas distintas. Um novo projeto pode desenvolver um produto que poderá ser utilizado na produção de bens finais. Ademais, pode também aumentar o estoque total de conhecimento<sup>8</sup> e, assim, aumentar a produtividade do capital humano no setor de investigação. Isso porque o direito de propriedade relacionado a um novo projeto recai somente sobre o uso na produção, não

---

<sup>8</sup>O conhecimento é considerado um bem não rival, parcialmente excludente e privado.

havendo qualquer impedimento de uso no setor de pesquisa. Em nível agregado, o estoque de capital humano é somado ao capital físico, resultando no capital total envolvido no processo produtivo.

A demanda de produtos finais, por sua vez, mostra que o produtor de bens finais especializado toma o preço como dado na escolha da maximização de lucros. Uma empresa que já fez investimento em um projeto irá escolher um nível de produção capaz de maximizar seu lucro.

O custo é a despesa dos juros nas unidades de saída necessária para produzir os bens finais demandados. Para manter a análise simples, convencionou-se que o capital seja físico, de modo que a empresa possa resolver este problema em qualquer ponto do tempo. Somado a isso, a qualquer momento, o único custo recorrente é a despesa inicial no projeto. Essa suposição é inofensiva porque a demanda por bens duráveis é estacionária. A decisão de produzir uma nova entrada especializada depende de uma comparação do fluxo descontado da receita líquida e do custo do investimento inicial em um projeto. Isso porque o mercado de projetos é competitivo, e o preço para os projetos será licitado até que seja equivalente ao valor presente da receita líquida recebida por um monopolista.

O valor da receita em relação ao custo marginal deve ser suficiente para cobrir o custo dos juros sobre o investimento inicial em um projeto. A solução do modelo para atingir um crescimento equilibrado mostra que há uma relação linear negativamente inclinada entre a taxa de crescimento do produto e a taxa de retorno sobre o investimento, sendo, portanto, necessário especificar as preferências como uma relação paralela entre a taxa de crescimento do consumo e a taxa marginal de substituição intertemporal.

O autor pressupôs nesse modelo que a condição de otimização intertemporal seja implícita para o consumidor e confrontada com uma taxa de juros fixa; os consumidores são dotados de quantidades fixas de trabalho e capital humano, que são fornecidos inelasticamente; os consumidores têm empresas produtoras de bens duráveis existentes, e a receita líquida dessas empresas é paga para os consumidores na forma de dividendos. As empresas produtoras de bens finais recebem lucro zero. Assim, para atingir o equilíbrio, neste modelo, os preços e quantidades devem ser tais que:

- (i) os consumidores possam decidir entre poupar e consumir, tendo as taxas de juros como dadas;
- (ii) os detentores de capital humano decidam trabalhar no setor de pesquisa ou no setor manufatureiro, aceitando o estoque de conhecimento, os preços dados pelo modelo e a taxa de salário do setor manufatureiro;
- (iii) os produtores de bens finais possam escolher entre trabalho, capital humano e uma lista de diferenciados bens duráveis, tendo os preços como dados;
- (iv) cada empresa detentora de um design próprio possa fabricar um produto durável e maximizar seus lucros, observando a taxa de juros, a curva de demanda que enfrenta e escolhendo preços capazes de maximizar seus lucros;
- (v) no negócio de produção de um bem durável, os preços por projetos devem ser considerados como dados; e
- (vi) a oferta de cada bem seja igual à sua demanda (ROMER,1990).

A análise do modelo de Romer (1990), de modo similar ao modelo de Solow, considera a mudança tecnológica um incentivo para a acumulação de capital, sendo essa mudança responsável pelo aumento da produção por hora trabalhada, e como em Uzawa (1965), a evolução da tecnologia é determinada pela alocação de recursos no setor de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e no setor de bens finais.

Outros estudos como os Grossman e Helpman (1991) e Aghion e Howitt (1992) investigam os investimentos em P&D como a principal fonte de progresso tecnológico e do crescimento econômico. No modelo de Romer (1990), as ideias são incorporadas aos bens de capital que, em conjunto com o trabalho, resultam na produção final, e o progresso tecnológico se dá pelos *inputs* na produção. Os modelos "quality ladder" de Grossman e Helpman (1991) e Aghion e Howitt (1992) buscaram melhorar os inputs pela inovação, fixando um número de entradas de insumos no processo produtivo.

Gosmman e Helpman (1991) observaram que os avanços tecnológicos são responsáveis pelo aumento da produtividade dos fatores na fabricação de bens de consumo e intermediários, acarretando maior sofisticação dos bens finais. Devido a isso, a modernização dos produtos eleva o padrão de vida da sociedade.

Com isso, elaboraram um modelo de inovação horizontal, no qual a modernização dos produtos é contínua, com níveis diferenciados de qualidade. Os empreendedores individuais escolherão os produtos que serão destinados ao melhoramento. Estas mudanças acontecem simultaneamente em qualquer intervalo de tempo, mas nem sempre os esforços de pesquisa são bem-sucedidos. O modelo gera uma distribuição de equilíbrio de qualidades de produtos, que evolui ao longo do tempo. Cada produto é único e segue uma progressão estocástica nos níveis de qualidade.

A abordagem feita pelos autores está relacionada com o processo de geração de uma gama cada vez maior de produtos horizontalmente diferenciados. A diferenciação horizontal refere-se a um conjunto fixo de produtos distintos em termos de qualidade, que entram na cesta de consumo de cada indivíduo. Há, ainda, a diferenciação vertical que trata da disponibilidade dos produtos em um número ilimitado de qualidades distintas. Essa dinâmica de diferenciação inerente à qualidade de cada produto irá potencializar o crescimento.

Para a estruturação do modelo, os autores consideraram uma economia com um fluxo contínuo de produtos, os quais podem ser ofertados em diversa qualidade. Cada avanço na qualidade requer maior investimento em P&D.

A função de utilidade dos consumidores é intertemporal e homogênea. Os consumidores buscam maximizar sua utilidade sujeita a uma restrição orçamentária intertemporal. A maximização da utilidade dos consumidores acontece em duas fases: pela atribuição de um fluxo de despesa considerando os níveis de preços e pela seleção de uma única qualidade para cada produto.

No que tange à produção, os autores consideraram apenas um fator de produção como principal, o trabalho. Para a produção de uma unidade de produto, independentemente da qualidade, é necessária uma unidade de trabalho.

As empresas que atuam no mercado produzindo um bem de mesma qualidade irão obter lucro zero. Em contrapartida, um produtor poderá desfrutar de uma vantagem de qualidade sobre os rivais de seu mercado. As hipóteses sobre a tecnologia de desenvolvimento de produtos e a natureza dos direitos de propriedade intelectual garantem que cada indústria terá um líder de qualidade única.

Para produzir uma mercadoria, é necessário um croqui, cuja elaboração tem um alto custo. Grossman e Helpman (1991) assumiram no modelo que as patentes são uma forma de proteger uma inovação e que a imitação tem um alto custo.

As empresas são livres para inovar seus produtos estando apenas atentas aos novos lançamentos. Podem empenhar-se na investigação mesmo que as leis de patentes ou a falta de conhecimento completo acerca do melhor método de produção sejam um empecilho para a fabricação dos produtos de última geração, disponíveis no mercado. A recompensa pelo sucesso de uma pesquisa é um fluxo de lucros que durará até o próximo sucesso alcançado no mesmo mercado.

Os autores definiram a taxa de crescimento como a taxa de aumento do consumo ajustado pela qualidade dos produtos. No equilíbrio, a mesma taxa de P&D é aplicada para todos os produtos. Contudo, esforços de pesquisa se expandem em decorrência de investimentos e incentivos de mercado. Assim, o aumento das investigações será consequência do aumento da rentabilidade, bem como do crescimento dos retornos de escala da economia.

No modelo apresentado por Aghion e Howitt (1992), o crescimento é gerado por uma sequência aleatória de inovações e melhoria de qualidade, que resultam das atividades de P&D. Assim, este é um modelo vertical de inovações cuja propriedade é tornar a tecnologia anterior ultrapassada, diferentemente do modelo de Grossman e Helpman (1991), cuja diferenciação é horizontal.

Da mesma forma que no modelo de Romer (1986), buscou-se endogeneizar o progresso tecnológico. Com isso, o modelo de crescimento de Aghion e Howitt (1992) é caracterizado como endógeno no qual as inovações verticais, geradas por um setor de pesquisa competitiva, constituem a fonte básica de crescimento.

O equilíbrio é determinado por uma expressão de diferenças. De acordo com essa expressão, a quantidade de pesquisa em qualquer período depende da quantidade esperada de pesquisa para o próximo período, de modo que a destruição criativa é a fonte para a relação intertemporal estabelecida. Ou seja, a perspectiva de pesquisas futuras ameaça dirimir toda a renda gerada pela pesquisa no tempo presente, arrefecendo-a.

O modelo básico proposto pelos autores pressupõe que existem três produtos negociáveis: trabalho, bens de consumo e bens intermediários. As preferências dos indivíduos são idênticas e intertemporais. A utilidade marginal do consumo e a taxa de juros são constantes.

O trabalho é caracterizado como não qualificado, e pode ser usado para a fabricação de bens de consumo: qualificado, quando utilizado no setor de pesquisa ou no setor de fabricação dos bens intermediários; e especializado, quando usado no setor de investigação. Cada indivíduo pode ofertar uma unidade de mão de obra.

O produto total do setor de bens de consumo é determinado pela quantidade de insumos intermediários utilizados e pela sua produtividade. O bem intermediário, por sua vez, é produzido utilizando somente mão de obra qualificada e a tecnologia disponível.

Os pesquisadores produzem uma sequência aleatória de inovações que podem estar disponíveis a qualquer instante. Esse fluxo de inovação depende somente da pesquisa atual e independe de pesquisas feitas no passado, sendo a mão de obra qualificada fator preponderante para o surgimento das inovações.

Quando a economia não aloca mão de obra qualificada para pesquisa, ela deixa de experimentar o crescimento, uma vez que inexistirão inovações. Cada inovação consiste da invenção de um novo bem intermediário, que torna mais eficiente a produção do bem de consumo.

Um inovador bem-sucedido obtém uma patente que pode ser usada para monopolizar o setor intermediário. A patente é assumida para durar para sempre. No entanto, o monopólio dura apenas até a próxima inovação. Todos os mercados são perfeitamente competitivos, com exceção do mercado de bens intermediários.

O objetivo do monopolista de bens intermediário é maximizar o valor presente esperado dos lucros durante no intervalo de tempo atual. Quando o intervalo termina, os lucros também terminam. A única incerteza, portanto, diz respeito à dimensão do intervalo de tempo entre uma inovação e outra.

Dentro de cada intervalo de tempo, o aumento gradual da produtividade seria induzido pela contratação de maior quantidade de trabalhadores qualificados para o setor de pesquisa, até surgir a próxima inovação.

Para saltar para a próxima inovação e seguir um caminho gradual, o fluxo do produto intermediário produzido pelo monopolista durante o intervalo de tempo deve ser igual à contratação de mão de obra qualificada na fabricação. A curva de demanda inversa enfrentada por um monopolista é dada pelo preço em relação à quantidade dos bens de consumo. A maximização dos retornos do monopolista depende do peso dos salários dos pesquisadores, sendo sua receita marginal negativamente inclinada.

Independentemente das inovações feitas por outras empresas, cada empresa empregará seus insumos em pesquisa com o objetivo de maximizar o fluxo de lucro esperado da pesquisa. Caso o retorno da pesquisa feita pela própria firma seja constante, a pesquisa será feita por outra empresa designada pelo monopolista. A razão pela qual o monopolista resolve mudar as pesquisas para outra empresa é o fato de os custos com a pesquisa serem menores quando ela for “terceirizada”. E independentemente de a empresa contratada para a realização da pesquisa ter lucros, a empresa contratante terá acesso à patente gerada no processo contratado.

Há nesse processo a importante influência do *spillover* intertemporal. Uma inovação sempre aumentará a produtividade do fator. O produtor de uma inovação recebe alguns retornos gerados pelo ganho de produtividade durante um intervalo de tempo. Esses retornos são captados por outros inovadores, que constroem seus produtos sobre a base da presente inovação, mas sem compensar o presente inovador. Assim, cada inovação é um ato de criação destinado à captura de rendas monopolistas, mas que destrói as rendas de monopólio que motivaram a criação anterior, sendo assim incorporada ao modelo a noção de "destruição criativa" de Schumpeter.

Da mesma forma que seus precursores, buscando avançar nas análises do crescimento econômico, Xepapadeas (2005) retoma o modelo de Ramsey, que integrou o planejador social com a finalidade de maximizar o bem-estar econômico pelo controle do consumo e da poupança, e introduz a dimensão ambiental admitindo que as utilidades das famílias representam as preferências entre o consumo por pessoa e o estoque total de poluição.

Nesse modelo, as decisões de consumo-investimento são derivadas no contexto descentralizado de maximização intertemporal, em que as famílias maximizam a utilidade e as empresas maximizam seus lucros em um mercado perfeitamente

competitivo. Nessa formulação, considera-se que tanto o consumo quanto a emissão de GEE determinam a satisfação dos indivíduos. Assume-se que a função de utilidade seja crescente e côncava no consumo. Assume-se, ainda, que tanto a população quanto a tecnologia sejam estáveis, isto é,  $n = g = 0$ , e o nível de emissões como fixo. Com isso, a maximização da utilidade é dada por:

$$\max_{\{c(t)\}} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(C, P) dt$$

$$\text{s.a. } v \int_0^{\infty} e^{-R(t)} c(t) dt = k(0) + \int_0^{\infty} e^{-R(t)} w(t) dt$$

em que  $\rho$  é a taxa de desconto da utilidade;  $k(0)$ , o capital inicial;  $e^{-R(t)}$ , a taxa de desconto apropriada, obtida por  $R(t) = \int_{\tau=0}^t r(\tau) d\tau$ , com  $r(\tau)$  representando a taxa de juros real, no tempo  $\tau$ .

O consumo ótimo é assim determinado pela relação entre consumir e poluir, no caso desse estudo, emitir CO<sub>2</sub>, ponderada por uma taxa de desconto intertemporal.

A maximização do lucro, por sua vez, implica diferença entre a função de produção neoclássica padrão, o consumo e a taxa de depreciação do capital. As taxas de crescimento desta economia obedecem ao sistema dinâmico, em que tudo é medido em unidades físicas.

No estado estacionário, quando se atinge o ótimo tanto para o consumo e como para o investimento, em uma economia com as mesmas características que o modelo de Ramsey-Cass-Koopmans padrão, o estoque de poluição é determinado unicamente pelo equilíbrio do sistema econômico.

O estado estacionário é, no entanto, afetado se for considerado o problema do chamado planejador social. Neste caso, a maximização da utilidade pode ser considerada um indicador de bem-estar social. O planejador social procura escolher uma forma de consumo no tempo para maximizar a utilidade, sujeita apenas a restrições tecnológicas. Sabe-se que, na ausência de efeitos externos, há uma equivalência entre o resultado do problema do planejador social e o resultado do equilíbrio competitivo (BECKER; BOYD, 1997). Este princípio de equivalência expressa a dualidade entre mercados

perfeitos e planejamento ideal em problemas de alocação de recursos. Na presença de externalidade ambiental, esta equivalência deixa de existir.

Edenhofer *et al.* (2005), por sua vez, elaboraram um modelo que integra progresso tecnológico e questões ambientais relacionadas às mudanças climáticas, o Modelo de Investimento e Desenvolvimento Tecnológico-MIND, que foi estruturado com o objetivo de estudar os custos de proteção ao clima em termos de perda de bem-estar e como a mudança tecnológica endógena pode influenciar na redução desses custos e alcançar os objetivos de mitigação sem que haja impactos negativos no bem-estar.

O modelo MIND incorpora mudança tecnológica endógena em relação a três aspectos: os setores de P & D em separado para eficiência no trabalho e na energia; através da diferenciação do estoque de capital físico no setor da energia, que permite estudar a dinâmica interna do setor; e segundo uma comparação das opções de eficiência energética, fontes de energia renováveis, e Captura e Sequestro de Carbono (CCS), sendo esse um aspecto que não havia sido tratado por outros modelos de avaliação integrada.

O objetivo do modelo é maximizar uma função intertemporal de bem-estar, cuja utilidade é determinada pelo consumo per capita sob desconto de uma taxa de preferência pura. Utiliza como variáveis de controle investimentos feitos em capital físico, no setor de energia renovável, na extração de recursos fósseis, no setor de energia fóssil e em P&D para melhorar a produtividade do trabalho e da energia.

Edenhofer *et al.* (2005) utilizam, na construção do modelo, uma função de produção macroeconômica do tipo CES com elasticidade de substituição constante, composta pelos fatores trabalho, capital e energia, sob a hipótese de que todos os fatores sejam essenciais na produção, sendo assim, esses fatores não podem ser totalmente substituídos.

O sistema energético, no modelo MIND, é composto por três fontes de energia: fóssil (carvão, petróleo e gás), renováveis (eólica, biomassa, solar e geotérmica) e de energia não fóssil tradicional (energia nuclear, biomassa tradicional e grandes hidrelétricas). O *learning by doing* é inserido no sistema energético no sentido de aumentar a produtividade do capital no setor. Ademais, calcula os retornos sociais do

setor de P&D, tratando os *spillovers* intertemporais como um fenômeno natural que ocorre via investimento em P&D.

Para verificar as emissões, o autor inclui as emissões antropogênicas de carbono, que estão diretamente ligadas à combustão de combustíveis no setor de energia fóssil, sendo esses gases responsáveis por uma mudança na temperatura média. Além disso, insere no modelo gases de efeito estufa que não sejam CO<sub>2</sub> emitidos pela radioatividade, porém esses são dados exógenos.

O MIND é, portanto, um modelo projetado para avaliar o crescimento econômico mensurado em termos de perda do bem-estar, considerando a integração da mudança tecnológica endógena e as questões climáticas nas análises. Contudo, o modelo trata o mundo como uma unidade, sem a diferenciação regional, uma limitação do modelo que impede a realização de análises inter-regionais dos efeitos do comércio.

Leimbach e Baumstark (2010) apresentaram o modelo MIND-RS, uma evolução do modelo uniregional de Avaliação Integrada de Investimento e Desenvolvimento-MIND, desenvolvido por Edenhofer *et al.* (2005). Este modelo busca integrar comércio bilateral dinâmico, em cenários de políticas climáticas, considerando os *spillovers* tecnológicos *embodied* em um mundo globalizado, superando assim a limitação apresentada pelo MIND.

O modelo MIND-RS adota do MIND a estrutura do sistema de energia e investimento intertemporal dinâmico, incluindo os investimentos em P&D, investimento intertemporal dinâmico, incluindo os investimentos em P&D e o *learn by doing*, que representam uma importante função de mudança tecnológica endógena. Ao contrário do MIND, o MIND-RS separa o setor industrial agregado em setor de bens de consumo / serviço do setor de bens de investimento. O fato de o MIND-RS tratar o comércio bilateral e os *spillovers* tecnológicos como variáveis endógenas torna-o distinto de outros modelos de otimização como o RICE, usado por Nordhaus e Yang (1996) e Nordhaus e Byer (2000), o MERGE, utilizado por Manne *et al.* (1995) e Kypreos e Bahn (2003), e o WITCH, empregado por Bosetti *et al.* (2006), de modo que seus resultados são mais próximos da realidade.

O MIND-RS é um modelo de crescimento econômico cuja estrutura macroeconômica é apresentada na Figura 1. Nesse modelo, um planejador social tem

como objetivo maximizar o bem-estar econômico da sociedade no longo prazo, através das variáveis de controle, considerando tanto as mudanças no clima quanto as mudanças tecnológicas endógenas.

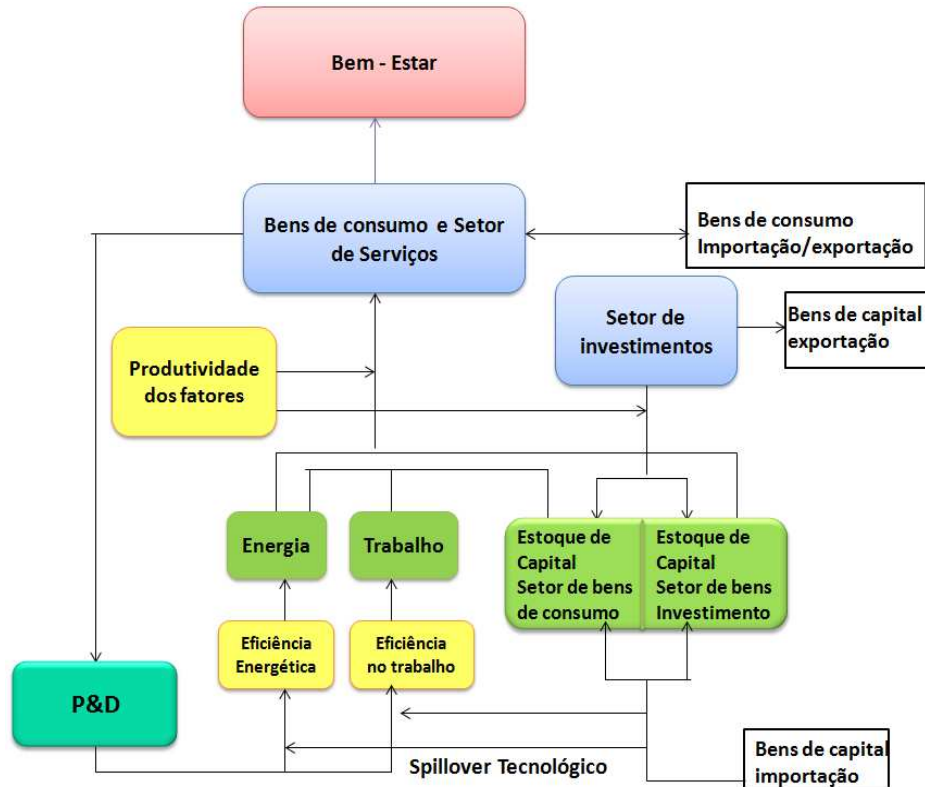


Figura 1 - Estrutura macroeconômica do modelo MIND-RS.  
 Fonte: Leimbach e Baumstark (2010).

Dessa forma, em um cenário de mudanças climáticas em que as regiões estão comercialmente interligadas, os países desenvolvidos, que apresentam eficiência energética e em trabalho, exportam bens de capital nos quais está incorporada tecnologia. Esses bens de capital serão importados pelos países em desenvolvimento, sendo uma parte alocada nos setores de bens de consumo e serviços e setor de bens de investimentos, acarretando aumento no estoque de capital nesses setores, e outra parte destinada ao setor de pesquisa (P&D), representando um importante recurso da mudança tecnológica endógena. Em conjunto com a importação dos bens de capital, há a importação indireta da tecnologia desenvolvida para produção desses bens. Esse transbordamento tecnológico aumenta a produtividade dos fatores, que influenciará tanto no produto quanto no bem-estar econômico.

Por fim, após a descrição das diferentes teorias de crescimento, o Quadro 1 mostra uma síntese de suas principais características.

Quadro 1 – Modelos teóricos e empíricos de crescimento econômico e seus avanços

Modelos de Crescimento Econômico	Tipologia	Evolução
Harrod - Domar	Crescimento exógeno sem externalidades	Consideração das expectativas dos empresários
Solow	Crescimento exógeno com externalidades	Progresso tecnológico exógeno responsável pelo incremento do capital físico
Ramsey - Cass- Koopmans	Crescimento econômico endógeno sem spillovers, sem externalidades e uniregional	Inserção do planejador social com foco na maximização do bem-estar. Poupança e progresso tecnológico como fatores endógenos.
Arrow- Romer	Crescimento econômico endógeno com spillovers, sem externalidades e uniregional	Introduz o conceito do <i>learningbydoing</i> .

Quadro 1 – Modelos teóricos e empíricos de crescimento econômico e seus avanços

(conclusão)

Modelos de Crescimento Econômico	Tipologia	Evolução
Uzawa- Lucas	Crescimento econômico endógeno com spillovers, com externalidades e multiregional.	Considera o aperfeiçoamento do capital como o indutor do crescimento, e expõe a possibilidade de haver efeitos transbordamentos (spillovers) de capital humano entre os diferentes países.
Grossman e Helpman, Aghion e Howitt,	Crescimento econômico endógeno com spillovers, com externalidades e multiregional.	Tratam o progresso tecnológico como o principal indutor do crescimento e insere o conceito de destruição criativa de Schumpeter.
Xepapadeas	Crescimento e meio ambiente	Introduz ao modelo de Ramsey que considera o planejador social, questões ambientais relacionadas a poluição
Edenhofer, et. al	Crescimento econômico endógeno, uniregional, com spillovers e políticas climáticas	Relaciona em um modelo de investimento e desenvolvimento integrado os spillovers <i>desembodied</i> e as questões relacionadas ao clima.
Leimbach e Baumstark	Crescimento econômico endógeno, multirregional, com spillovers e políticas climáticas	Considera o comércio internacional na relação entre os spillovers <i>embodied</i> e as questões das mudanças climáticas.

Fonte: Elaboração própria.

O modelo de Ramsey, desenvolvido por Xepapadeas (2005), buscou atualizar as análises de bem-estar, inserindo a questão ambiental na pressuposição de que a satisfação das famílias é determinada pelo consumo e pelo estoque de poluição, no caso desse estudo, pelos níveis de emissão. Os modelos de Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) e Leimbach e Baumstark (2010) também configuram iniciativas recentes de integrar questões relacionadas às mudanças climáticas nas análises de bem-estar.

### 3 METODOLOGIA

Para responder aos objetivos desse estudo, foi utilizado um modelo adaptado do modelo MIND-RS utilizado nos trabalhos de Leimbach e Baumstark (2010) e Sousa e Fernandes (2014). Inicialmente foi feita a modelagem de um sistema de equações dinâmico com estrutura complexa e com equações não lineares. Em seguida, empregou-se a simulação, que permite verificar o comportamento das variáveis em distintos cenários para as quatro regiões: EUA e Europa, representando os países desenvolvidos; e América Latina e China, representando os países em desenvolvimento.

#### 3.1 Linhas Básicas do Modelo

O modelo foi estruturado com o objetivo de verificar os impactos das políticas climáticas de redução da emissão de gases do efeito estufa no crescimento econômico de quatro regiões: duas desenvolvidas, Estados Unidos e Europa, e duas em desenvolvimento, China e América Latina. Para tanto, busca-se otimizar uma função de bem-estar para cada região analisada, cuja utilidade é determinada pelo consumo per capita sob desconto de uma taxa de preferência pura. Utiliza-se uma função de produção macroeconômica do tipo CES, que integra três fatores de produção - capital, trabalho e energia - e permite a substitutibilidade entre eles. Essa substitutibilidade é parcial, tendo em vista a importância dos fatores para o processo produtivo.

Os países desenvolvidos, Estados Unidos e Europa, são diferenciados pelos níveis de produtividade do trabalho e eficiência energética, respectivamente. Com isso, as exportações de bens de capital contribuem relativamente mais para o crescimento da produtividade do trabalho e para o crescimento da eficiência energética das regiões em desenvolvimento importadoras desses bens. Essas regiões diferem em seu nível de renda inicial e na dinâmica de crescimento da economia, supondo que economias mais pobres cresçam mais rapidamente. Pressupõe-se ainda que os *spillovers embodied* ocorram da região desenvolvida para a região em desenvolvimento, ou seja, as regiões

desenvolvidas exportam bens de capital, que são importados pelos países em desenvolvimento, e que os acordos climáticos podem intensificar ou restringir a transferência de *know-how* tecnológico, responsável pelo aumento na produtividade dos fatores. Considera-se no modelo que tanto o comércio bilateral quanto os *spillovers* tecnológicos sejam endógenos ao modelo.

Definiu-se, então, a China como a região de crescimento rápido e a América Latina como principal supridora de recursos energéticos. Em relação às questões energéticas, no cenário de políticas climáticas assume-se que para cada região haja uma permissão de emissão e para cada unidade de recurso fóssil convertido dentro do setor de energia final seja necessária uma permissão de emissão. Assume-se, por fim, que a disponibilidade interna de recurso fóssil deva ser menor ou igual ao saldo de permissão de emissões.

O modelo reflete, portanto, um problema de otimização intertemporal com uma função objetivo para cada região. No sentido de encontrar o ótimo de Pareto, o planejador social busca controlar o sistema considerando os investimentos, os percentuais da produção destinados ao comércio bilateral entre as regiões, bem como os percentuais de energia utilizados no processo produtivo.

Em face da complexidade inerente aos fenômenos naturais, especialmente em um cenário de mudanças climáticas, a representação do sistema real envolve grande complexidade matemática. Com isso, a estruturação das projeções propostas neste estudo só se faz possível pela simulação, que permite verificar o comportamento dinâmico e não linear das variáveis. Para a simulação, utilizou-se o *software* Matlab/Simulink 2012, conforme preconizado por Sousa e Fernandes (2014).

A simulação é o processo de construção de um sistema real em um ambiente controlado, em que podem ser feitos experimentos pela construção de cenários, em um longo período de tempo, com o objetivo de entender o comportamento do sistema ou avaliar estratégias de operação. Seus resultados auxiliam na tomada de decisão, com o conhecimento prévio de sua repercussão, uma vez que mostram projeções futuras diante da problemática presente (COSTA, 2002). O Quadro 2 mostra as variáveis e os parâmetros utilizados no modelo MIND – RS.

Quadro 2 – Variáveis e Parâmetros utilizados no modelo MIND - RS

Símbolo	Parâmetro	Europa	EUA	China	América Latina	Fonte
$\sigma$	Taxa de desconto intertemporal	0.01	0.01	0.01	0.01	Endenhofer et al. (2005)
$\delta$	Taxa de depreciação do capital	0.05	0.05	0.05	0.05	Endenhofer et al. (2005)
$\rho(i)$	Elasticidade de substituição no setor de bens de consumo e investimento	0.4	0.4	0.3	0.3	Leimbach e Baumstark (2010)
$\rho_f$	Elasticidade de substituição no setor de energia fóssil	0.3	0.3	0.3	0.3	Leimbach e Baumstark (2010)
$\xi_m$	Peso do fator $m$ na função de produção agregada ok	$\xi_L=0.66$ $\xi_k=0.30$	$\xi_L=0.66$ $\xi_k=0.30$	$\xi_L=0.66$ $\xi_k=0.30$	$\xi_L=0.66$ $\xi_k=0.30$	Endenhofer et al. (2005)
$\xi_{mf}$	Peso do fator $m$ no setor de energia fóssil	0.04	0.04	0.04	0.04	Leimbach e Baumstark (2010)
$\Phi_j(i)$	Produtividade Total dos Fatores no setor $j$ (I e C) na região $i$	0.34	0.45	0.42	0.33	Leimbach e Baumstark (2010)
$\Phi_f(i)$	Produtividade Total dos Fatores no setor de energia fóssil na região $i$	3.12	3.82	13.0	3.55	Leimbach e Baumstark (2010)
$D(i)$	Eficiência da energia primária da região $i$	0.5	0.5	0.5	0.5	<i>remaind</i>

Quadro 2 – Variáveis e Parâmetros utilizados no modelo MIND - RS

(continua)

Símbolo	Parâmetro	Europa	EUA	China	América Latina	Fonte
$D(i)$	Eficiência da energia primária da região i	0.5	0.5	0.5	0.5	<i>remaind</i>
$\zeta_m(i)$	Produtividade dos investimentos em P&D na melhoria da eficiência do fator $m$ na região k	L = 0, 024 E = 0,036	L= 0,024 E= 0,036	L=0, 024 E=0,036	L= 0, 024 E = 0,036	Endenhofer et al. (2005)
$\alpha_m$	Parâmetro de eficiência que aumenta a importância da P&D	L = 0.05 E = 0.01	L = 0.05 E = 0.01	L = 0.05 E = 0.01	L = 0.05 E = 0.01	Endenhofer et al. (2005)
$\psi$	Elasticidade do <i>spillovers</i> – corresponde a um valor < 1	0.6	0.6	0.6	0.6	Leimbach e Baumstark (2010)
$\Omega_m$	Intensidade do <i>spillover</i>	0.15	0.15	0.15	0.15	Leimbach e Baumstark (2010)
$\kappa_{max}(i, t)$	Máxima produtividade do setor de extração	3.22	3.22	3.22	3.22	Endenhofer et al. (2005)
$k(i, t)$	Coeficiente de conversão na região i no tempo t	0,5	0,5	0,5	0,5	<i>ad hoc</i>
$\nu(i)$	Inverso da taxa de aprendizagem no setor de extração de recursos ok	1/0.15	1/0.13	1/0.1	1/0.04	Leimbach e Baumstark (2010)
$\mu$	Fator de amortecimento da aprendizagem	0,4	0,4	0,4	0,4	Endenhofer et al. (2005)

Quadro 2 – Variáveis e Parâmetros utilizados no modelo MIND - RS

(continua)

Símbolo	Parâmetro	Europa	EUA	China	América Latina	Fonte
$\chi_1(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	113	113	113	113	Endenhofer et al. (2005)
$\chi_2(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	700	700	700	700	Endenhofer et al. (2005)
$\chi_3(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	3500	3500	3500	3500	Endenhofer et al. (2005)
$\chi_4(i)$	Parâmetro da curva de custo marginal de extração na região i	4	4	4	4	Endenhofer et al. (2005)
$l(t)$	Fator de carga dos <i>vintages</i> da produção de energia renovável ok	0,5	0,5	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)	Lag1 = 1 Lag2=0,85 Lag3 = 0,7 Lag4 = 0,5	Lag1 = 1 Lag2=0,85 Lag3 = 0,7 Lag4 = 0,5	Lag1 = 1 Lag2=0,85 Lag3 = 0,7 Lag4 = 0,5	Lag1 = 1 Lag2=0,85 Lag3= 0,7 Lag4 = 0,5	Endenhofer et al. (2005)
$fC(i)$	Custo mínimo do investimento ok	500	500	500	500	Endenhofer et al.(2005)
$\gamma(i)$	Taxa de aprendizagem	0.0277	0.0181	0.0002	0.0041	Remaind
<b>Variável/Parâmetro de controle</b>						
$rd_L(i,t)$	Investimentos em P&D para a eficiência do trabalho na região i no tempo t					

Quadro 2 – Variáveis e Parâmetros utilizados no modelo MIND - RS

(continua)

<b>Variável/Parâmetro de controle</b>	
$rd_E(i,t)$	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
<b>Variável de Estado</b>	
$K_j(i,t)$	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
<b>Parâmetros percentuais</b>	
$sD_c(i)$	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
$sD_{I_j}(i)$	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 consumo alocado no mercado interno
$sP(i)$	Percentual do total de permissões de emissões alocado internamente
<b>Demais variáveis</b>	
$W$	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
$YC(i,t)$	Produto do setor de bens de consumo na região i no tempo t

Quadro 2 – Variáveis e Parâmetros utilizados no modelo MIND - RS

(Conclusão)

<b>Demais variáveis</b>	
$YI(i, t)$	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
$DI(i, t)$	Disponibilidade interna de bens de investimento na região i no tempo t
$DQ(i, t)$	Disponibilidade interna de recursos fósseis
$CrdL(i, t)$	Bens de consumo alocados no setor de P&D do trabalho
$CrdE(i, t)$	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
$Inf(i, t)$	Investimento (capital) em outros setores energéticos na região i no tempo t (exógeno)
$Ef(i, t)$	Energia fóssil na região i no tempo t
$Eren(i, t)$	Energia renovável na região i no tempo t
$Enf(i, t)$	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 <sub>2</sub> no tempo t
$LU(t)$	Emissões de CO <sub>2</sub> oriundas da mudança no uso do solo no tempo t
$P(i, t)$	Permissão de emissões na região i no tempo t (exógena)

Fonte: Adaptado de Leimbach, et. al, 2010.

### 3.2 Equações do Modelo

O modelo analítico desenvolvido nesse estudo tem por base o Modelo de Investimento e Desenvolvimento Multirregional- MIND-RS, cujo objetivo principal é maximizar o bem-estar,  $W$ , dos países desenvolvidos (EUA e Europa) e dos países em desenvolvimento (China e América Latina).

Da mesma forma que outros modelos de avaliação integrada a função a ser otimizada é a de bem-estar agregada intertemporal:

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

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

### 3.2.1 Módulo Produção

Para tanto, foi estimado o produto agregado das regiões  $Y_j$  dado pela soma do produto total dos setores de bens de capital e bens de consumo, obtidos por meio de uma função de produção CES:

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

em que  $\rho$  é a elasticidade de substituição;  $\xi_m$ , o parâmetro que representa o peso dos insumos no produto total;  $\varphi$ , a produtividade total dos fatores;  $K$ , o estoque de capital;  $A_L$ , a produtividade ou eficiência do trabalho;  $A_E$ , a produtividade ou eficiência energética; e  $\theta_{m,j}$ , a parcela dos fatores de produção (participação do fator  $m$  no setor  $j$ ), o qual será utilizado como parâmetro de otimização, sendo obtido da seguinte forma:

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

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

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

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

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

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

O estoque de capital da economia é distribuído para os setores de modo que parte é destinada ao próprio setor de produção de bens de capital, parte para o setor de bens de consumo, parte para o setor de extração, e por fim, parte vai para setor de transformação de energia fóssil, seguindo a expressão:

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

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

Da parcela de capital distribuído, têm-se as quantidades destinadas aos setores de capital ( $IK$ ), bens de consumo ( $IC$ ), energia fóssil ( $If$ ), e extração ( $IQ$ ) conforme as seguintes expressões:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

em que  $\zeta_m(i)$  é a produtividade dos investimentos em P&D, que melhora a eficiência do fator  $m$ ;  $\alpha_m$ , um parâmetro de eficiência que aumenta a importância do setor de P&D na produtividade dos fatores;  $YC$ , o produto no setor de bens de consumo; e  $YI$ , o produto no setor de bens investimento (ou de capital).

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

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

$$\left. 0 : A_m(i, t) > A_m(r, t) \right.$$

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

### 3.2.2 Módulo controle do capital

Foi introduzido um módulo de controle do capital com a finalidade de obter os parâmetros percentuais com base das seguintes expressões:

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

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

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

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

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

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

Da mesma forma foi inserido um modulo para controle do consumo no qual tem-se as seguintes expressões:

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

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

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

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

### 3.2.4 Módulo energia

A produção no setor de energia final é constituída pelas energias fóssil, renovável e energia não fóssil representado pela seguinte expressão:

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

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

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

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

em que  $\Phi_f$  é a produtividade total dos fatores do setor de energia fóssil da região  $i$ ;  $\xi_k^f$ , o peso do fator capital;  $K_f(i, t)$ , o estoque de capital do setor de energia fóssil na região  $i$  no tempo  $t$ ;  $\rho_f$ , a elasticidade de substituição;  $\xi_{PE}^f$ , o peso do fator energia primária fóssil;  $D(i)$ , a eficiência do fator energia primária fóssil na região  $i$ ; e  $PE(i)$ , o fator de energia

primária fóssil para a região  $i$  no tempo  $t$ , sendo este determinado pela relação entre,  $k$  (i,t) o fator de conversão de carbono em joule e  $Q(i, t)$  a extração de recurso fóssil:

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

A capacidade de extração de recurso fóssil é obtida a partir da seguinte expressão:

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

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

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

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

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

Os custos marginais de extração são derivados pela curva de Rogner<sup>9</sup>, expresso da seguinte forma:

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

em que  $X_1, X_2$  e  $X_3$  são parâmetros da curva de custo marginal de extração<sup>10</sup> da região  $i$ ;  $X_4$ , um parâmetro que determina a aceleração não linear da curva de extração;  $cQ$ , a

<sup>9</sup> A curva de Rogner descreve os custos de extração em relação à quantidade extraída, sem a distinção entre recursos e reservas. A medida que forem extraídas unidades do recurso fóssil acontecerá seu esgotamento e maiores serão os custos para extração, em contrapartida a descoberta de novos recursos (possibilidade de substituição) pode reduzir o eventual esgotamento dos recursos outrora existentes (ROGNER, 1997).

<sup>10</sup> A fonte para obtenção dos parâmetros estão discriminados no Quadro 2.

quantidade acumulada de extração dada pela expressão (31) com  $z$  representando períodos de tempo,

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

A disponibilidade interna de recurso fóssil, por sua vez, é obtida pela seguinte expressão:

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

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

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

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

O setor de energia renovável tem sua produção final com base em *vintages capital*<sup>11</sup>( $V$ ) ativos e a carga de fatores ( $l$ ) acumulados no passado, conforme a expressão:

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

em que  $\tau$  são períodos de tempo; e  $w$ , um fator de ponderação (peso) que representa a parte ainda ativa dos *vintages* da produção de energia renovável. Cada *vintage capital*<sup>12</sup> é colocado em função dos investimentos em energia renovável.

---

<sup>11</sup> Modelos de *vintage capital* são caracterizados por taxas de depreciação não exponenciais e podem incorporar *learning-by-doing*, ou seja, se em diferentes períodos, as máquinas e equipamentos, de uma economia, pertencentes a gerações separadas possuírem distintas taxas de depreciação tem-se, nesse caso o *vintage capital* (BENHABIB e RUSTICHINI, 1991).

<sup>12</sup>Conforme demonstrado pela equação (10) no setor de energia renovável.

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

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

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

Da mesma forma que no setor de extração, a variação tecnológica endógena tem por base na acumulação de capacidade instalada  $cN$ , expressa por:

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

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

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

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

O setor de energia não fóssil fornece energia final oriunda de energia nuclear, hidráulica e fontes de biomassa tradicionais, ofertada exogenamente.

### 3.2.5 Módulo Emissões

As emissões antropogênicas relacionadas ao uso do solo e a queima de combustíveis fósseis é obtida pela seguinte expressão:

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

em que  $Q(i, t)$  é a emissão gerada pela queima de combustíveis fósseis, e  $LU$ , a emissão proveniente da mudança no uso do solo, obtido da seguinte forma:

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

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

### 3.2.6 Módulo controle de Energia

O nível de emissões foi mensurado a seguinte expressão:

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

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

O comércio da permissão das emissões é dado pela seguinte expressão:

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

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

O nível de emissões de alguns países é menor do que lhe é permitido, além disso os países podem negociar as permissões, podendo permanecer com um saldo de permissões de emissões obtido pela seguinte expressão:

$$SP(i, t) = P(i, t) - XP(i, t) + \sum_r XP(r, i, t) - DQ + SP_{t-1} \quad (42)$$

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

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

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

em que  $T$  é o teto permitido para emissão,  $P$  são as permissões de emissões definidas exogenamente,  $XP(i, t)$  as exportações das permissões de emissões do país,  $XP(r, i, t)$  as importações de permissões de emissões.

As expressões acima formam um problema de otimização multirregional com uma única função objetivo para cada região. Cada região otimiza seu próprio bem-estar, segundo uma determinada estrutura de comércio, com a versão do modelo de planejador social. As variáveis de investimento e de comércio representam variáveis de controle. As parcelas da produção nacional destinadas aos fluxos de comércio e de investimentos foram ajustados por meio dos parâmetros de controle para encontrar um resultado Pareto-ótimo, que oferece benefícios comerciais para todas as regiões.

### 3.3 Calibração e Otimização do Modelo

A calibração consiste na inserção de dados no modelo, de modo que os resultados obtidos se aproximem da realidade (KYDLAND; PRESCOTT, 1996). Para que os resultados, para eventos nunca antes ocorridos, transmitam confiabilidade, o modelo estruturado deve ser capaz de reproduzir fatos estilizados de determinados fenômenos, ou acontecimentos econômicos, com base nos valores iniciais dos parâmetros e variáveis escolhidas. A Tabela 1 apresenta os valores iniciais das variáveis usadas para alimentar o modelo.

Tabela 1: Valores iniciais das variáveis utilizadas no modelo MIND-RS para o ano 2000

Variáveis	Europa	EUA	China	América Latina	Fonte
PIB (em trilhões de US\$)	9.26	10	1.19	1.52	World Bank
População (em bilhões de habitantes)	0.884	0.28	1.26	0.514	World Bank

Tabela 1: Valores iniciais das variáveis utilizadas no modelo MIND-RS para o ano 2000 (conclusão)

Variáveis	Europa	EUA	China	América Latina	Fonte
PIB (em trilhões de US\$)	9.26	10	1.19	1.52	World Bank
População (em bilhões de habitantes)	0.884	0.28	1.26	0.514	World Bank
Estoque de capital industrial (em trilhões de US\$ )	0.367	0.335	0.04459	0.0378	World Bank
Estoque de capital no setor de consumo (ad hoc)	0.46	0.87	0.054	0.064	ad hoc
Estoque de capital no setor de energia fóssil (em trilhões de US\$ )	1.4	1.6	0.27	2.8	World Bank
Estoque de capital no setor de extração (em trilhões de US\$)	0.95	1.67	1.13	0.87	World Bank
Exportações bens de consumo (em trilhões de US\$)	0.03037	0.01103	0.02310	0.022700	World Bank
Exportações de recursos do setor de extração (em trilhões de toneladas)	0.02506	0.00548	0.002089	0.041784	Comtrade
Produtividade total do fator (setor industrial)	0.34	0.45	0.42	0.33	Leimbach (2010)
Eficiência do trabalho	0.5	0.8	0.02	0.85	Leimbach (2010)
Eficiência Energética	5.24	3.45	0.64	2.55	Leimbach (2010)
Produtividade total do fator (setor de energia fóssil)	3.12	3.82	13.0	3.55	Leimbach (2010)

Nota: ad hoc é um termo que representa o uso de um valor, que melhor se adequa as necessidades da modelagem, obtido a partir do método de tentativa e erro.

A construção do modelo requer que sejam pré-definidos um conjunto de valores para os parâmetros, bem como valores iniciais para as variáveis, que assegurem a representatividade do modelo. Tais valores devem ser fundamentados em uma teoria, evidências empíricas e, ou, fatos estilizados. Com relação aos parâmetros de controle, que definem os percentuais da produção alocados para o comércio, investimentos e para o uso de recursos enérgicos, os mesmos foram obtidos de forma exógena para

maximização da função de bem-estar social de cada região. A função objetivo maximizada é descrita pela expressão 14, com a restrição de que os parâmetros percentuais variem entre 0 e 1. O problema de otimização, então, simula o modelo de forma interativa até que os valores dos parâmetros correspondam aos objetivos, ou seja, de tal forma que o bem-estar alcance uma trajetória ótima.

Os valores dos demais parâmetros foram obtidos nos trabalhos empíricos de Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) e Leimbach e Baumstark (2010). Os dados relativos ao Produto Interno Bruto (PIB) em dólares (americanos) correntes 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 também do Banco Mundial. Com relação aos dados de importação e exportação, esses foram coletados no site do Comtrade.

O período selecionado para as análises é de 100 anos, devido à morosidade com que os efeitos das mudanças climáticas são percebidos na natureza, com início no ano 2000, em razão da disponibilidade dos parâmetros. Os parâmetros e variáveis bem como suas respectivas fontes estão descritos no Quadro I.

### 3.4 Cenários Simulados

Na construção dos cenários, foram selecionados aqueles mais representativos da realidade econômica e do ambiente em que as regiões analisadas estão inseridas, no caso em análise, os Estados Unidos e Europa (região desenvolvida) e América Latina e China (região em desenvolvimento). Assim, foram construídos os seguintes cenários:

- Cenário 1 (CEB): no cenário *benchmark* não existe restrição quanto às emissões de CO<sub>2</sub> e nem a presença de *spillovers* tecnológicos. Pretende-se, dessa forma, criar uma referência para analisar em que medida as políticas climáticas e/ou as transferências tecnológicas afetam o crescimento econômico e o bem-estar de cada região. Para a análise desse cenário, foi desativado o parâmetro  $sp_m(i,t)$  da expressão (17) bem como da expressão (43) para as regiões desenvolvidas (Estados Unidos e Europa) e em desenvolvimento (América Latina e China).

- Cenário 2 (CES): com a finalidade de examinar a influência dos *spillovers* tecnológicos no desempenho econômico das regiões, foi definido um cenário comparativo em que não há restrições quanto às emissões, porém há presença de *spillovers* tecnológicos. Nesse cenário, foi habilitado o parâmetro  $sp_m(i,t)$  da expressão (17) para os países desenvolvidos (Estados Unidos e Europa) e em desenvolvimento (América Latina e China).
- Cenário 3 (CEP - 1): O cenário de política climática foi delimitado seguindo as recomendações iniciais do Protocolo de Kyoto, que impunha restrições aos países desenvolvidos. Dessa forma, somente a Europa e os EUA devem cumprir metas de emissões. Nesse cenário, a expressão (43) foi ativada para a região desenvolvida, mantendo-se desabilitado o parâmetro  $sp_m(i,t)$  da expressão (17).
- Cenário 4 (CEP - 2): Nesse cenário de política climática, tanto os países desenvolvidos quanto os países em desenvolvimento devem cumprir metas de emissões, o que é coerente com o novo protocolo climático a ser debatido e desenvolvido em 2015. Nesse cenário, a expressão (43) foi ativada para os países desenvolvidos (Estados Unidos e Europa) e em desenvolvimento (América Latina e China), mantendo-se desabilitado o parâmetro  $sp_m(i,t)$  da expressão (17).
- Cenário 5 (CES-P): 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 um cenário em que são considerados os *spillovers* tecnológicos, pela habilitação do parâmetro  $sp_m(i,t)$  da expressão (17), e a política climática, pela ativação da expressão (43), para as regiões desenvolvidas (Estados Unidos e Europa) e em desenvolvimento (América Latina e China)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é composto por três tópicos, em cada tópico é apresentado o resultado de um cenário simulado, que é comparado com o cenário de desempenho ótimo das economias desenvolvidas e em desenvolvimento, em que não há os efeitos dos *spillovers* tecnológicos e da política climática de redução das emissões. O primeiro tópico aborda a influência dos *spillovers* tecnológicos sobre as variáveis econômicas dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento. O segundo apresenta as economias das nações quando considerada a questão ambiental, a partir da implementação da política climática de redução das emissões. Este tópico é subdividido em dois, em que inicialmente a política climática é estabelecida somente para os países desenvolvidos e, em outra análise, essas políticas são aplicadas tanto para os países desenvolvidos quanto para os países em desenvolvimento. Por fim, o desempenho econômico das nações é analisado observando a influência tanto dos *spillovers* tecnológicos como da política climática de redução das emissões dos gases de efeito estufa.

### 4.1 Desempenho das Economias Desenvolvidas e em Desenvolvimento sob a influência dos *spillovers* tecnológicos

No cenário em que se incluem os *spillovers* tecnológicos, o crescimento adicional é induzido por exportações de capital dos EUA e da Europa. Isso resulta em um maior grau de especialização de ambas as regiões, desenvolvidas e em desenvolvimento, na produção de bens de investimento.

O desenvolvimento de novas tecnologias, geralmente, é feito por países ricos conforme destacam Leimbach e Baumanstark (2010). Com o aumento da integração econômica por meio do comércio internacional e investimentos estrangeiros diretos de um país, tem-se que o crescimento da produtividade não depende apenas do conhecimento incorporado na sua própria tecnologia, mas também da tecnologia importada de seus parceiros comerciais (BOSSETI, 2008).

As economias em desenvolvimento importam bens e serviços que agregam o progresso tecnológico desenvolvido pelos países ricos, estando cada vez mais expostas ao fluxo de conhecimento proveniente de pesquisas que circulam pelo mundo (BOSETTI, 2008).

Sobre esse aspecto, conforme resultados obtidos na pesquisa, verifica-se que no cenário em que se considera a influência dos *spillovers* (CES) comparativamente ao cenário de *benchmark* (CEB) tem-se a China como o país que mais se beneficiou com os *spillovers* tecnológicos. No início do período analisado o país já apresentou uma expansão no PIB equivalente a US\$ 0,28 trilhões, passando de US\$ 1,88 trilhão para US\$ 2,16 trilhões (Figura 2).

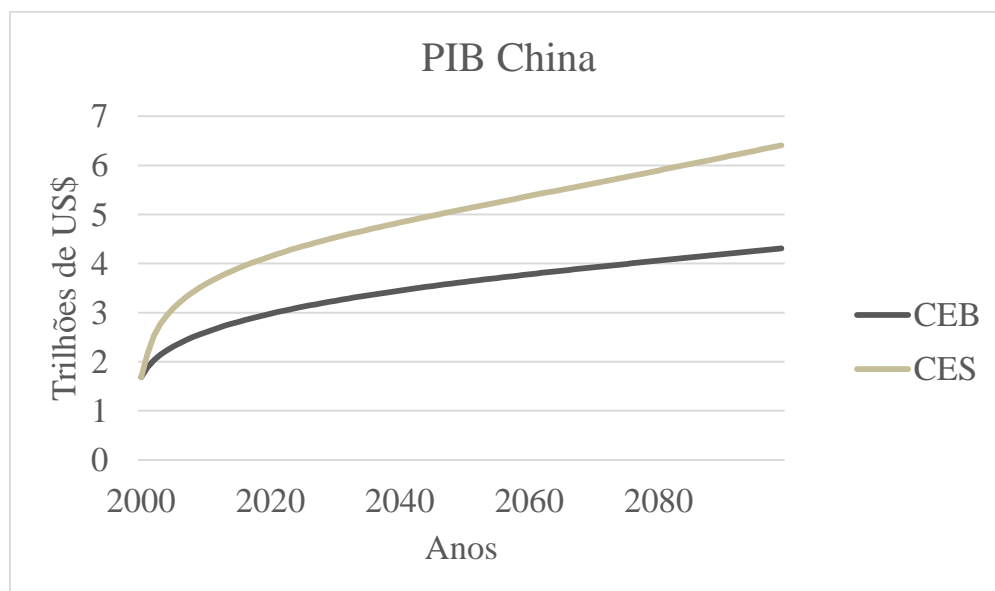


Figura 2 - Comportamento do PIB da China na presença de *spillovers* tecnológicos no período de 100 anos.

Fonte: Resultados da Pesquisa.

Keller (2004) argumenta que para que os países possam se beneficiar do transbordamento tecnológico, é necessário que apresentem *know how* tecnológico para sua captação. Esse, portanto, pode ser o motivo pelo qual a China apresentou um elevado crescimento econômico, comparado ao crescimento das demais economias.

A América Latina apresentou um crescimento econômico pouco expressivo quando comparado ao crescimento da China, demonstrado pela Figura 3. Ao longo do

período estudado a região apresentou um crescimento médio de 7,04%, ou seja, uma expansão 4 vezes menor que a da China, rendendo-lhe o equivalente a US\$ 0,29 trilhões.

A América Latina é uma região composta por vinte países. Desses países, apenas três - Argentina, Brasil, e México - são responsáveis por cerca de 75% do PIB da região. Deste modo, os países que integram a região apresentam assimetrias nas capacidades tecnológicas diante da fronteira internacional, somado a isso, há os diferenciais de produtividade que existem entre os setores, no interior dos setores e entre as empresas que movimentam a economia da região (CEPAL, 2007). Com isso, fundamentado no argumento de Keller (2004), a América Latina pode não possuir *know how* tecnológico suficiente para captação da externalidade positiva gerada pelos *spillovers* sendo este o motivo para o tímido crescimento.

Conforme enfatizam Leimbach e Baumanstark (2010), as economias precisam ter conhecimentos e habilidades suficientes para absorverem efeito positivo dos *spillovers* tecnológicos, de certo modo apresentado pela economia europeia evidenciado pela mudança na trajetória do PIB no cenário CES em relação ao cenário CEB (Figura 4).

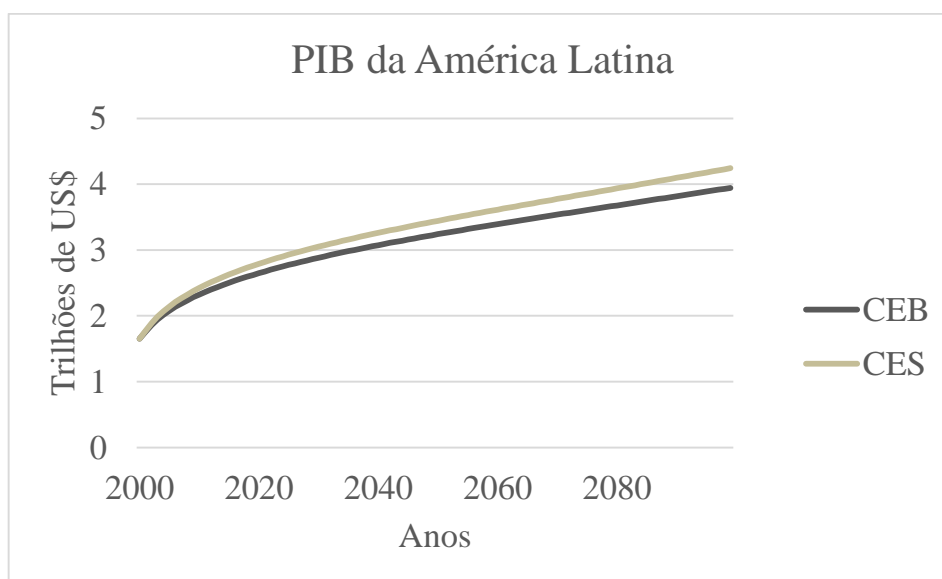


Figura 3 - Comportamento do PIB da América Latina na presença de *spillovers* tecnológicos, no período de 100 anos.

Fonte: Resultados da Pesquisa.

Os efeitos dos *spillovers* na economia Europeia já podem ser verificados na primeira década, quando a economia cresceu cerca de 6,25%. Ao longo do período

analisado esse percentual sobe para 14,9%, uma elevação média de US\$ 0,65 trilhões ao longo do período (Figura 4).

Cabe ressaltar que o crescimento econômico das economias desenvolvidas, por meio dos *spillovers* tecnológicos endógenos, se dá de forma indireta, em razão de um círculo virtuoso, que pode ser resultado da melhoria na atividade produtiva e elevação do crescimento econômico dos países em desenvolvimento, gerado pelo efeito positivo dos *spillovers*, permitindo, assim, maior negociação entre as nações em desenvolvimento e as desenvolvidas.

No caso da economia dos Estados Unidos, o crescimento econômico apresentou uma trajetória crescente, com uma expansão percentual de 9,63%, ao longo de todo o período analisado. Esse crescimento rendeu para a economia o montante de US\$ 0,5 trilhões (Figura 5).

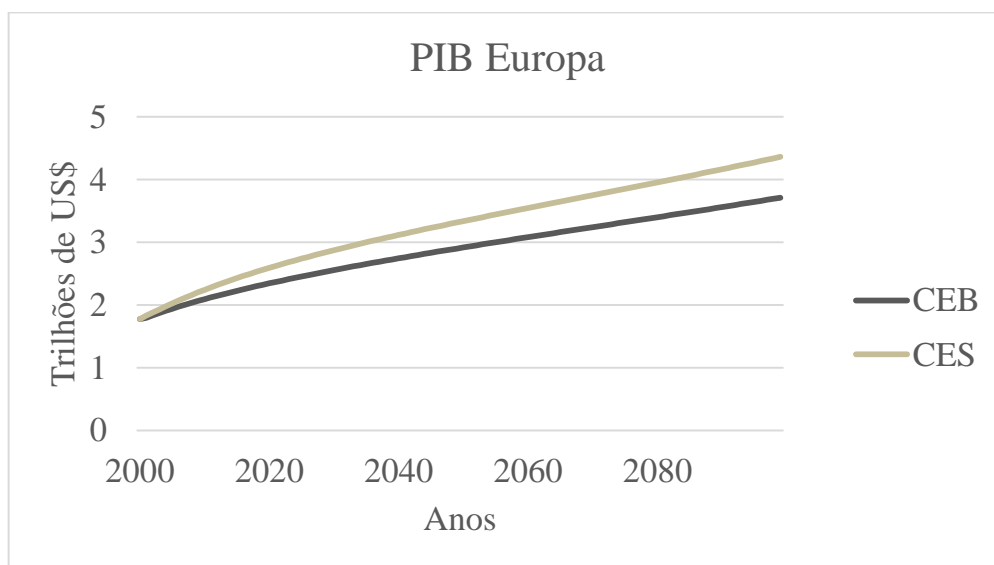


Figura 4 - Comportamento do PIB da Europa na presença de *spillovers* tecnológicos no período de 100 anos.

Fonte: Resultados da Pesquisa.

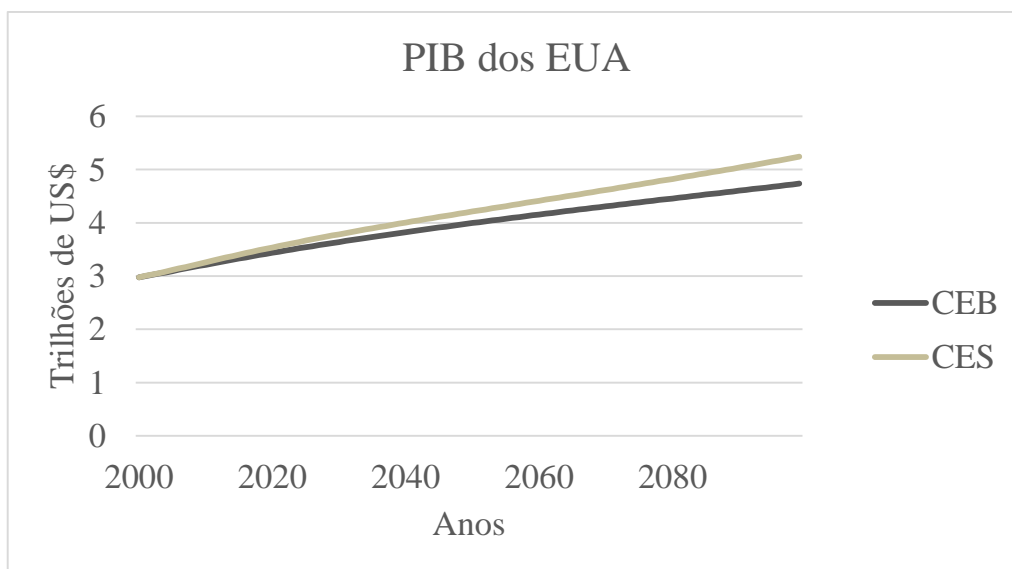


Figura 5 - Comportamento do PIB dos Estados Unidos na presença de *spillovers* tecnológicos no período de 100 anos

Fonte: Resultados da Pesquisa.

Coe e Helpman (1995), Lee (1995), Xu e Wang (1999) e Eaton e Kortum (2001) indicam que bens de capital importados implicam em *spillovers* tecnológicos que representam mudanças significativas da atividade produtiva.

O comércio internacional é um fator desencadeador do crescimento econômico uma vez que impulsiona os países a aumentar sua capacidade produtiva; induz o aumento dos níveis de investimento levando a uma alocação mais eficiente dos recursos de acordo com as vantagens comparativas de cada país; produz melhorias tecnológicas, pois a competitividade passa a ser atributo básico para concorrer no comércio exterior, além das melhorias da capacidade de gerenciamento para responder às pressões competitivas externas conforme Greenaway, Morgan e Wright (2001) e Ventura (2005).

Observando as transações comerciais entre os países, com destaque para a negociação dos bens de capital, nos quais estão embutidos os *spillovers* tecnológicos, verificou-se que as exportações feitas pela China, Figura 6, apresentaram uma trajetória crescente, que, no último ano do período (2100), somou um montante de US\$ 2,25 trilhões, em média, quatro vezes maior do que o volume das exportações da América Latina (US\$ 0,56 trilhões) (Figura 7).

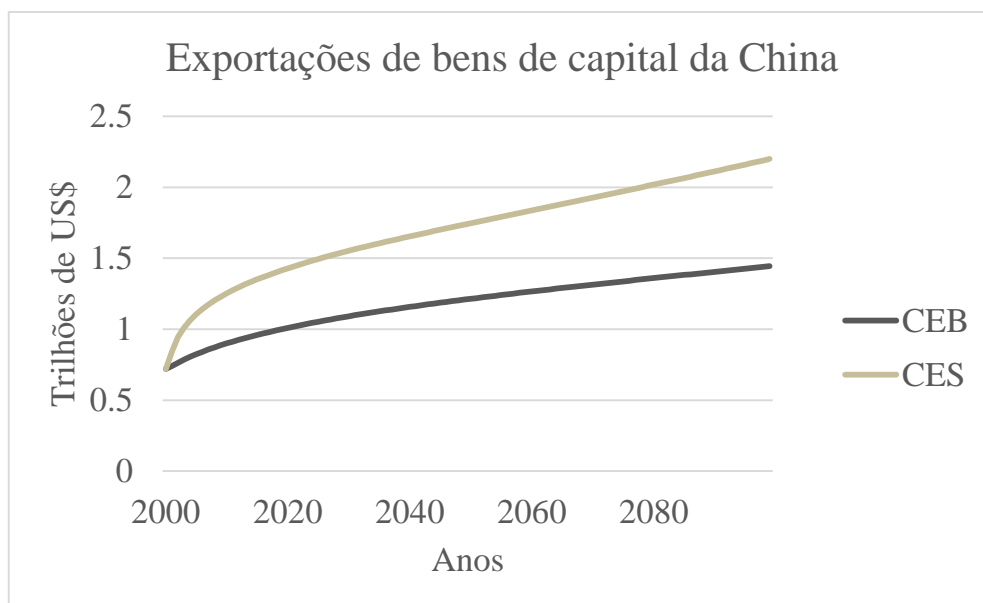


Figura 6 - Comportamento das Exportações de bens de capital da China na presença de *spillovers* tecnológicos no período de 100 anos.

Fonte: Resultados da pesquisa.

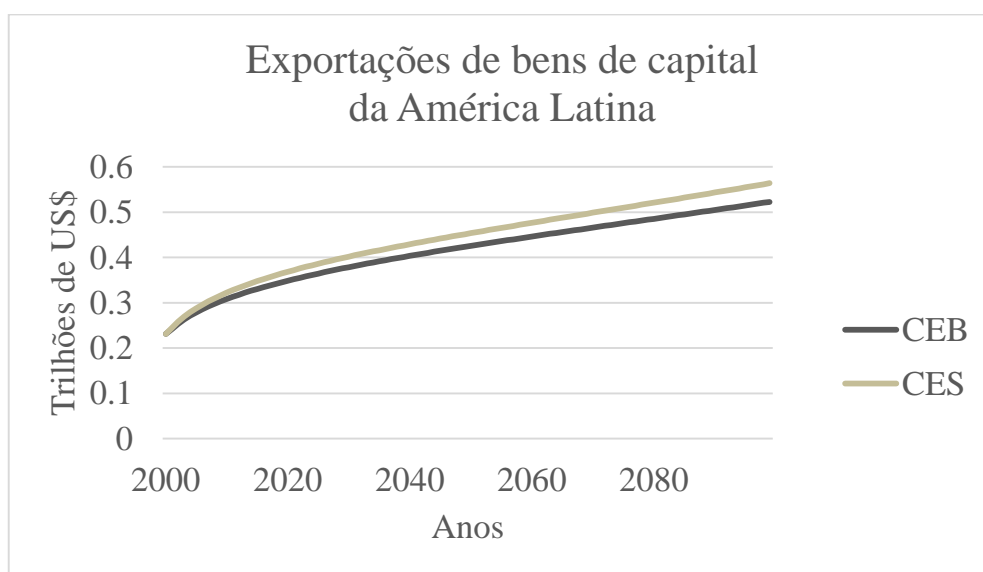


Figura 7 - Comportamento das Exportações de bens de capital da América Latina na presença de *spillovers* tecnológicos no período de 100 anos

Fonte: Resultados da pesquisa.

As exportações dos bens de capital (investimento) pelos países desenvolvidos no cenário CES, por sua vez, resultaram em um volume de US\$ 0,21 trilhões e US\$ 0,31 trilhões para os Estados Unidos e Europa, respectivamente, no último ano do período considerado (Figuras 8 e 9). Apesar de também exercer forte influência no fluxo das exportações dos países desenvolvidos, observa-se que a influência dos *spillovers* é mais intensa, especialmente para a China, desde as duas primeiras décadas.

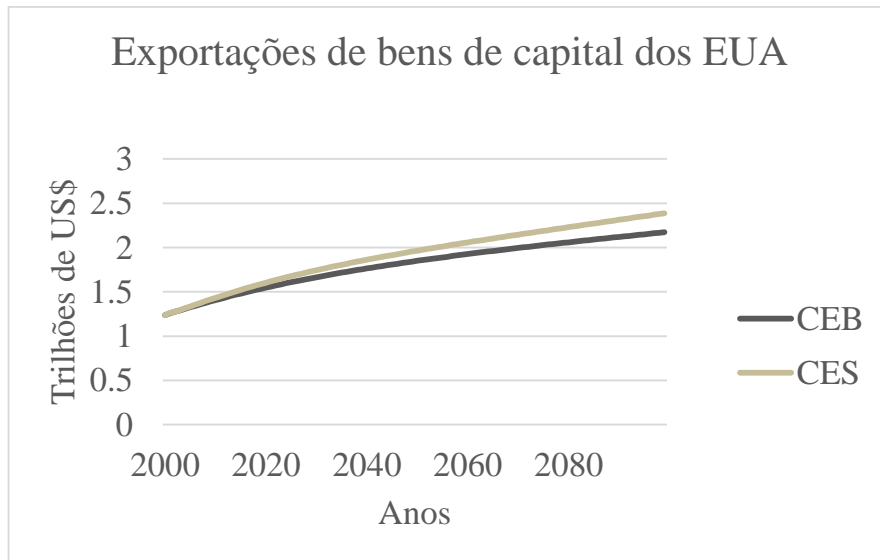


Figura 8 - Comportamento das Exportações de bens de capital dos Estados Unidos na presença de *spillovers* tecnológicos no período de 100 anos.  
Fonte: Resultados da pesquisa.

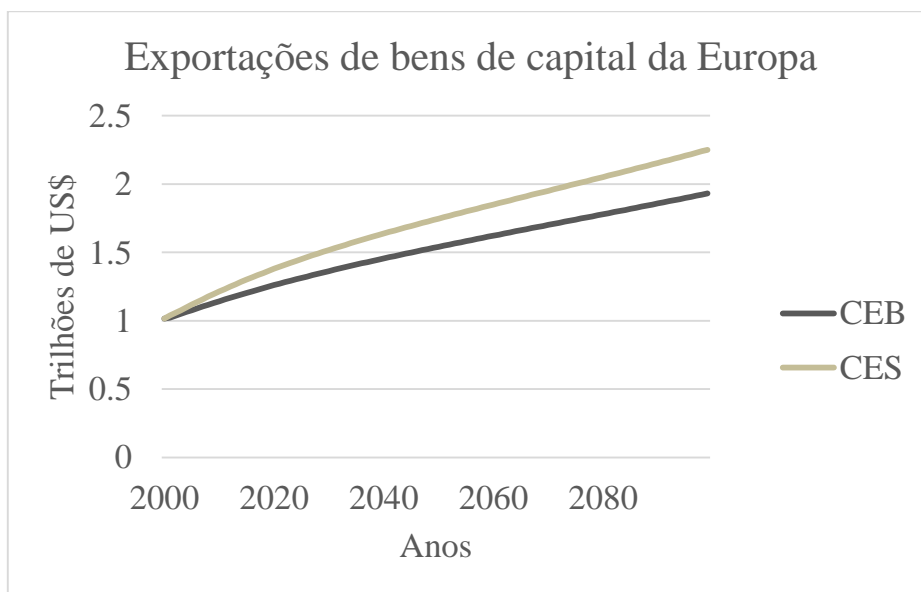


Figura 9 - Comportamento das Exportações de bens de capital da Europa na presença de *spillovers* tecnológicos no período de 100 anos.  
Fonte: Resultados da pesquisa.

As exportações de bens de consumo pelos países em desenvolvimento, no cenário CES, apresentaram uma trajetória crescente, semelhante a trajetória das exportações de bens de capital. Com isso, a China apresentou um acréscimo médio nos níveis de exportação de 34,31%, enquanto a América Latina experimentou um aumento de 7,13%, ou seja, um aumento quatro vezes menor (Figura 10 e 11).

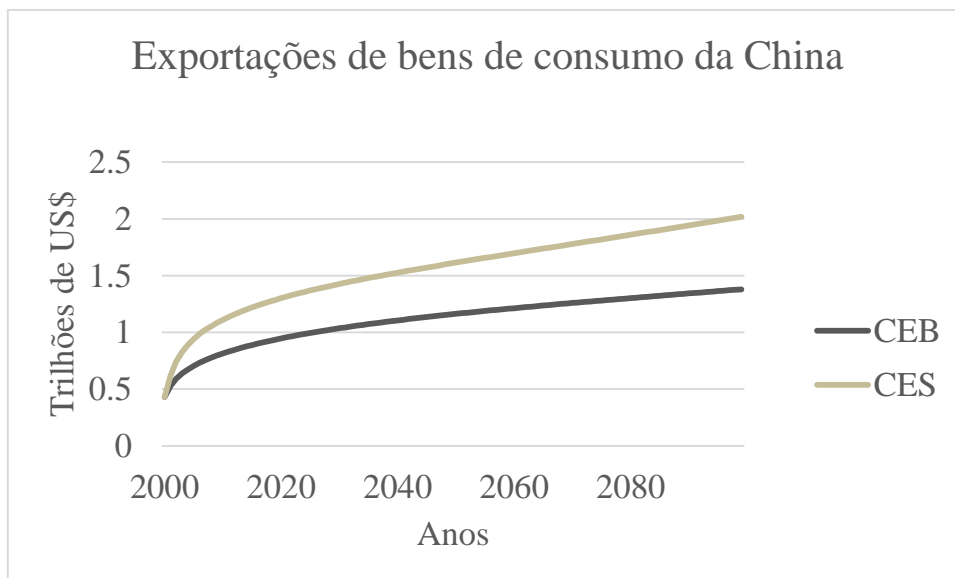


Figura 10 - Comportamento das Exportações de bens de consumo da China na presença de *spillovers* tecnológicos no período de 100 anos.  
 Fonte: Resultados da pesquisa.

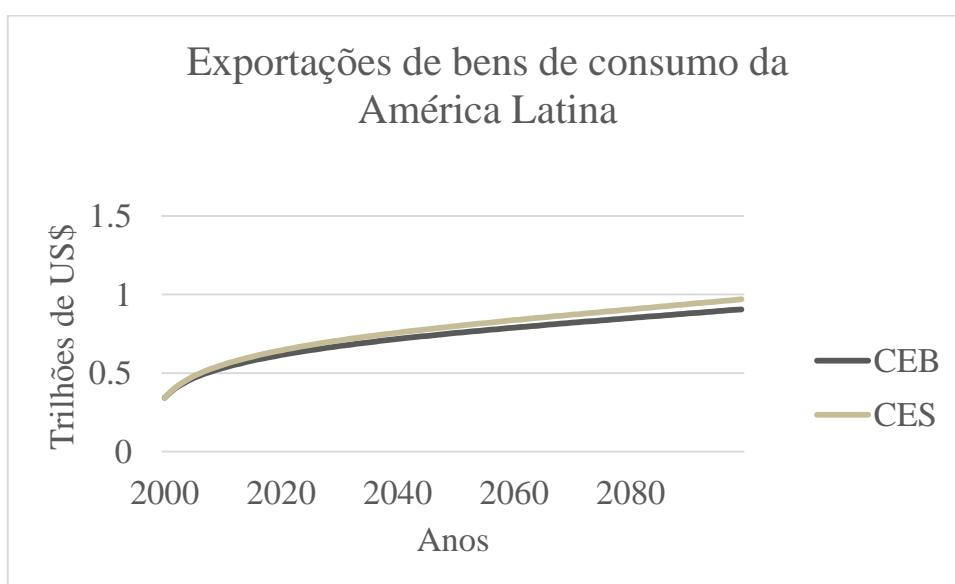


Figura 11 - Comportamento das exportações de bens de consumo da América Latina na presença de *spillovers* tecnológicos no período de 100 anos.  
 Fonte: Resultados da pesquisa.

Da mesma forma, conforme demonstrado pelas Figuras 12 e 13, as exportações de bens de consumo pelos países desenvolvidos, Estados Unidos (10,36%) e Europa (16,48%) também seguiram uma trajetória crescente. No cenário CES, os resultados das variáveis (PIB, Exportações de bens de capital e bens de consumo) para todos os países foram superiores ao cenário CEB de comportamento ótimo da economia, demonstrando

influência positiva dos *spillovers* tecnológicos sobre o PIB e sobre o comércio internacional.

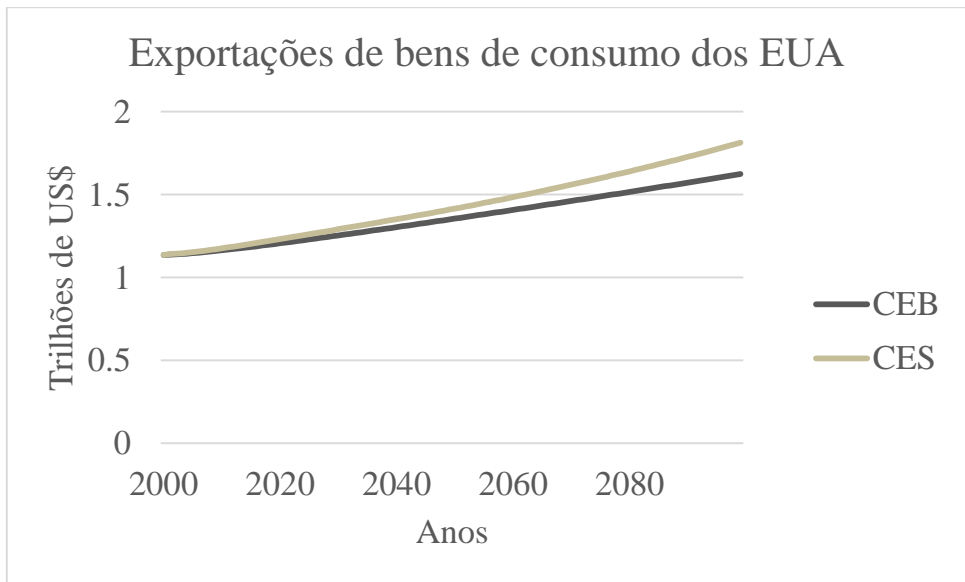


Figura 12 - Comportamento das exportações de bens de consumo dos Estados Unidos na presença de *spillovers* tecnológico no período de 100 anos.  
Fonte: Resultados da pesquisa.

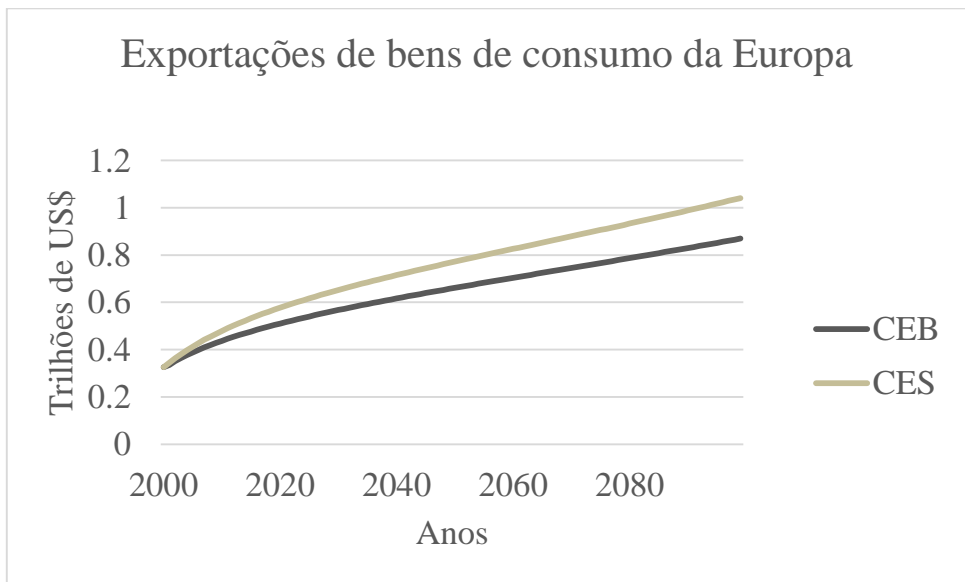


Figura 13 - Comportamento das Exportações de bens de consumo da Europa na presença de *spillovers* tecnológico no período de 100 anos.  
Fonte: Resultados da pesquisa.

No que se refere ao nível de emissões, de acordo com os dados expostos na Tabela 2, o país com maior nível de emissão foi os Estados Unidos, seguido da Europa.

Tal resultado condiz com a realidade atual, em que os dois países estão entre os que mais emitem gases de efeito estufa na atmosfera. No que tange a contribuição dos *spillovers* tecnológicos sobre o nível de emissões de CO<sub>2</sub>, pode-se inferir que foi positiva, no sentido de que se houve uma elevação no PIB, no volume do comércio internacional entre as nações, era de se esperar que houvesse um aumento nos níveis de emissões, contudo, esses níveis permaneceram inalterados quando comparados os cenários CEB e CES. Esse resultado corrobora a afirmação de que os *spillovers* tecnológicos podem estar contribuindo para melhorar a eficiência energética dos países, mas não é capaz de reduzir as emissões dos GEE, havendo a necessidade de junção entre mudança tecnológica endógena e políticas de mitigação, conforme preconizado por Edmonds et.al., (2012).

Tabela 2 – Comparativo do nível de emissão de CO<sub>2</sub> das nações desenvolvidas e em desenvolvimento nos cenários CEB, CES

Cenários*	Nível de Emissões (Milhões de Toneladas)			
	Europa	EUA	China	América Latina
CEB **	2,80	3,23	2,48	2,02
CES **	2,80	3,23	2,48	2,02

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: \* Os cenários CEB e CES correspondem ao cenário de *Benchmark* e ao cenário com *spillover* tecnológico, respectivamente.

Para a variável bem-estar, também houve influência positiva dos *spillovers* tecnológicos em seu nível para as economias analisadas. Cabe ressaltar que a análise para o bem-estar não leva em consideração os valores numéricos, mas a trajetória apresentada ao longo do período. Assim, observa-se que tanto no cenário de *benchmark* (CEB) quanto no cenário em que os *spillovers* são considerados (CES), o bem-estar segue a mesma trajetória de tendência crescente, refletindo, assim, a influência dos *spillovers* tecnológicos ao longo do período analisado.

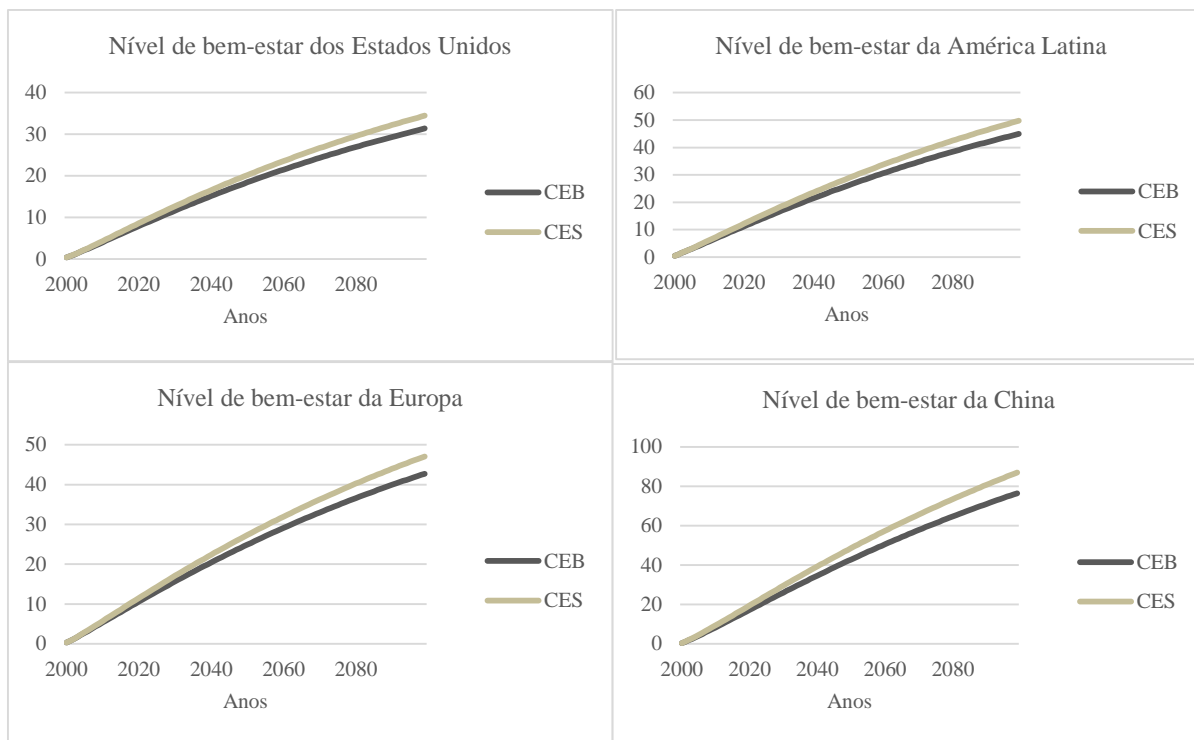


Figura 14 - Comportamento do Bem-Estar das economias desenvolvidas e em desenvolvimento na presença de *spillovers* tecnológicos, no período de 100 anos.  
Fonte: Resultados da pesquisa.

Diante os resultados obtidos, constatou-se neste cenário, a influência positiva dos *spillovers* tecnológicos sobre a economia das regiões analisadas. Tanto as economias desenvolvidas, Estados Unidos e Europa, como as economias em desenvolvimento, China e América Latina, foram beneficiadas pelo transbordamento tecnológico. Ademais, observou-se que a mudança tecnológica por si só não é capaz de reduzir os níveis de emissões dos gases de efeito estufa na atmosfera, sendo imprescindível a implementação de políticas climáticas de mitigação dos GEE.

#### **4.2 Implementação da Política Climática de Mitigação de GEE e seus efeitos sobre a dinâmica das economias desenvolvidas e em desenvolvimento**

A criação de políticas climáticas de mitigação aconteceu após a constatação de que a quantidade de gases responsáveis pelo efeito estufa, que estavam sendo emitidos na atmosfera não era totalmente absorvida pela terra, acarretando fenômenos que

caracterizam uma mudança climática. De acordo com o IPCC (2007), mudança climática refere-se a qualquer alteração do clima, natural ou de origem antrópica, ao longo do tempo. Em relação à contribuição antrópica para a variabilidade climática tem-se a quantidade de GEE lançados na atmosfera como o fator principal para intensificação do aquecimento global.

A origem da maior parcela das emissões de GEE antropogênicas é a queima de combustíveis fósseis, seguida pela mudança de uso do solo, como fertilizantes, pecuária, desmatamento e queimadas. Tais aspectos foram responsáveis pelo aumento de cerca de 40% na concentração de gás carbônico na atmosfera em relação ao período pré-industrial (IPCC, 2013).

Diante da problemática de que o aumento da temperatura global tem acarretado na redução e incertezas em relação ao bem-estar humano, têm sido discutidas, desde a implementação do protocolo de Kyoto, em 2005, formas de mitigar as emissões de GEE, estipulando metas de redução para os países industrializados, que deveriam ser cumpridas entre 2008 e 2012, vislumbrando uma redução em torno de 5% dos níveis de 1990 (STERN, 2007).

De acordo com o décimo nono relatório produzido pelo IPCC, o nível atual de emissões já chegou a 400 ppm, nível proposto pelo Protocolo de Kyoto para evitar que a temperatura do planeta ficasse acima de 2° C dos níveis pré-industriais (IPCC, 2015).

Contudo, ao longo das reuniões da Conferência das partes (COP), a falta de consenso, especialmente entre a União Europeia e os Estados Unidos em relação à adoção de mecanismos para redução das emissões, seguida da saída dos Estados Unidos dos acordos internacionais, como também a não participação da China e a insatisfação dos países quanto a suas metas de redução, sinaliza ausência de cooperação e “indiferença” frente ao aquecimento global. Essa situação já tem provocado uma série de intercorrências danosas, e tem dificultado a efetivação de políticas capazes de refrear o aumento da temperatura.

A última conferência das partes (COP – 20) realizada no Peru, em dezembro de 2014, mostrou certa mudança visionária dos países em relação ao aquecimento global, demonstrando certa preocupação quanto as mudanças irreversíveis e aos danos para os mais diversos segmentos da sociedade que o aumento da temperatura pode gerar,

levando ao debate a implementação de um acordo universal em que os países estariam empenhados em descarbonizar progressivamente a economia global no sentido de alcançar a neutralidade climática, emitindo apenas níveis capazes de serem absorvidos pela atmosfera.

A seguir são apresentados os resultados da elaboração dos cenários em que a política climática é implementada apenas para os países desenvolvidos (CEP-1), como proposto inicialmente pelo protocolo de Kyoto, e outro, no qual a política de redução das emissões é seguida tanto pelos países desenvolvidos quanto pelos países em desenvolvimento (CEP-2), conforme discutido na COP – 20.

#### **4.2.1 Efeitos da Política Climática de Mitigação de GEE sobre a dinâmica das economias desenvolvidas**

A política climática adotada para a obtenção dos resultados desse cenário foi de 55% dos níveis atuais de emissão, uma média do percentual apresentado no décimo nono relatório produzido pelo IPCC para manter os níveis de temperatura no máximo 2°C acima dos níveis pré – industriais, sendo esta medida imposta somente aos países desenvolvidos: Europa e Estados Unidos. Comparando os cenários CEB e CEP - 1, foi possível observar que o crescimento econômico dos países desenvolvidos não foi sensível à redução nos níveis de emissões estabelecidos, não havendo alteração em relação ao comportamento ótimo da economia (Anexo I).

Um dos argumentos apresentados pelos países para a não participação dos acordos climáticos globais é a redução no PIB, estimado pela literatura entre 1 e 3%, o que por consequência levaria a redução do bem-estar (Stern, 2007). Contudo, considerando as pressuposições feitas no modelo, o resultado obtido mostra que a implementação de restrição de emissões apenas para os países desenvolvidos não é suficiente para que ocorram alterações no crescimento econômico das regiões analisadas, evidenciando que o argumento utilizado pelos países desenvolvidos para a não ratificação dos acordos internacionais é sem fundamentação empírica.

No tocante aos efeitos da política climática, aplicada somente aos países desenvolvidos, sobre o comércio internacional, o bem-estar e as emissões de CO<sub>2</sub>, os resultados foram praticamente nulos, não refletindo benefícios ou custos relacionados à implementação desta política. A análise gráfica possibilita observar uma superposição das trajetórias dos cenários CEB e CEP-1, da mesma forma que ocorreu com o PIB (Anexo I).

Destarte, o reflexo da política climática sobre as variáveis nesse cenário demonstra a importância da cooperação entre os países, corroborando o que foi sinalizado por Edmonds (2012), que aponta que mudanças unilaterais não são suficientes para alterar o atual cenário de mudanças climáticas, sendo fundamental a aplicabilidade de uma política climática global.

#### **4.2.2 Influência da Política Climática de Mitigação de GEE nas economias dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento**

A problemática que envolve os danos ambientais causados pelos altos níveis de GEE na atmosfera tornou-se uma questão que envolve os diversos países, havendo, com isso, necessidade de cooperação entre as nações. Desde o início das reuniões que trataram das questões relacionadas ao clima, buscou-se a integração dos países com o intuito de definir mecanismos para redução das emissões, contudo, a heterogeneidade econômica entre os países sempre apareceu como um entrave às negociações.

Muitos dos países antes classificados como subdesenvolvidos têm experimentado um crescimento econômico que têm possibilitado a redução dos níveis de pobreza absoluta. Por este motivo, os países em desenvolvimento temem que as políticas climáticas de redução das emissões de GEE comprometam o início da sua própria industrialização (JAKOB; STECKEL, 2014).

Mais recentemente, os países reuniram-se em prol da implantação de uma política climática universal, e sob essa perspectiva, neste cenário, a política climática de redução das emissões foi imposta tanto para os países desenvolvidos como para os países em desenvolvimento.

A Tabela 3 reflete os efeitos da política de redução das emissões sobre o crescimento econômico das regiões analisadas. Assim, foi possível observar que o crescimento econômico tanto dos países desenvolvidos como dos países em desenvolvimento sofreu uma pequena retração com a implementação da política climática em relação ao cenário de *benchmark*.

Em termos absolutos, a China (0,029 trilhões de dólares) foi o país que apresentou maior redução em seu crescimento. A segunda maior retração foi a dos Estados Unidos (0,026 trilhões de dólares) seguido da Europa (0,013 trilhões de dólares). A América Latina (0,008 trilhões de dólares) foi a região que menos sofreu o impacto da implementação da política climática de redução das emissões sobre o seu crescimento econômico.

Tabela 3 – Variação média do PIB dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento no CEB e no CEP-2, no período de 100 anos

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

Fonte: Resultados da Pesquisa.

Nota: Os cenários CEB e CEP-2 correspondem aos cenários de Benchmark, e com políticas climáticas de redução de 55% dos níveis atuais das emissões para os países analisados, respectivamente.

Da mesma forma, as exportações de bens de capital tanto dos países desenvolvidos como dos países em desenvolvimento apresentaram uma pequena redução. O país mais afetado pelas políticas climáticas em relação as negociações de bens de capital foi a China, com uma redução de US\$ 0,01 trilhão, seguida dos Estados Unidos (US\$ 0,008 trilhões) e da Europa (US\$ 0,006 trilhões), sendo a América Latina a região menos afetada, com uma redução de (US\$ 0,001 trilhão). A Tabela 4 expõe os efeitos da política de redução das emissões sobre o comércio internacional das regiões analisadas.

Tabela 4 – Exportações médias de bens de capital e de consumo dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento sobre a incidência de políticas de redução de emissão, no período de 100 anos

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

Fonte: Resultados da Pesquisa.

As exportações de bens de consumo apresentaram um comportamento semelhante, nesse caso o país com maior redução do fluxo das exportações foram os Estados Unidos (US\$ 0,12 trilhões), em seguida a China (US\$ 0,009 trilhões). A Europa e a América Latina tiveram uma redução percentual relativamente baixa comparada a dos outros países (Tabela 5).

Tabela 5 – Exportações médias de bens de capital e de consumo dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento sobre a incidência de políticas de redução de emissão, no período de 100 anos

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

Fonte: Resultados da Pesquisa.

O impacto da política de restrição das emissões quando aplicada tanto aos países desenvolvidos quanto aos países em desenvolvimento, causou uma considerável redução nos níveis de emissão para todos os países analisados. No caso dos Estados Unidos verifica-se que a política climática começa a surtir efeitos a partir da segunda década, quando os níveis de emissões caem de 3,2 milhões de toneladas para 0,88 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (Figura 15).

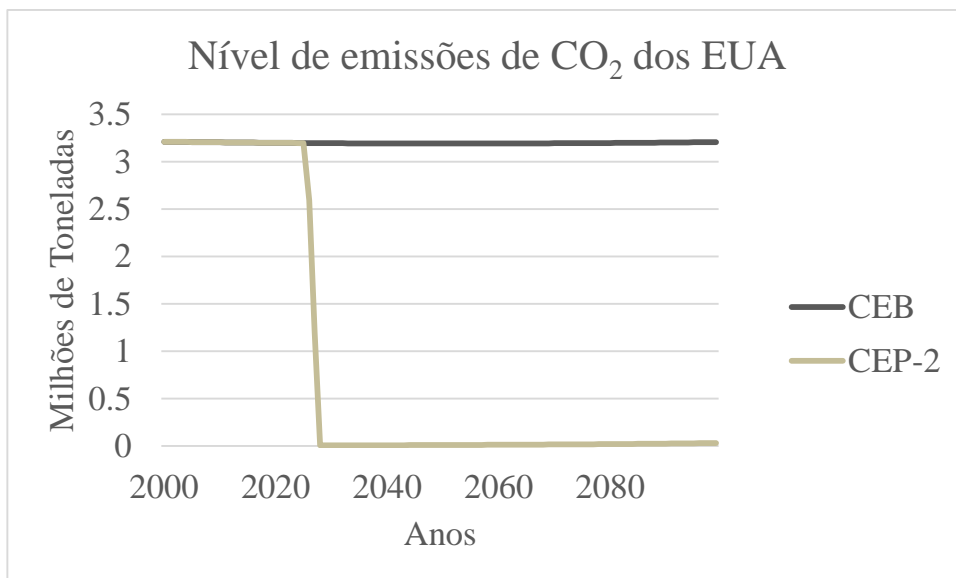


Figura 15: Nível de emissões de CO<sub>2</sub> dos Estados Unidos considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos.  
 Fonte: Resultados da pesquisa.

No caso da América Latina, Figura 16, observa-se que os efeitos aparecem de forma mais tardia, na década de quarenta. Quando aplicada a política global de restrição das emissões, a quantidade lançada na atmosfera não se altera até a década de quarenta quando há uma redução de 2 milhões de toneladas, no cenário ideal, para 0,057 milhões de toneladas. Nos anos seguintes os níveis tiveram uma pequena elevação fechando o período com 0,080 milhões de toneladas.

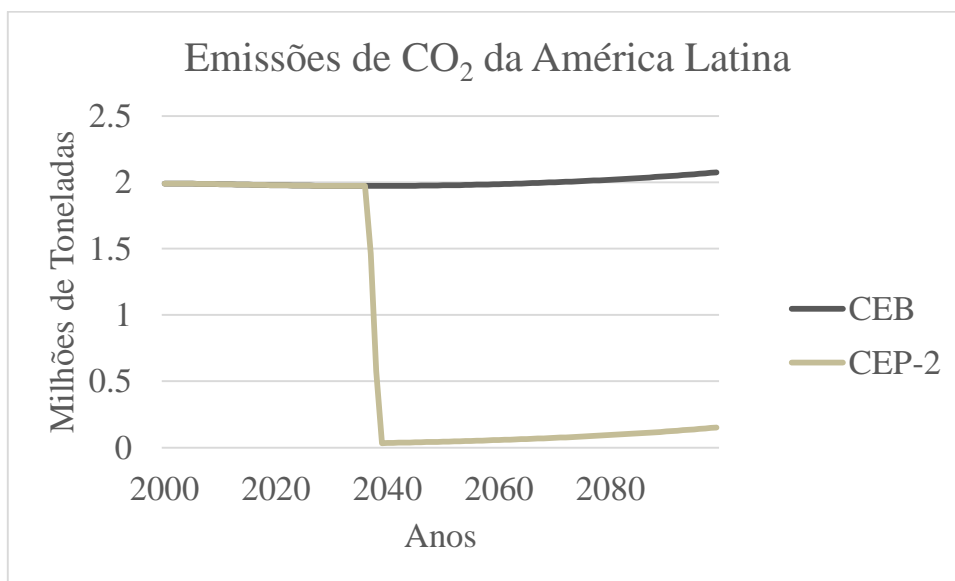


Figura 16: Nível de emissões de CO<sub>2</sub> da América Latina considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos.  
 Fonte: Resultados da pesquisa.

A Europa, por sua vez, teve seus níveis de emissões de CO<sub>2</sub> reduzidos no segundo ano de aplicação da política global de mitigação dos GEE. Os níveis que eram em torno de 2,8 milhões de toneladas caíram para 0,015 milhões de toneladas, redução de quase 100% do nível apresentado no cenário de benchmark (Figura 17).

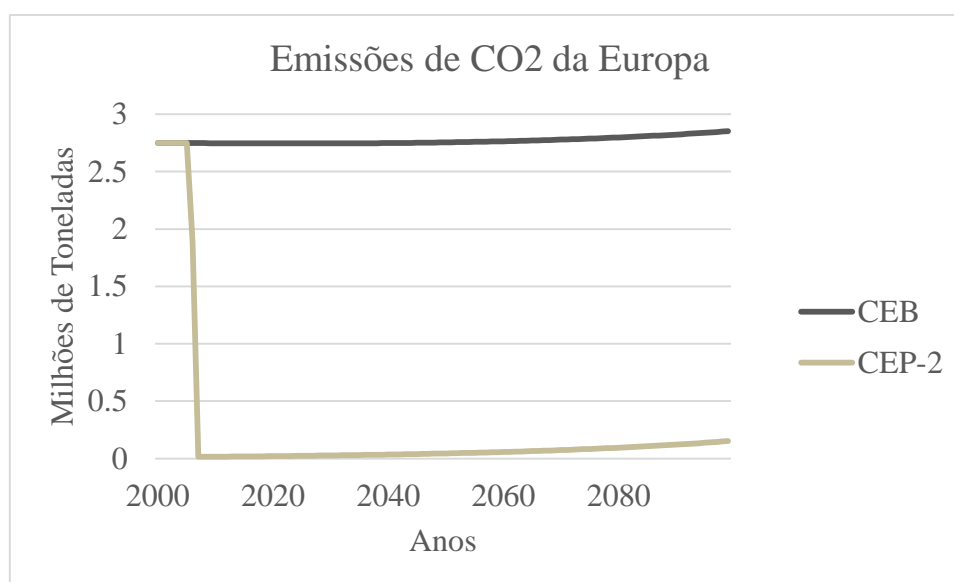


Figura 17: Nível de emissões de CO<sub>2</sub> da Europa considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Por fim, a China, Figura 18, teve seu níveis de emissões reduzidos também na segunda década do século, assim como os Estados Unidos. Nas duas primeiras décadas a redução foi de aproximadamente 2,43 milhões de toneladas. O volume caiu de 2,45 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> para 0,03 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Houve uma variação nesse valor e a redução ao final do período foi de 0,09 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>.

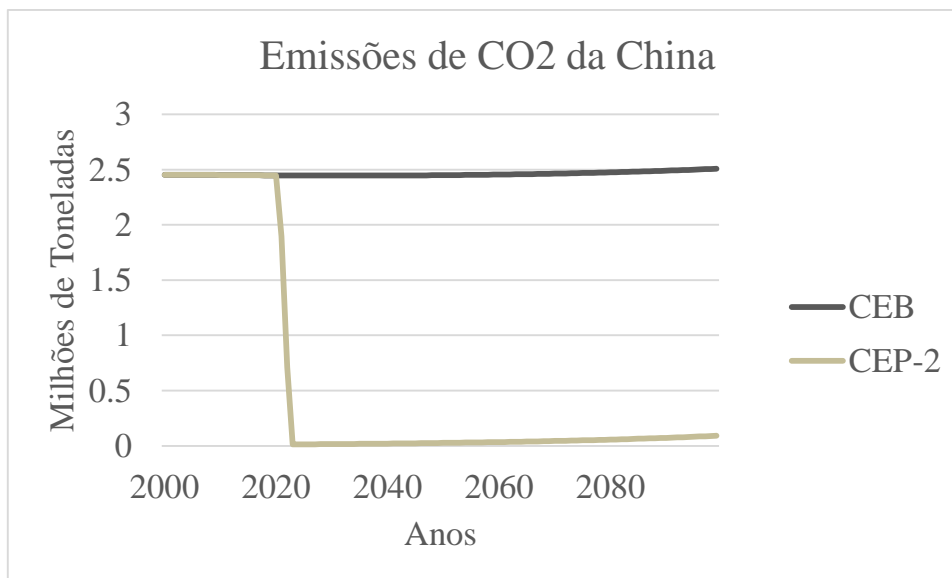


Figura 18: Nível de emissões de CO<sub>2</sub> da China considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos.  
 Fonte: Resultados da pesquisa.

No caso das emissões, observa-se nos resultados obtidos que há uma defasagem entre a implementação da política e a queda brusca das emissões. Neste caso, pode ser que nos primeiros períodos de simulação as regiões tenham obtido um alto saldo das permissões de emissões (expressão 42). Contudo, a produção de energia levou ao consumo desse saldo, de modo que os países foram obrigados a se ajustar ao limite de emissões permitido.

Nesse sentido, tem-se que o estabelecimento de uma política de mitigação dos GEE global acarretou em uma redução nos níveis de emissões demonstrando a efetividade de uma política climática onde haja a cooperação de todos os países. A viabilidade dessa redução acontece a partir da substituição da matriz energética intensiva em recurso fóssil, para utilização de recurso renovável.

O resultado da simulação para o bem-estar econômico mundial indica que a implantação de uma política climática de mitigação dos GEE, sem a presença de *spillovers* tecnológicos, causará uma pequena redução no bem-estar econômico das nações. Contudo, é a trajetória da variável, e não o valor numérico, o fator preponderante para a análise do bem-estar e, conforme demonstrado na Figura 19, a tendência é crescente.

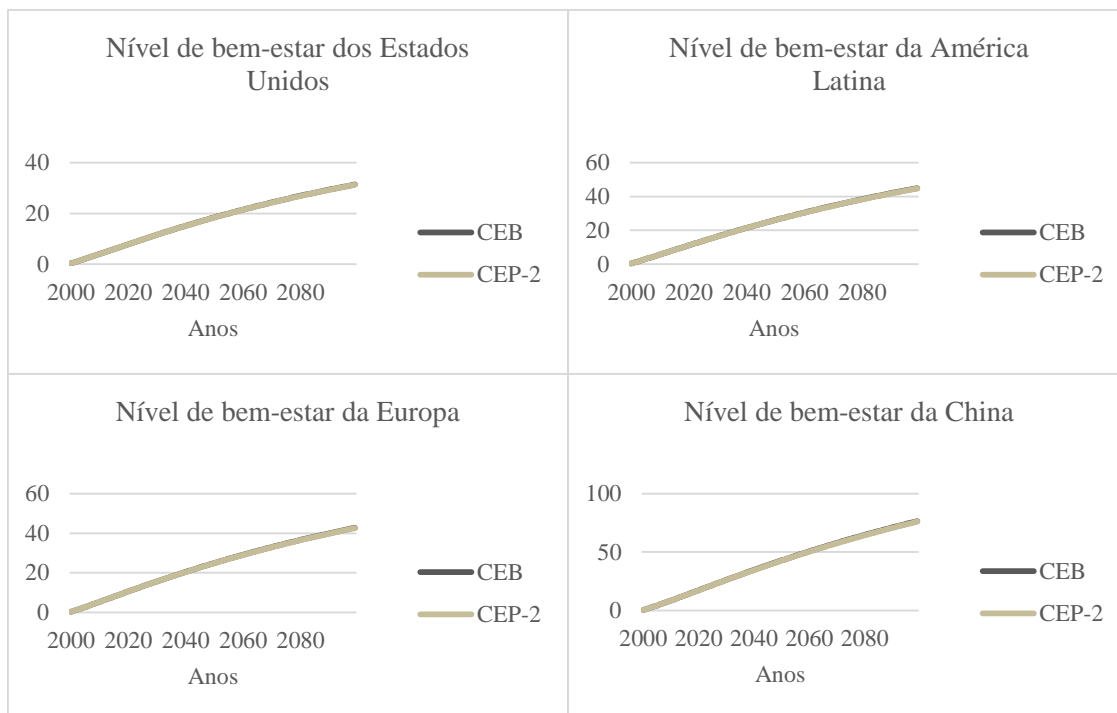


Figura 19: Comportamento do Bem-Estar das economias desenvolvidas e em desenvolvimento considerando uma política global de restrição de emissão de GEE, no período de 100 anos.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Cabe ressaltar que os benefícios ambientais gerados pela redução da concentração de gases do efeito estufa, responsável pela mudança climática, não foram integrados à análise. Contudo, sabe-se dos benefícios ambientais relacionados a redução da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, e da relação entre o bem-estar humano e a disponibilidade dos serviços ecossistêmicos: provisão, regulação, de suporte e culturais.

Em síntese, verificou-se que a implementação de uma política climática global acarreta redução no crescimento das economias, mas os níveis de emissão reduzem consideravelmente. Esse resultado demonstra a necessidade de conjugar política de mitigação dos gases de efeito estufa à mudança tecnológica endógena, para compensar as restrições impostas a produção a partir de combustíveis fósseis, de modo que a economia das nações siga crescendo e haja redução na concentração dos GEE na atmosfera.

### **4.3 Dinâmica das economias desenvolvidas e em desenvolvimento sobre a influência dos *spillovers* tecnológicos e dos compromissos de mitigação dos GEE**

A mudança tecnológica endógena, de acordo com Fischer e Newell (2008), IEA (2008), De La Torre *et al.* (2009) e Mills (2009), tem sido apontada como um fator de fundamental importância para a redução do custo de estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera. Leimbach *et al.* (2010) argumentam que apesar de sua origem concentrada nos países desenvolvidos, o conhecimento é disseminado pelo comércio para todos os países, ou seja, as economias em desenvolvimento importam bens e serviços que detêm o progresso tecnológico desenvolvido pelos países ricos, e ficam assim mais vulneráveis e dependentes da tecnologia desenvolvida por esses países.

Segundo Popp (2004), uma razoável política climática deveria estimular a mudança tecnológica para uma medida que contribuísse para redução de custos de tais políticas. Exemplificando, ele cita o que aconteceu com o progresso tecnológico no setor de extração dos recursos naturais, a medida que contribuiu para a redução dos custos marginais do uso de combustíveis fósseis, tornando-os mais abundantes e relativamente baratos nos últimos 200 anos. Quanto à energia renovável, o retorno do investimento nesse tipo de energia e na eficiência energética ainda é muito baixo para atrair capital, uma vez que a disponibilidade de recursos não renováveis é abundante e os preços relativamente mais baixos.

Assim, busca-se analisar neste cenário, no contexto de mudança climática, o desempenho das economias sob a influência dos *spillovers* tecnológicos e da política climática de mitigação dos GEE.

O crescimento econômico dos países analisados, diferentemente dos cenários em que apenas se considerou os efeitos da política climática, foi crescente. Comparando os cenários CEB e CES – P, a China foi o país que mais se beneficiou com a associação da política climática de redução das emissões e *spillovers* tecnológicos, apresentando uma expansão de US\$ 1,415 trilhão. A Europa e os Estados Unidos experimentaram uma elevação no PIB de US\$ 0,372 e de US\$ 0,199 trilhão, respectivamente. A América Latina foi a região que apresentou o crescimento mais tímido, US\$ 0,185 trilhão. A

associação da política climática com a mudança tecnológica endógena foi fundamental para reverter um quadro de redução do crescimento, quando a política climática de mitigação dos GEE é aplicada sem considerar os *spillovers* tecnológicos, para um cenário de expansão econômica aliada aos benefícios ambientais da redução na concentração dos gases de efeito estufa (Tabela 6).

Tabela 6 – Variação média do PIB dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento no CEB e no CES - P, no período de 100 anos

<b>PIB (trilhões de US\$)</b>				
<b>Cenários*</b>	<b>Europa</b>	<b>EUA</b>	<b>China</b>	<b>América Latina</b>
CEB	2,859	3,941	3,486	3,136
CES - P	3,231	4,141	4,901	3,322
CES-P - CEB	0,372	0,199	1,415	0,185

Fonte: Resultados da Pesquisa.

Nota: Os cenários CEB e CES - P correspondem ao de Benchmark, e ao de políticas climáticas de redução de 55% dos níveis atuais das emissões para os países analisados, respectivamente.

No caso das exportações de bens de capital, verifica-se que a China apresentou maior crescimento das negociações comerciais, seguida da Europa e dos Estados Unidos. A região que apresentou menor crescimento foi América Latina, sendo este 26 vezes menor que o crescimento das exportações da China (Tabela 7).

Considerando que tudo que é exportado por um país é importado por outro, a importação de capital estrangeiro pelos países em desenvolvimento aumentou a competitividade dos produtos produzidos nesses países, especialmente na China, devido ao processo de expansão do *know-how* tecnológico, por consequência, as exportações de bens de capital (investimento) foram maiores do que no cenário de *benchmark*.

Como destacam Leimback e Baumstark (2010), o ganho potencial do *spillovers*, 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.

Tabela 7 – Exportações médias de bens de capital e de consumo dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento sob influência de políticas climáticas de redução das emissões e *spillovers* tecnológicos ao longo de 100 anos

<b>Exportações de bens de capital (trilhões de US\$)</b>				
<b>Cenários*</b>	<b>EUA</b>	<b>Europa</b>	<b>América Latina</b>	<b>China</b>
CEB	2,17	1,93	0,52	1,44
CES-P	2,37	2,23	0,56	2,17
CES-P - CEB	0,19	0,30	0,03	0,72
<b>Exportações de bens de consumo (trilhões de US\$)</b>				
<b>Cenários*</b>	<b>EUA</b>	<b>Europa</b>	<b>América Latina</b>	<b>China</b>
CEB	1,62	0,86	0,90	1,37
CES-P	1,78	1,03	0,96	1,99
CES-P - CEB	0,16	0,16	0,06	0,61

Fonte: Resultados da Pesquisa.

Como pode ser observado na Tabela 6, as exportações de bens de consumo pelos países desenvolvidos representaram para a economia dos Estados Unidos e Europeia um acréscimo médio de US\$ 0,16 trilhão. Já as exportações para economia da China e para a da América Latina mostraram um acréscimo de US\$ 0,61 trilhão e US\$ 0,06 trilhão, respectivamente.

O reflexo da política climática de redução das emissões em conjunto com os *spillovers* tecnológicos foi positivo, levando a uma redução nos níveis de emissões das regiões analisadas comparadas ao cenário CEB. Contudo, comparativamente ao cenário em que foi implementada somente uma política climática global, os níveis de emissões permaneceram inalterados (Tabela 8).

Neste sentido, verifica-se que os *spillovers* tecnológicos aumentam a eficiência energética amenizando os efeitos adversos da redução do consumo de energia fóssil. Tendo em vista que a imposição de uma política climática de mitigação dos gases de efeito estufa induzirá uma redução do uso de energia fóssil, principal fonte de emissão dos GEE, e principal fonte energética das economias, as economias apresentarão menor desempenho econômico (Tabela 7).

Tabela 8—Comparativo do nível de emissão de CO2 das nações desenvolvidas e em desenvolvimento nos cenários CEB, CEP, e CES-P, ao longo de 100 anos

<b>Nível de Emissões (Milhões de Toneladas)</b>				
<b>Cenários*</b>	<b>Europa</b>	<b>EUA</b>	<b>China</b>	<b>América Latina</b>
CEB **	2,77	3,19	2,45	1,99
CEP **	0,24	0,88	0,57	0,80
CES – P **	0,24	0,88	0,57	0,80

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: \* Os cenários CEB, CEP e CES-P correspondem ao de Benchmark, ao de políticas climáticas de redução de 55% dos níveis atuais das emissões e ao cenário que associa política climática, aos *spillovers* tecnológicos, respectivamente.

O bem-estar das regiões, por sua vez, também foi afetado pela política climática de redução das emissões em conjunto com os *spillovers* tecnológicos (Figura 20). Vale ressaltar novamente que o valor obtido para o bem-estar a cada ano não é importante, mas sim o seu comportamento ao longo do período. Assim, observa-se que, tanto no CEB quanto no CES-P, o bem-estar segue uma trajetória crescente.

A política climática de mitigação dos GEE demanda aos países adequação dos meios utilizados na produção, de modo que a economia possa experimentar aumento do bem-estar econômico sem aumentar os níveis de gases poluentes na atmosfera. Uma das alternativas é o desenvolvimento e a utilização de tecnologias limpas, como, por exemplo, a substituição da energia fóssil por energia renovável. Com referência a esse aspecto, está a importância dos *spillovers* tecnológicos e da cooperação entre as nações desenvolvidas e as nações em desenvolvimento, no sentido de que as economias desenvolvidas que possuem maior poder econômico, possam produzir tecnologias de menor impacto ambiental e transferi-las para os países mais pobres. Dessa forma, os custos para implementação das políticas de mitigação se tornarão menores para ambos os países e haverá redução nos níveis de concentração dos GEE.

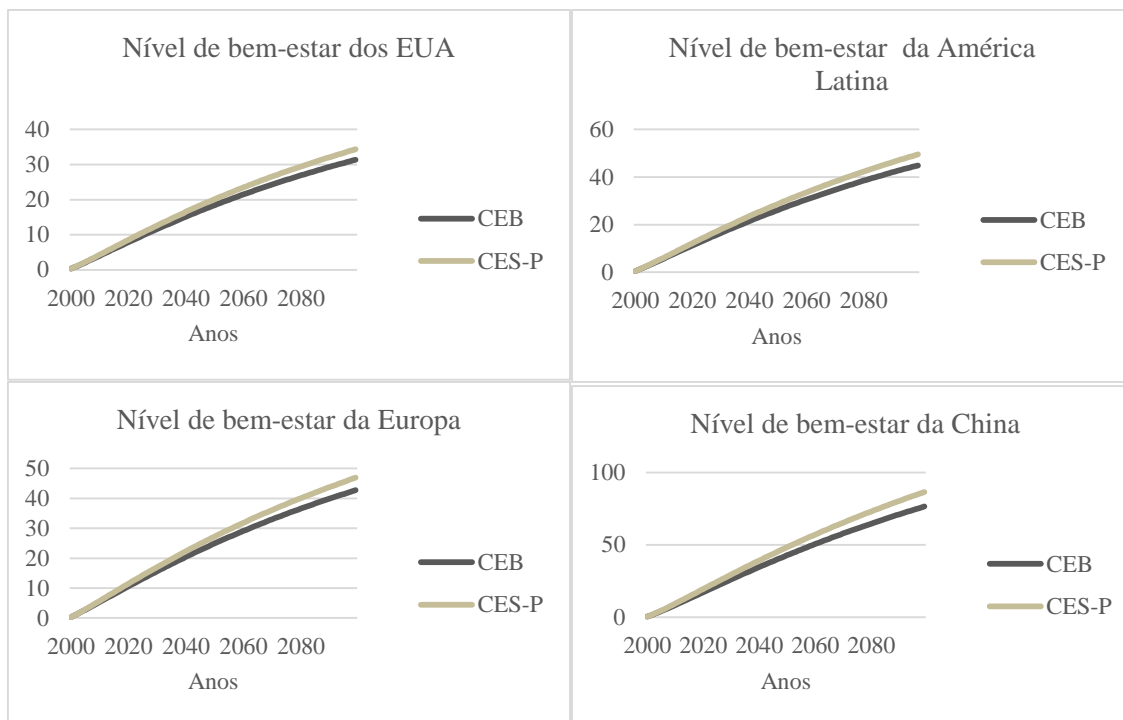


Figura 20: Bem-estar econômico das nações desenvolvidas e em desenvolvimento sob influência de políticas climáticas de redução das emissões e *spillovers* tecnológicos, ao longo de 100 anos.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Neste sentido, observa-se que os melhores resultados obtidos para a mitigação de GEE foi do cenário no qual há instituição de uma política climática global associada a *spillovers* tecnológicos. Os efeitos sobre o crescimento econômico e o bem-estar social são positivos, alternativa que pode motivar os tomadores de decisão para a participar dos acordos climáticos internacionais.

Vale ressaltar que foram feitas proposições que simplificam o modelo sendo, portanto, interessante que outras análises sejam realizadas no sentido de verificar a questão da capacidade de adaptação das economias às mudanças climáticas, bem como inserir os benefícios ambientais nas análises.

## 5 CONCLUSÕES

A elaboração e a aplicabilidade de políticas climáticas de mitigação dos gases de efeito estufa têm se confrontado com o dilema entre crescer e aumentar a concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, ou parar de crescer e estabilizar o nível de GEE presente na atmosfera. Somado a isso, é necessário considerar os custos que envolvem a implementação das metas de redução de emissão e seus efeitos sobre o bem-estar. Neste estudo, foram estruturados cenários com o objetivo de analisar o desempenho das economias desenvolvidas (EUA e Europa) e em desenvolvimento (América Latina e China) com a implementação de uma política climática de redução das emissões, na presença dos *spillovers* tecnológicos, em um período de 100 anos. Para responder aos objetivos deste estudo, foi utilizada uma variante do Modelo de Investimento e Desenvolvimento Tecnológico (MIND), que se aproxima do modelo MIND-RS, permitindo análises multirregionais em cenários de mudanças climáticas, considerando a mudança tecnológica endógena.

Com respaldo nas análises, constatou-se que no cenário em que os *spillovers* tecnológicos são considerados (CES), verifica-se que o crescimento adicional é induzido por exportações de capital dos EUA e da Europa. Isso resulta em um maior grau de especialização de ambas as regiões, desenvolvidas e em desenvolvimento, na produção de bens de investimento. Neste mesmo cenário, o volume de comércio é mais elevado do que no cenário de benchmark.

Sob uma perspectiva ambiental, o progresso tecnológico é capaz de levar a uma maior eficiência energética. Contudo, as emissões mundiais estão em crescimento, confirmando os resultados das variáveis que mensuram a intensidade da produção, o comércio e a interação entre as economias. A principal fonte de energia utilizada para suprir as demandas da dinâmica econômica dos países é a fonte fóssil. Sendo esta fonte esgotável, é possível que no longo-prazo os níveis de emissões sejam estagnados, e o empenho para o uso de fontes energéticas renováveis provoque decréscimo no nível de emissão dos GEE.

Nos cenários de política climática, quando aplicada somente para os países desenvolvidos, conforme proposto inicialmente pelo protocolo de Kyoto, verifica-se não ser suficiente para provocar alterações no comércio internacional e no bem-estar, não refletindo benefícios ou custos relacionados à política de mitigação.

Quando aplicada para ambos, países desenvolvidos e em desenvolvimento, os níveis de emissões de CO<sub>2</sub> foram consideravelmente reduzidos, evidenciando, com isso, a importância da cooperação entre os países em prol da estabilização da temperatura atmosférica, implicando maior eficiência da política climática.

Por conseguinte, ao considerar a política climática global em conjunto com os *spillovers* tecnológicos, que aumentam a eficiência energética, houve redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub> em relação ao cenário de *benchmark* e elevação tanto no crescimento como no nível de bem-estar, associado a uma distribuição aceitável dos custos entre as economias.

Depreende-se que a alternativa mais eficaz no sentido de mitigar as emissões de GEE e alcançar a estabilidade da temperatura é a instituição de uma política climática global, uma vez que seus efeitos sobre as variáveis econômicas foram praticamente imperceptíveis, além disso, a adição dos *spillovers* tecnológicos significa maior potencial de redução das perdas ou potencialização dos ganhos de bem-estar.

Sendo assim, a cooperação entre os países para a implantação de políticas climáticas de redução das emissões e o transbordamento tecnológico são fundamentais para reduzir a concentração dos GEE, estabilizando a temperatura atmosférica, permitindo o bom funcionamento dos ecossistemas e, por conseguinte, contribuindo para elevar o nível de bem-estar da sociedade.

Para a simulação dos cenários, são necessários dados iniciais tanto para os parâmetros quanto para as variáveis. Os valores iniciais para todos os parâmetros utilizados no modelo não foram encontrados para o ano 2000, sendo uma limitação do trabalho.

A função de bem-estar, nesse estudo, é influenciada pela população, que fornece a mão de obra, e pelo consumo. Sugere-se, por fim, que estudos futuros integrem à função aspectos ambientais que retratem ganhos com a redução das emissões.

## REFERÊNCIAS

AGHION, P; HOWITT, P. A Model of Growth Through Creative Destruction. **Source Econometrica**, v. 60, n. 2, p. 323-351. 1992.

ARROW, K. “The Economic Implications of Learning by Doing”. **Review of Economic Studies**. v.29, p. 73-155, 1962.

BARRETT, S.; Self-Enforcing International Environmental Agreements. **Oxford Economic Papers**. New Series, v. 46, Special Issue on Environmental Economics, p. 878-894, 1994.

BARRETT, S. Environment and Statecraft. Oxford, Oxford University Press. 2003.

BARRO, R. SALA-I-MARTIN, X. **Economic growth**. Cambridge: The Mint Press, 2004. 540 p.

BENHABIB, J.; RUSTICHINI, A. Vintage capital, investment, and growth. **Journal of Economic Theory**, v. 55, n. 2, p. 323-339, 1991.

BERNSTEIN, P. M.; MONTGOMERY, W. D.; RUTHERFORD, T. F. Global impacts of the Kyoto agreement: results from the MS-MRT model. **Resource and Energy Economics**, v. 21, p. 375 - 413, 1999.

BOSETTI, V., CARRARO, C., GALEOTTI, M., MASSETTI, E., TAVONI, M. International energy R&D spillovers and the economics of greenhouse gas atmospheric stabilization. **Energy Economics**, v.30, p. 2912–2929, 2008.

BUCHNER, B.; CARRARO, C.; CERSOSIMO, I.; MARCHIORI, C.; Back to Kyoto? US Participation and the Linkage between R&D and Climate Cooperation. In A. Haurie and L. Viguier, eds., *Coupling Climate and Economic Dynamics*, Kluwer Academic Publishers, p. 173-204, 2005.

CASS, D. Optimum Growth in an Aggregate Model of Capital Accumulation. *Review of Economic Studies*. v 32, p 233-240, 1965.

CARRARO, M. GALEOTTI, E. MASSETTI and M. TAVONI, WITCH: A World Induced Technical Change Hybrid Model. *The Energy Journal*, Special Issue on

Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down. 2006.

CARRARO, C.; SINISCALCO, D. Environmental Policy Re-considered: The Role of Technological Innovation. *European Economic Review*. v.38, p. 545 – 554, 1994.

COE, D., & HELPMAN, E. International R&D spillovers. *European Economic Review*, v. 39, n.5, p. 859–887, 1995

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

DECHEZLEPRÊTRE, A. MATTHIEU, G. , HASCIC, I., Johnstone, N. Ménière, Y. Invention and Transfer of Climate Change Mitigation Technologies on a Global Scale: A Study Drawing on Patent Data. Disponível em: <  
[http://eprints.lse.ac.uk/37590/1/Invention\\_and\\_transfer\\_of\\_climate\\_change\\_mitigation\\_technologies\\_on\\_a\\_global\\_scale\\_a\\_study\\_drawing\\_on\\_patent\\_data\(lsero\).pdf](http://eprints.lse.ac.uk/37590/1/Invention_and_transfer_of_climate_change_mitigation_technologies_on_a_global_scale_a_study_drawing_on_patent_data(lsero).pdf) >. Acesso em: 15 de dez. de 2014.

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.

DOMAR, Eusey O. Capital Expansion, Rate of Growth and Employment. *Econométrica*. n.º. 14, abril. 1946

EATON, J., KORTUM, S., 1996. Trade in ideas: patenting & productivity in the OECD. *J. Int. Econ*. v. 40, n. 3, p 251–278.

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.

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.

GREENAWAY, D.; MORGAN, W.; WRIGHT, P. Trade Reform, Adjustment and Growth: What does the evidence tell us. **The Economic Journal**. v. 108, p. 1547-1561, 2001.

GROSSMAN, G.; HELPMAN, E. Innovation and Growth in the Global Economy. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.

GRUBB, M., HOPE, C. and FOUQUET, R., Climatic Implications of the Kyoto Protocol: The Contribution of International Spillover," *Climatic Change*. v.54, p. 11 – 28, 2002.

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

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

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambio climático 2014: mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Resumen para responsables de políticas. Disponible em: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WG3AR5\\_SPM\\_brochure](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WG3AR5_SPM_brochure) >. Acesso em: 10 de Jan 2015.

KELLER, W. International technology diffusion. **J. Econ. Lit.** 42 (3), 752–782. 2004.

KEMFERT, C. Global Economic Implications of alternative Climate Policy Strategies. **Environmental Science and Policy**. v.5, p. 367-384, 2002.

KIRSCH, A. Comparing Latin American Energy Policies on Climate Change: Toward an Ambitious and Equitable International Climate Agreement. Disponible em: <[http://seors.unfccc.int/seors/attachments/get\\_attachment/](http://seors.unfccc.int/seors/attachments/get_attachment/)>. Acesso em 10 de Jan de 2015.

KOOPMANS, T. C. On The Concept of Optimal Economic Growth. In *The Econometric Approach to Development Planning*, Amsterdam: North-Holland, v 3, p. 225-195, 1965.

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.

KYPREOS, S., BAHN, O. A MERGE model with endogenous technological progress. **Environmental Modelling and Assessment**. v.19, p. 333–358, 2003.

LEE, J.-W., Capital goods import and long-run growth. **Journal of Development Economics**. v. 48, p. 91–110, 1995.

LEIMBACH, M.; BAUMSTARK, L. The impact of capital trade and technological spillovers on climate policies. **Ecol. Econ**. v.69, p. 2341–2355, 2010.

LUCAS, R. E. Jr. On the mechanics of economic development. **Journal of monetary Economics**. v. 22. p. 3-42. 1988

MANNE, A.S., MENDELSON, M., RICHEL, R. MERGE — a model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. **Energy Policy**. v. 23, p. 17–34, 1995.

MCJEON, H.C., CLARKE, L., KYLE, P., WISE, M., HACKBARTH, A., BRYANT, B.P., LEMPERT, R.J. Technology interactions among low-carbon energy technologies: what can we learn from a large number of scenarios? **Energy Econ**. v.33, p. 619 –631, 2011.

MEINSHAUSEN, M., N. MEINSHAUSEN, W. H.; RAPER, S.C.B, K. FRIELER, R. Knutti, D.J. FRAME, and M.R. ALLEN (2009). Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. **Nature** 458, 1158-1163.

NAGASHIMA, M., DELLINK, E. R. Technology spillovers and stability of international climate coalitions. Disponível em:  
<<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10784-008-9079-1> >. Acesso em: 15 dez. 2014.

Organização das Nações Unidas, **ONU**. Disponível em : <http://nacoesunidas.org/>  
Acesso em: 15 dez. 2014.

PHILIBERT, C., "International Energy Technology Collaboration and Climate Change Mitigation," OECD Environment Directorate and International Energy Agency, Paris. 2004.

RAMSEY, F. A Mathematical Theory of Saving. **Economic Journal**, v. 38, p. 543-559, 1928.

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

ROMER, P. M. (1990). Endogenous technological change. **The Journal of Political Economy**, v. 98 n. 5, p. 71 – 102.

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.

SOUSA, L. V. C, FERNANDES, E. A. Impacto do protocolo de Kyoto no crescimento econômico e no bem-estar: um estudo para o brasil e os países do anexo I. 2014. 76f. **Dissertação** (Mestrado em Economia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

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

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. Acerca de la CQNUMQ. Disponível em: <<http://newsroom.unfccc.int/es/acerca-de/>> Acesso em: 10 de Jan de 2015.

UZAWA, H. Optimum technical change in an aggregative model of economic growth. **International Economic Review**, v. 6, p. 18–31, 1965.

VERDOLINI, E., GALEOTTI, M. At Home and Abroad: An Empirical Analysis of Innovation and Diffusion in Energy-Efficient Technologies. 2009. Disponível em:< <http://www.feem.it/userfiles/attach/2010171719154123-09.pdf> >. Acesso em: 15 de dez. 2014.

XEPAPADEAS, A. **Economic Growth and the Environment**. In Handbook of Environmental Economics. Elsevier. Edition 1, vol. 3, n.3., 2005.

Xu, B., Wang, J., 1999. Capital goods trade and R&D spillovers in the OECD. **Canadian Journal of Economics**. v.32, p.1258–1274, 1999.

## ANEXO I

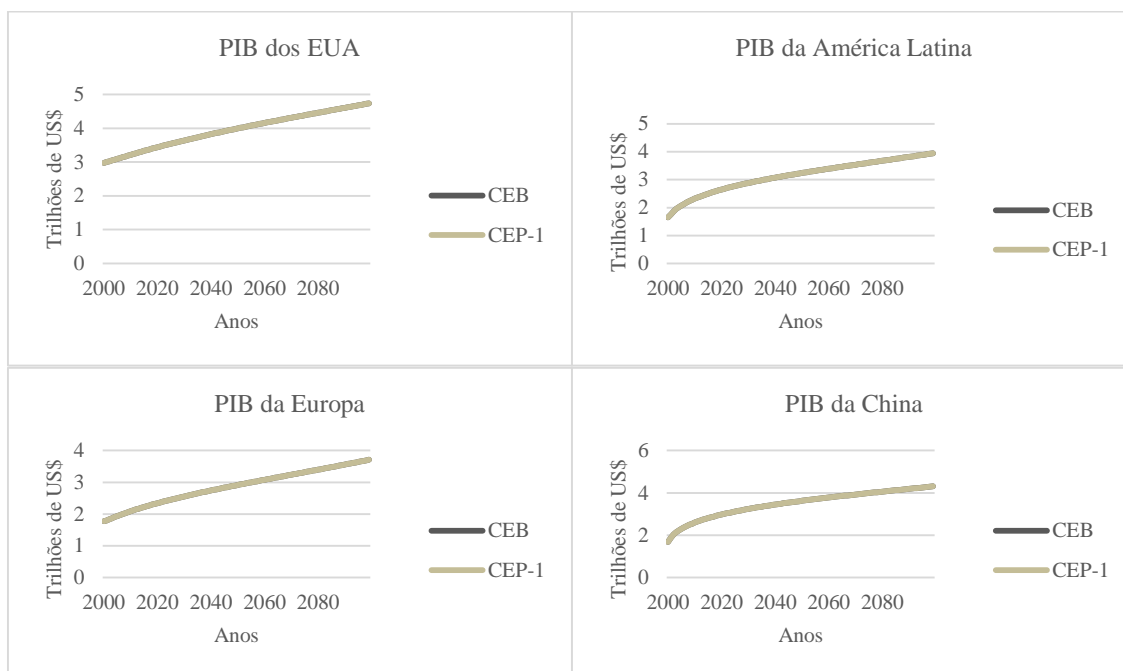


Figura 1 - Comportamento do PIB dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento, considerando a restrição de emissão de GEE apenas para os países desenvolvidos, no período de 100 anos

Fonte: Resultados da pesquisa.

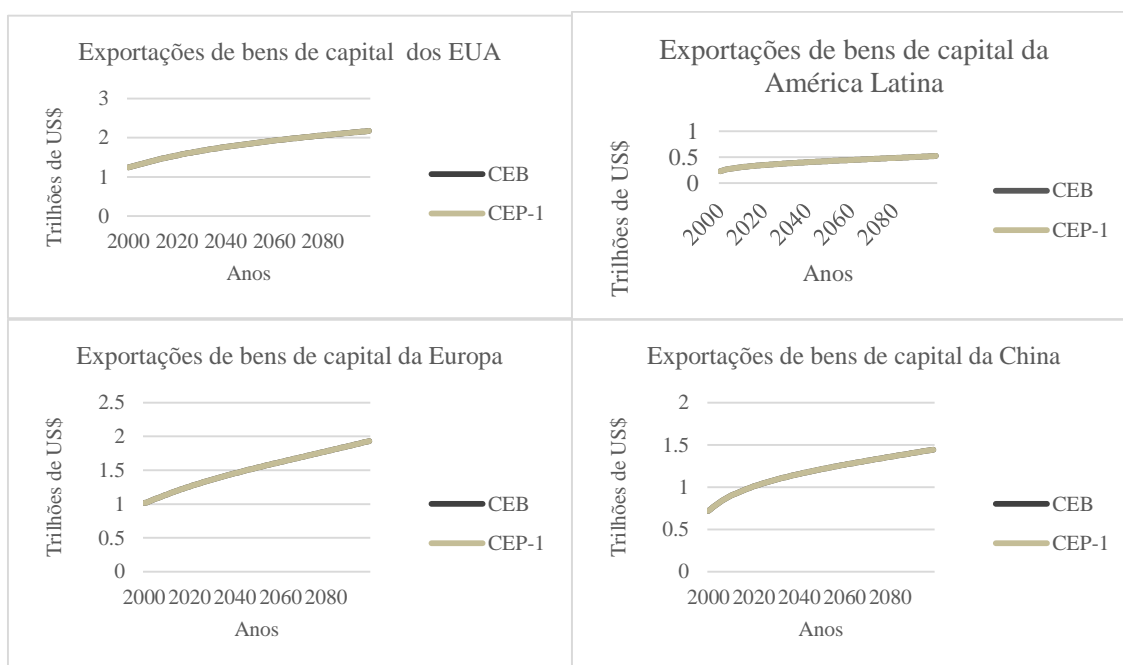


Figura 2 - Comportamento das Exportações de bens de capital dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento, considerando a restrição de emissão de GEE apenas para os países desenvolvidos, no período de 100 anos

Fonte: Resultados da pesquisa.

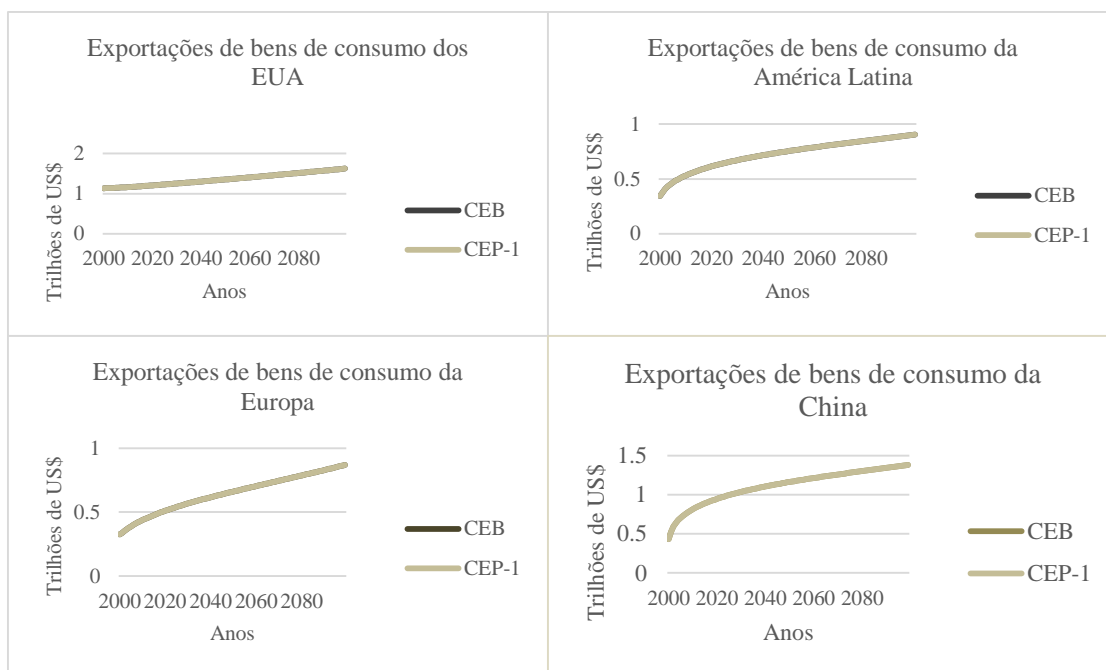


Figura 3 - Comportamento das Exportações de bens de consumo dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento, considerando a restrição de emissão de GEE apenas para os países desenvolvidos, no período de 100 anos  
 Fonte: Resultados da pesquisa.

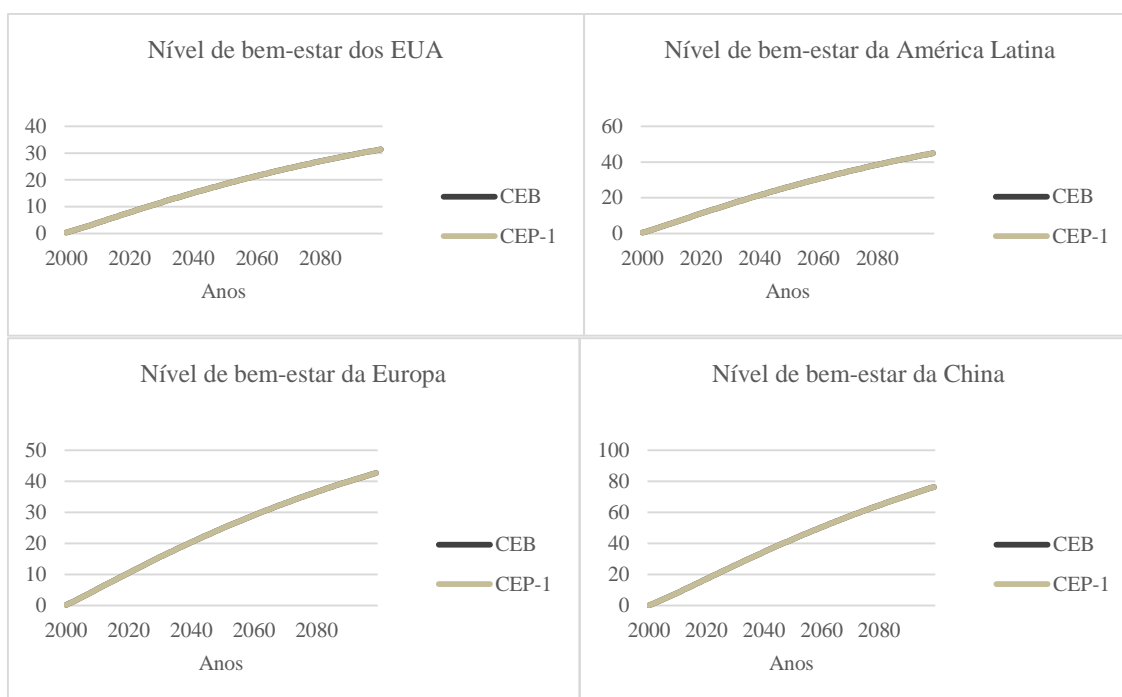


Figura 4 – Nível de bem estar dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento, considerando a restrição de emissão de GEE apenas para os países desenvolvidos, no período de 100 anos  
 Fonte: Resultados da pesquisa.

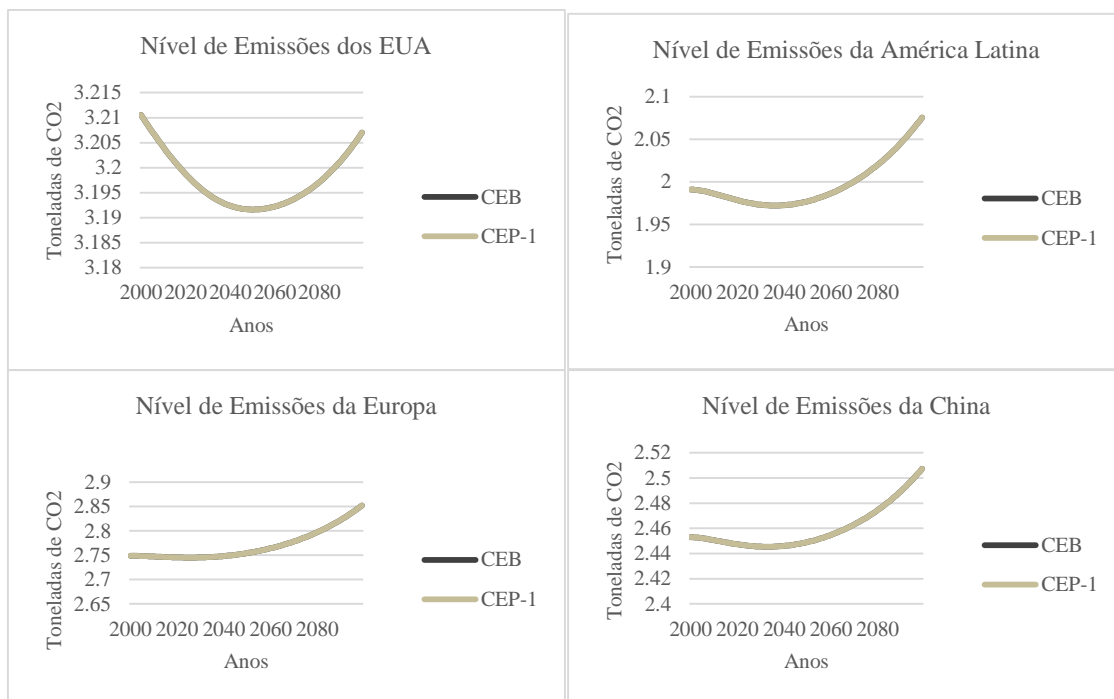


Figura 5 – Nível de emissões dos países desenvolvidos e dos países em desenvolvimento, considerando a restrição de emissão de GEE apenas para os países desenvolvidos, no período de 100 anos

Fonte: Resultados da pesquisa.