Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Produção

**Inovação e Desenvolvimento Sustentável – Um Estudo de Eficiência para Países com
Aplicação de Análise Envoltória de Dados**

Raphael Lovadine Tristão

São Carlos
2016

Raphael Lovadine Tristão

**Inovação e Desenvolvimento Sustentável – Um Estudo de Eficiência para Países com
Aplicação de Análise Envoltória de Dados**

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo como requisito à
obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção

Orientadora: **Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto**

Área de Concentração: Economia, Organizações e Gestão do
Conhecimento

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

T838i Tristão, Raphael Lovadine
Inovação e desenvolvimento sustentável - um estudo de eficiência para países com aplicação de análise envoltória de dados/ Raphael Lovadine Tristão; orientador Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto. -- São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Área de concentração Economia, Organizações e Gestão do Conhecimento). -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Análise envoltória de dados. 2. Eficiência. 3. Inovação tecnológica. 4. Desenvolvimento sustentável. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **RAPHAEL LOVADINE TRISTÃO**.

Título da dissertação: "Inovação e desenvolvimento sustentável – um estudo de eficiência para países com aplicação de análise envoltória de dados".

Data da defesa: 07.10.2016.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Associada **Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto**
(Orientadora)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Profa. Dra. **Flávia de Castro Camoto**

(Universidade Federal do Triângulo Mineiro/UFTM)

Aprovado

Profa. Associada **Silvia Helena Galvão de Miranda**

(Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ESALQ-USP)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:

Profa. Associada **Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus, minha família e amigos pela paciência e apoio nos momentos tanto de graduação quanto nos três anos de mestrado.

Gostaria de agradecer a Escola de Engenharia de São Carlos e aos seus professores e aos funcionários do Departamento de Engenharia de Produção os quais tive contato e me proporcionaram uma pós-graduação diferenciada qualitativamente no país.

Agradecer à Fundação CAPES pelo auxílio financeiro que proporcionou minha permanência na cidade de São Carlos.

Gostaria de agradecer em especial à Professora Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto do Departamento de Engenharia de Produção da EESC pela excelente e excepcional orientação as minhas pesquisas além de toda paciência, atenção e dedicação ao longo da pós-graduação. Sempre serei grato por ter me acolhido como orientado.

Gostaria ainda de agradecer aos Professores Naja Brandão Santana e Herick Fernando Moralles, ambos da Universidade Federal de São Carlos, pelo apoio acadêmico e teórico e inestimáveis contribuições durante a elaboração do presente trabalho de dissertação.

Também gostaria de agradecer em especial pessoas que conheci durante o período da pós-graduação e que levarei comigo também por toda vida. Em especial Michelle Scachetti, Bruno Dantas, Naja Santana e demais colegas de laboratório. Não poderia ter desejado ou imaginado pessoas melhores que estas ao ingressar no mestrado.

EPÍGRAFE

“The history of mankind is the history of ideas”.
Ludwig Von Mises

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
EPÍGRAFE.....	4
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	13
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo	16
1.2 Justificativa	17
1.3 Estrutura do Trabalho	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Estado da Arte.....	20
2.2 Crescimento e Desenvolvimento Econômico	26
2.3 Desenvolvimento Sustentável	31
2.4 Tecnologia e Inovação.....	36
3. REFERENCIAL METODOLÓGICO.....	38
3.1 Análise de Dados em Pannel	38
3.1.1 Modelo de Dados Empilhados	38
3.1.2 Modelo de Efeitos Fixos	39
3.1.3 Modelo de Efeitos Aleatórios.....	39
3.2 Análise Envoltória de Dados	41
3.2.1 Modelo CCR	42
3.2.2 Modelo BCC	44
3.2.3 Outros Modelos	48
3.2.4 Análise de Janela	48
3.2.5 Índice de Malmquist	49
3.2.6 Tratamento de Variáveis Indesejáveis	50
3.2.7 Ferramentas de Desempate	51
4. MÉTODO DE PESQUISA E DADOS	54

4.1 Dados.....	54
4.2 Método.....	59
4.2.1 Validação dos dados dos modelos de DEA	59
4.2.2 Aplicação dos modelos de DEA.....	60
4.2.3 Aplicação dos modelos em dois estágios	62
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5.1 Validação Econométrica Pré-DEA.....	65
5.2 Resultados da Análise por Envoltória de Dados	68
5.2.1 Resultados para o Modelo Econômico	68
5.2.2 Resultados para o Modelo Social	71
5.2.3 Resultados para o Modelo Ambiental.....	75
5.2.4 Resultados para o Modelo Desenvolvimento Sustentável	80
5.2.5 Discussão dos Resultados DEA	83
5.3 Resultados DEA em Dois Estágios	93
6. CONCLUSÕES	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
ANEXO A.....	114
ANEXO B	121
ANEXO C	122

RESUMO

TRISTÃO, R. L. **Inovação e Desenvolvimento Sustentável – Um Estudo de Eficiência para Países com Aplicação de Análise Envoltória de Dados**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Com o progresso do conhecimento e das técnicas de produção, e o avanço do consumo de recursos naturais e da degradação do meio, a relação em harmonia entre inovação tecnológica e sustentabilidade se faz cada vez mais importante. O conhecimento organizado e disponível aponta para o papel fundamental que a inovação desempenha no contexto do desenvolvimento sustentável. Sistemas produtivos mais limpos e que consumam menos recursos são o caminho central para, como definido pelo relatório Brundtland, a sociedade atual satisfazer suas necessidades sem comprometer a capacidade das sociedades futuras satisfazerem as suas. Nesse contexto, é importante conhecer o nível de eficiência com que os países conseguem transformar inovações tecnológicas em desenvolvimento econômico, social e ambiental - o tripé da sustentabilidade – e, assim, identificar melhores práticas em termos de política global. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é analisar a contribuição da inovação tecnológica para a eficiência em termos econômicos, sociais e ambientais de 79 países, entre os anos de 2000 e 2010. A validação econométrica permitiu observar que as patentes aplicadas (variável de inovação tecnológica considerada neste trabalho) contribuem positivamente para o desenvolvimento econômico (dado pelo PIB), social (dado pela expectativa de vida), e ambiental (dado pela emissão de CO₂). Destaca-se este último caso no qual o aumento do número de patentes aplicadas proporciona o aumento das emissões de CO₂, denotando que os avanços tecnológicos são insuficientes para deter a emissão de poluentes, ou que as novas tecnologias não têm considerado a sustentabilidade em seu desenvolvimento. Os resultados da DEA demonstraram, em média, uma predominância dos países europeus (principalmente membros da OECD) dentre os mais eficientes nos quatro modelos desenvolvidos. As análises de DEA em dois estágios permitiram concluir que, quando tratada de forma exógena ao modelo, a inovação tecnológica contribui positivamente para a eficiência econômica e social, porém impacta de forma negativa, diminuindo a eficiência ambiental e de desenvolvimento sustentável. Isso denota a necessidade de orientação de políticas públicas e mudanças culturais no sentido da sustentabilidade, aumentando o desempenho e produtividade do uso dos recursos e de reaproveitamento de descartes e diminuindo a produção residual.

Palavras-chave: Análise envoltória de dados; Eficiência; Inovação tecnológica; Desenvolvimento sustentável

ABSTRACT

TRISTÃO, R. L. **Innovation and Sustainable Development - A Efficiency Study for Countries with a Data Envelopment Analysis Application**. Dissertation (Master). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Due to the progress of knowledge and production techniques, and the advance of consumption of natural resources and degradation of the environment, the harmonious relationship between technological innovation and sustainability becomes increasingly important. The organized and available knowledge points to the key role that innovation plays in the context of sustainable development. Cleaner production systems with less resource consumption is the central way to, as defined by the Brundtland report, the current society meet their needs without compromising the ability of future societies meet theirs. In this context, it is important to know the level of efficiency with which countries can transform technological innovations into economic, social and environmental - the sustainability triple bottom line - and thus identify best practices in terms of overall policy. Thus, the objective of this study is to analyze the contribution of technological innovation for efficiency in economic, social and environmental terms from 79 countries between the years 2000 and 2010. Through econometric validation it was possible to observe that the applied patents (technological innovation variable considered in this study) contribute positively to economic development (given by GDP), social (given by life expectancy), and environmental (given by CO₂ emissions). Noteworthy is the latter case where the increase in the number of patents applied provides the increase of CO₂ emissions, showing that technological advances are insufficient to stop the emission of pollutants, or that new technologies have not considered sustainability in its development. The DEA results showed, on average, European countries (mainly members of the OECD) predominance among the most efficient countries in the four models developed. The DEA two stages analyses showed that when treated exogenously to the model, technological innovation contributes positively to the economic and social efficiency, but impacts negatively, reducing the environmental and sustainable development efficiency. Denoting the need to guide public policy and cultural changes towards sustainability, increasing performance and productivity of resource use and disposal reuse and reducing waste production.

Keywords: Data envelopment analysis; Efficiency; Technological innovation; Sustainable development

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama do Desenvolvimento Sustentável.....	33
Figura 2 - Testes para escolha de modelos em dados em painel.....	40
Figura 3 - Fronteira DEA BCC Clássica e Invertida.....	52
Figura 4 - Classificação das variáveis	54
Figura 5 - Usos das variáveis selecionadas na literatura	57
Figura 6 - Modelos DEA em estudo e suas respectivas variáveis.....	61
Figura 7 - Modelos DEA em dois estágios em estudo e suas respectivas variáveis	63
Figura 8 - Validação das variáveis pela regressão em painel	68
Figura 9 - Composição de variáveis dos modelos DEA após validação via regressão	68
Figura 10 - Evolução da contribuição média das variáveis inputs para a eficiência econômica dos países entre 2000 e 2010.....	70
Figura 11 - Produtividade total dos fatores (índice Malmquist) e eficiência (<i>catch-up</i>) acumulados (em média dos países) em 2010 para o modelo econômico	71
Figura 12 - Evolução da contribuição média das variáveis inputs para a eficiência social dos países entre 2000 e 2010	74
Figura 13 - Produtividade total dos fatores (índice Malmquist) e eficiência (<i>catch-up</i>) acumulados (em média dos países) em 2010 para o modelo social	75
Figura 14 - Evolução da contribuição média das variáveis inputs para a eficiência ambiental dos países entre 2000 e 2010.....	78
Figura 15 - Produtividade total dos fatores (índice Malmquist) e eficiência (<i>catch-up</i>) acumulados (em média dos países) em 2010 para o modelo ambiental	79
Figura 16 - Emissões totais de CO ₂ pelos 79 países em estudo entre os anos de 2000 e 2010.....	79
Figura 17 - Evolução da contribuição média das variáveis inputs para a eficiência de desenvolvimento sustentável dos países entre 2000 e 2010	82
Figura 18 - Produtividade total dos fatores (índice Malmquist) e eficiência (<i>catch-up</i>) acumulados (em média dos países) em 2010 para o modelo desenvolvimento sustentável.....	83
Figura 19 - Melhores indicadores (em média) das variáveis de <i>output</i>	84
Figura 20 - Melhores indicadores (em média) das variáveis de <i>input</i>	85
Figura 21 - Produtividade Total dos Fatores Econômicos (Índice Malmquist) acumulado dos EUA, Índia e Irlanda entre os anos de 2000 e 2010	86
Figura 22 - Indicadores (em média) das variáveis de <i>input</i> dos países mais eficientes socialmente	87
Figura 23 - Produtividade Total dos Fatores Sociais (Índice Malmquist) acumulado da Islândia, Luxemburgo e Chipre entre os anos de 2000 e 2010	88
Figura 24 - Indicadores (em média) das variáveis de <i>input</i> dos países mais eficientes ambientalmente	89
Figura 25 - Valor adicionado da indústria da Armênia, Islândia e Madagáscar entre os anos de 2000 e 2010	90
Figura 26 - Indicadores (em média) das variáveis de <i>input</i> dos países mais eficientes no desenvolvimento sustentável.....	91
Figura 27 - Produtividade Total dos Fatores Econômicos (Índice Malmquist) acumulado (em média dos países) entre os anos de 2000 e 2010	95
Figura 28 - Produtividade Total dos Fatores Sociais (Índice Malmquist) acumulado (em média dos países) entre os anos de 2000 e 2010.....	96

Figura 29 - Produtividade Total dos Fatores de Desenvolvimento Sustentável (Índice Malmquist) acumulado (em média dos países) entre os anos de 2000 e 2010	99
Figura 30 - Emissão total mundial de CO2 entre os anos de 1960 e 2011	121
Figura 31 - Os 10 países com maiores ganhos e 10 países com maiores perdas acumuladas de PTF, no modelo econômico, de 2000 a 2010.....	122
Figura 32 - Os 10 países com maiores ganhos e 10 países com maiores perdas acumuladas de PTF, no modelo social, de 2000 a 2010	122
Figura 33 - Os 10 países com maiores ganhos e 10 países com maiores perdas acumuladas de PTF, no modelo ambiental, de 2000 a 2010	123
Figura 34 - Os 10 países com maiores ganhos e 10 países com maiores perdas acumuladas de PTF, no modelo desenvolvimento sustentável, de 2000 a 2010	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Retornos de escala do modelo BCC para <i>input</i>	46
Tabela 2 - Retornos de escala do modelo BCC para <i>output</i>	47
Tabela 3 - Ferramentas para o tratamento de variáveis indesejáveis	51
Tabela 4 - Sumário estatístico das variáveis	55
Tabela 5 - Matriz de correlação das variáveis	58
Tabela 6 - Conjunto de países em estudo e suas respectivas classificações regionais	58
Tabela 7 - Horizonte temporal das janelas	62
Tabela 8 - Resultados da regressão para o modelo econômico	65
Tabela 9 - Resultados da regressão para o modelo ambiental	66
Tabela 10 - Resultados da regressão para o modelo social	67
Tabela 11 - Teste de autocorrelação em dados em painel	67
Tabela 12 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela dos 20 países mais eficientes sob a ótica econômica.....	69
Tabela 13 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela para sub-regiões sob a ótica econômica.....	70
Tabela 14 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela dos 20 países mais eficientes sob a ótica social .	72
Tabela 15 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela para sub-regiões sob a ótica social	73
Tabela 16 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela dos 20 países mais eficientes sob a ótica ambiental	76
Tabela 17 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela dos 10 países menos eficientes sob a ótica ambiental.....	76
Tabela 18 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela para sub-regiões sob a ótica ambiental	77
Tabela 19 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela dos 20 países mais eficientes sob a ótica desenvolvimento sustentável	80
Tabela 20 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela dos 20 países mais eficientes sob a ótica desenvolvimento sustentável	81
Tabela 21 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela dos 10 países menos eficientes sob a ótica desenvolvimento sustentável	81
Tabela 22 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela para sub-regiões sob a ótica desenvolvimento sustentável	81
Tabela 23 - <i>Ranking</i> dos resultados da análise de janela para sub-regiões sob a ótica desenvolvimento sustentável	82
Tabela 24 - Teste de autocorrelação em dados em painel do segundo estágio	93
Tabela 25 - Resultados da regressão para o modelo econômico do segundo estágio	94
Tabela 26 - Resultados da regressão para o modelo social do segundo estágio	95
Tabela 27 - Resultados da regressão para o modelo ambiental do segundo estágio	97
Tabela 28 - Resultados da regressão para o modelo de desenvolvimento sustentável do segundo estágio	98
Tabela 29 - Resultado da análise de janela para os modelos econômico, social, ambiental e desenvolvimento sustentável	114
Tabela 30 - Índice de Malmquist (em média dos agrupamentos) para a aplicação econômica.....	116
Tabela 31 - Índice de <i>Catch-Up</i> (em média dos agrupamentos) para a aplicação econômica	116
Tabela 32 - Índice de <i>Catch-Up</i> (em média dos agrupamentos) para a aplicação econômica	117
Tabela 33 - Índice de Malmquist (em média dos agrupamentos) para a aplicação social.....	117

Tabela 34 - Índice de <i>Catch-Up</i> (em média dos agrupamentos) para a aplicação social	117
Tabela 35 - Índice de <i>Catch-Up</i> (em média dos agrupamentos) para a aplicação social	118
Tabela 36 - Índice de Malmquist (em média dos agrupamentos) para a aplicação ambiental	118
Tabela 37 - Índice de <i>Catch-Up</i> (em média dos agrupamentos) para a aplicação ambiental	118
Tabela 38 - Índice de <i>Catch-Up</i> (em média dos agrupamentos) para a aplicação ambiental	119
Tabela 39 - Índice de Malmquist (em média dos agrupamentos) para a aplicação desenvolvimento sustentável	119
Tabela 40 - Índice de <i>Catch-Up</i> (em média dos agrupamentos) para a aplicação desenvolvimento sustentável	119
Tabela 41 - Índice de <i>Catch-Up</i> (em média dos agrupamentos) para a aplicação desenvolvimento sustentável	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APEC	Cooperação Econômica Ásia-Pacífico
ASEAN	Associação de Nações do Sudeste Asiático
BCC	Banker, Charnes e Cooper
BRICS	<i>Brazil, Russia, India, China e South Africa</i>
C&T	Ciência & Tecnologia
CCR	Charnes, Cooper e Rhodes
CO ₂	Dióxido de Carbono
CRS	Retornos Constantes à Escala (<i>Constant Returns to Scale</i>)
DEA	Análise por Envoltória de Dados (<i>Data Envelopment Analysis</i>)
DMU	Unidades Tomadoras de Decisão (<i>Decision Making Units</i>)
FDH	<i>Free Disposal Hull</i>
ERM	<i>Enhanced Russel Measure</i>
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
MQGF	Mínimos Quadrados Generalizados Factíveis
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PPC	Paridade de Poder de Compra
PTF	Produtividade Total dos Fatores
RM	Medida de Russel (<i>Russel Measure</i>)
SBM	<i>Slack Based Measure</i>
SO ₂	Dióxido de Enxofre
VRS	Retornos Variáveis à Escala (<i>Variable Returns to Scale</i>)
WIPO	<i>World Intellectual Property Organization</i>

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade das atividades humanas sobre os recursos do planeta tem sido uma das principais questões discutidas nos últimos 30 anos. Nesse período, a população, a economia, o consumo de recursos energéticos e a emissão de resíduos mais do que dobraram no mundo, intensificando os debates sobre os impactos da humanidade no ambiente. Até que ponto o planeta suportará o crescimento acelerado do consumo dos recursos e os impactos residuais da atividade humana no meio ou como a sociedade deve configurar suas ações de modo a aumentar a sinergia e redução de impactos aos sistemas naturais, são alguns dos questionamentos que ainda buscam respostas mais precisas.

O primeiro estudo de maior impacto acerca desses questionamentos foi o intitulado “Limites do Crescimento¹” publicado pelo Clube de Roma² em 1972. Segundo Blewitt (2015), o relatório procura combinar o otimismo da capacidade humana de inovação para sobreescrever problemas ambientais e demográficos a um modelo muito bem constituído, que projeta graves consequências econômicas e ambientais em caso de manutenção da tendência de crescimento e consumo da sociedade. Pela primeira vez discutiu-se a necessidade de impor limites ao crescimento econômico e seus resíduos.

Em 1987, outro estudo de grande impacto foi publicado. “Nosso Futuro Comum” (também chamado de relatório Brundtland) foi resultado, de acordo com Blewitt (2015), de uma iniciativa da Comissão Mundial para o Ambiente e Desenvolvimento (*World Commission on Environment and Development* – WCED) para estabelecer o desenvolvimento sustentável como o conceito e prática mais importante desse tempo. A definição de desenvolvimento sustentável presente no relatório é uma das mais difundidas e citadas. “Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que preenche as necessidades do presente sem comprometer a habilidade das gerações futuras de preencherem suas próprias” (WCED, 1987, p.43).

Conforme Mitcham (1995), o “Nosso Futuro Comum” obteve grande aceitação ao conseguir conciliar as visões ambientalistas e econômicas, propondo não um conceito sobre limites ou sobre desenvolvimento, mas sobre um desenvolvimento de forma sustentável.

¹ MEADOWS, D. H. et al.. **The limits to growth**. New York, v. 102, 1972.

² Grupo multidisciplinar internacional fundado em 1968 pelo italiano Aurelio Peccei e pelo escocês Alexander King com o intuito de discutir questões de âmbito internacional e principalmente ligadas à sustentabilidade.

Bastante influenciado pelas ideias do relatório “Nosso Futuro Comum”, a Rio-92, conferência para o ambiente e desenvolvimento das Nações Unidas, produziu, de acordo com Blewitt (2015), diversos acordos, entre eles a chamada Agenda 21. O texto contém diversos tópicos da temática econômica, social e ambiental como o combate à pobreza, mudanças no padrão de consumo, proteção e promoção das condições de saúde humana, combate ao desmatamento, conservação da biodiversidade, proteção da qualidade e do acesso aos recursos de água potável, entre outros.

A Agenda 21 está voltada para os problemas prementes de hoje e tem o objetivo, ainda, de preparar o mundo para os desafios do próximo século. Reflete um consenso mundial e um compromisso político no nível mais alto no que diz respeito a desenvolvimento e cooperação ambiental. O êxito de sua execução é responsabilidade, antes de mais nada, dos Governos. Para concretizá-la são cruciais as estratégias, os planos, as políticas e os processos nacionais. A cooperação internacional deverá apoiar e complementar tais esforços nacionais. Nesse contexto, o sistema das Nações Unidas tem um papel fundamental a desempenhar. Outras organizações internacionais, regionais e sub-regionais também são convidadas a contribuir para tal esforço. A mais ampla participação pública e o envolvimento ativo das organizações não governamentais e de outros grupos também devem ser estimulados (CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1999, p. 3).

Tendo em vista os limites necessários a atual forma de desenvolvimento, a inovação tecnológica tem papel fundamental dentro do desenvolvimento sustentável. Embora não suficiente para que a economia evolua dentro dos limites ambientais, Abramovay (2012) ressalta que a eficiência técnico-ambiental tem progredido muito nos últimos anos, isto é, a quantidade de recursos materiais e energia consumidos por produto gerado tem se reduzido. “Nos países da OCDE, entre 1975 e 2000 o uso de recursos físicos por unidade de produto (a chamada intensidade material da vida econômica) caiu praticamente pela metade, o que é um desempenho impressionante” (ABRAMOVAY, 2012, p 91). Casagrande Jr. (2004) também destaca a importância da inovação tecnológica no contexto do desenvolvimento sustentável. Para o autor, a presença das teorias de Ciclo de Vida dos Produtos (*Life Cycle Design – LCD*) dentro das empresas é fundamental, pois a redução do uso de recursos e energia geram economia financeira, além de reduzirem os descartes de resíduos no ambiente, resultando em produtos de maior valor agregado.

Para Vollenbroek (2002), o processo iniciado pelo Clube de Roma, concomitante a crise do petróleo de 1973, mostra que os recursos são limitados, e nos anos posteriores também podemos

observar que os recursos renováveis também apresentam limitações. Nesse espaço o autor destaca que as inovações são importantes para a superação dessas limitações, preenchendo as necessidades atuais (refletidas pelo autor como consequências também do surgimento de novas tecnologias, como por exemplo, a telefonia celular) sem comprometer as habilidades futuras, conforme proposto pelo relatório Brundtland. Assim considerando as inovações tecnológicas, é importante discutir de que forma serão preenchidas essas necessidades, e quais poderão ou não ser preenchidas. Vollenbroek sumariza que é necessária a aproximação do *homo faber*³ do *homo volens*⁴, de forma que as inovações e a tecnologia sigam a humanidade e não o contrário.

Com base nisso, pode-se formular a hipótese de que países inovadores são mais hábeis, mais eficientes em produzir desenvolvimento sustentável. Dessa forma, este texto de dissertação busca observar aspectos da relação entre inovação tecnológica e desenvolvimento sustentável. O presente trabalho tem por base as propostas de futuros estudos apresentadas por Santana (2012), tratando-se, assim, de uma replicação de metodologia com ampliação de escopo e adição de novas abordagens.

1.1 Objetivo

Dado o contexto apresentado, o objetivo geral deste estudo é **verificar a contribuição da inovação tecnológica para a eficiência de países em termos de desenvolvimento sustentável (aspectos econômicos, sociais e ambientais)**. Em linhas gerais, observar e comparar como diferentes países do mundo convertem tecnologia em desenvolvimento sustentável.

Para tal, definiram-se os seguintes objetivos secundários:

1. Análise e validação econométrica das variáveis dos modelos econômico, social, ambiental e de desenvolvimento sustentável para 79 países, entre os anos de 2000 e 2010;
2. Análise envoltória de dados (DEA) para estimar a eficiência de conversão de tecnologia em desenvolvimento sustentável;
3. Comparação e análise dos resultados das eficiências;

³ Homem criador

⁴ Homem da vontade

4. Análise econométrica da contribuição da inovação tecnológica para a eficiência utilizando regressão e os resultados de DEA.

Dessa forma, ao final do estudo, espera-se que os resultados obtidos demonstrem que, conforme exposto, as inovações tecnológicas contribuem positivamente aos modelos simulados de desenvolvimento propostos para cada um dos três pilares da sustentabilidade, tornando os países mais eficientes na transformação de seus *inputs* em *outputs*.

1.2 Justificativa

Diante da evidente necessidade, mostrada pela literatura, de uma imersão da economia global na discussão e aplicação das práticas de desenvolvimento sustentável, este trabalho justifica-se pelo potencial de seus resultados oferecerem parâmetros que poderão contribuir para a discussão e orientação de diretrizes de políticas econômicas, com vistas ao desenvolvimento sustentável. Isso, além da possibilidade de comparação do cenário brasileiro com o de países em diferentes estágios de desenvolvimento humano e econômico.

1.3 Estrutura do Trabalho

Em sequência ao primeiro capítulo, composto pela “**Introdução**”, o presente trabalho divide-se em mais quatro partes, da seguinte forma:

O capítulo 2, intitulado “**Revisão Bibliográfica**”, apresenta a revisão da literatura acerca do assunto tratado neste trabalho, isto é, a Análise por Envoltória de Dados e suas aplicações no contexto da sustentabilidade. O presente trabalho encontra-se no campo das relações entre inovação e desenvolvimento sustentável, assim, este capítulo ainda é composto por quatro subdivisões, que trazem o estado da arte e discutem os conceitos de desenvolvimento econômico, desenvolvimento sustentável e inovação tecnológica.

O capítulo 3, intitulado “**Referencial Metodológico**”, apresenta o arcabouço teórico do qual será extraído o método a ser utilizado, nesse caso, em destaque, a DEA e seus modelos e ferramentas principais. Além de uma sucinta exposição sobre os modelos econométricos de dados em painel, a serem utilizados para a validação estatística das variáveis selecionadas para os cálculos da DEA.

O capítulo 4, intitulado “**Método de Pesquisa e Dados**”, apresenta as variáveis selecionadas para os modelos DEA, bem como a procedência dos dados que irão preenchê-las. Também apresenta o método selecionado do referencial metodológico, bem como sua justificativa.

O capítulo 5, intitulado “**Resultados e Discussões**”, apresenta resultados obtidos das regressões e dos modelos DEA, bem como as discussões sobre eles.

Por fim, o capítulo 6, intitulado “**Conclusões**”, apresenta as considerações finais atingidas pelas discussões dos resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar o estado da arte, utilizando uma estrutura semelhante à revisão sistemática, da análise envoltória de dados, dentro do contexto de desenvolvimento sustentável de países, além de revisão de literatura acerca dos temas intrínsecos ao contexto abordado: desenvolvimento econômico, desenvolvimento sustentável e inovação tecnológica.

Segundo Sampaio e Mancini (2007), a revisão sistemática consiste em uma pesquisa estruturada na literatura disponível acerca de um tema ou área do conhecimento. Ainda conforme os autores, definindo palavras-chaves e bases de dados, pode-se estabelecer um roteiro de pesquisa a ser seguido. Dessa forma, a revisão sistemática que compõem o tópico **“2.1 Estado da Arte”** deste trabalho segue o seguinte roteiro:

- a) Identificação do problema: a análise envoltória de dados é uma ferramenta muito utilizada nas áreas de microeconomia e de auxílio à tomada de decisões, sendo difundida também em outras diversas áreas do conhecimento. A revisão busca apontar trabalhos que utilizam aplicações de DEA em estudos de desenvolvimento sustentável, no escopo de comparação entre países. E, também, estudos que consideram variáveis de inovação tecnológica nesse mesmo contexto;
- b) Definição das bases de dados e palavras-chave: as bases de dados utilizadas foram o Scielo⁵, *Web of Science*⁶, e Scopus⁷, todas acessadas via Universidade de São Paulo, por conterem periódicos relacionados ao contexto deste trabalho, e por possuírem fator de impacto de publicação e abrangência internacional. O corte temporal definido compreende o período entre 1978 (primeira publicação sobre análise envoltória de dados) e 2016. As palavras-chave inseridas nos campos de pesquisa e busca, das referidas bases de dados consistem em combinações diversas das palavras: *data envelopment analysis* (presente em todas as combinações), *sustainable development*, *innovation*, *technological innovation*, *cross-country*, *sustainability*, *environmental efficiency*, *economic efficiency*, *social efficiency*;

⁵ Disponível em: www.scielo.org

⁶ Disponível em: webofknowledge.com

⁷ Disponível em: www.scopus.com

- c) Definição dos critérios de inclusão dos artigos: foram considerados e incluídos artigos completos, em língua portuguesa e inglesa, disponíveis para *download* e não repetidos;
- d) Definição de filtros de leitura dos artigos: os artigos foram filtrados primeiramente com a leitura do título e do resumo, e em sequência com a leitura completa dos artigos.

2.1 Estado da Arte

Com o intuito de verificar o desempenho macroeconômico de países, Lovell, Pastor e Turner (1995) analisaram 19 países membros da OECD (14 europeus e 5 não-europeus), no período entre 1970 e 1990, sobre, primeiramente, a capacidade que os agentes macroeconômicos de cada país possuíam em fornecer quatro serviços à sua população: alto nível de PIB real per capita, baixas taxas de inflação, baixas taxas de desemprego e balança comercial favorável. Em uma segunda análise, os autores adicionaram mais dois serviços (de caráter ambiental): emissões de carbono e emissões de nitrogênio. Para tal, os autores desenvolveram uma programação própria de DEA, a partir de um modelo aditivo incorporando as folgas. Nesse modelo, os serviços fornecidos compuseram as variáveis de *output*, e a variável de *input* representou os agentes macroeconômicos, sendo dada por um vetor escalar unitário. Ao final das análises, os autores concluíram que, considerando apenas os primeiros quatro serviços, não houve diferença significativa no ranking dos países europeus e não-europeus, contudo, ao se incluir as duas variáveis ambientais, a eficiência dos países europeus reduziu, sendo significativamente menor do que a eficiência dos países não-europeus.

Tendo em vista o desempenho socioeconômico, Golany e Thore (1997) analisaram um conjunto de 72 países, entre 1970 e 1985, utilizando o modelo DEA CCR orientado para *input*. Com a hipótese de que se um país se desenvolve tecnologicamente e economicamente, também, avança no campo dos benefícios sociais, os autores tomaram como variáveis de *output*: taxa de crescimento do PIB per capita, taxa de mortalidade infantil entre 0 e 1 anos, taxa de escolarização no ensino médio e a proporção de seguros sociais pagos com relação ao PIB nominal; como variáveis de *input*: proporção do investimento doméstico real com relação ao PIB real, proporção do gasto real em consumo líquido do governo em educação e defesa com relação ao PIB real e, por fim, proporção do gasto em educação com relação ao PIB nominal. Após os resultados, os autores puderam classificar os países em três grupos: a) eficientes com retornos constantes (com forte

crescimento econômico e níveis superiores de educação e políticas sócias), b) ineficientes com retornos decrescentes (países “maduros” que já atingiram retornos marginais decrescentes nos investimentos em educação, saúde, e políticas sociais) e c) ineficientes com retornos crescentes (países ainda em desenvolvimento econômico e social).

Maudos, Pastor e Serrano (1999) utilizaram o índice de Malmquist-DEA com o objetivo de analisar a produtividade do capital humano para os países da OECD, no período entre 1975 e 1990. O modelo dos autores tem como variável de *output* o PIB real (em preços internacionais) e como variáveis de *input* o número total de pessoas empregadas, o estoque de capital e o estoque de capital humano (definido pelos autores como o número de anos de escolaridade, completados pela população ocupada). Os autores concluíram que a inclusão do capital humano em análises de produtividade total entre países é muito importante e, neste estudo, a produtividade do Japão no período aumenta significativamente com a inclusão dessa variável na análise.

Zaim e Taskim (2000), objetivando calcular a eficiência ambiental para países da OECD, utilizaram DEA em um modelo com variáveis de *output* desejável PIB e *output* indesejável emissões de CO₂ e variáveis de *input* total de pessoas empregadas e estoque de capital, em um corte temporal entre os anos de 1980 e 1990. Os autores concluíram que, considerando o impacto no PIB, uma redução em 10% nas emissões de CO₂ é viável em apenas nove países, enquanto a redução em 1% é viável em 16 países.

Krüger (2003) utilizou o índice de Malmquist-DEA para medir a produtividade de 87 países, no período entre os anos de 1960 e 1990. O autor utilizou como variável de *output* o PIB real (a preços internacionais de 1985) e como variáveis de *inputs* o número de trabalhadores e estoque de capital. Krüger (2003) concluiu que só houve progresso tecnológico (componente do índice de Malmquist-DEA), naquele período nos países da OECD. Com exceção dos países da África subsaariana, todos os países apresentaram eficiência no movimento de *catch-up* (aproximação da fronteira de eficiência). Analisando os subperíodos de 1960-1973 e 1973-1990, a produtividade diminuiu para todos os países, exceto para os países asiáticos após 1973.

Abordando o aspecto da inovação tecnológica do desenvolvimento econômico, Wang e Huangb (2007) aplicaram DEA para obter a eficiência de atividades de P&D de 30 países. Os autores utilizaram como variáveis de *input* investimentos em P&D, estoque de capital em P&D, número de pesquisadores e número de técnicos; como variáveis de *output* adotaram número de patentes e publicações acadêmicas. Ao final, concluíram que menos da metade dos países são

eficientes no setor de P&D e que a maioria dos países são mais eficientes em produzir publicações acadêmicas do que patentes.

No campo da sustentabilidade, Hu e Kao (2007) utilizaram a DEA para estudar a eficiência no uso de energia entre os países da APEC⁸. Dada a intenção de minimizar o uso dos *inputs*, e manter os níveis de *outputs*, os autores utilizaram um modelo DEA com orientação para o *input*. No modelo elaborado, o PIB PPC de cada país foi utilizado como único *output*; força de trabalho, estoque de capital e consumo de energia foram os *inputs* considerados. Por meio da modelagem, os autores calcularam um índice meta de conservação de energia, comparando o atual nível de consumo de energia com a fronteira de eficiência, obtida no modelo. Esses autores observaram que, no período em análise, com exceção do Canadá e Nova Zelândia, os países da APEC se tornaram mais eficientes na conservação e no consumo de energia, muito em função do uso de novas tecnologias. É possível que os países tenham um consumo de energia mais eficiente sem reduzir o nível de produto e, para isso, podem ser utilizadas novas tecnologias ou trocar fatores de produção de uso intenso de energia por fatores de menor intensidade.

Nessa mesma linha de eficiência energética, Chien e Hu (2007) tomaram como variáveis de *input* trabalho, estoque de capital e consumo de energia; como variável de *output* o PIB. Os autores analisaram 45 países nos anos de 2001 e 2002, utilizando o modelo DEA CCR orientado para *output*. Com os resultados, os autores concluíram que conforme a participação de energia renovável cresce no montante total, a eficiência técnica dos países aumenta. Os autores também destacam que os países considerados desenvolvidos, da OECD, são mais eficientes nesse quesito do que os países em desenvolvimento, não pertencentes à OECD.

Também no contexto do desenvolvimento econômico sustentável, Bampatsou e Hadjiconstantinou (2009) utilizaram DEA para estimar a eficiência técnica produtiva de 31 países europeus, para o ano de 2004. O modelo definido pelos autores possuía duas variáveis de *outputs* (PIB e emissões de CO₂) e duas variáveis de *input*, i) índice de consumo de energia limpa (soma dos consumos de energia nuclear, geotérmica e hidroelétrica) e ii) índice de consumo de energia suja (soma dos consumos de energia proveniente de petróleo, carvão e gás natural). A variável PIB foi definida como *output* desejável e a variável emissão de CO₂ como *output* indesejável. Dessa

⁸ A Cooperação Econômica Ásia-Pacífico é formada por países da Ásia, Américas e Oceania, sendo eles: Austrália, Brunei, Canadá, Chile, China, Indonésia, Japão, Coreia do Sul, Malásia, México, Nova Zelândia, Papua Nova Guiné, Peru, Filipinas, Rússia, Singapura, Taiwan, Tailândia, EUA, Vietnam e Hong Kong. No estudo de Hu e Kao (2007), não foram considerados Brunei, Papua, Rússia e Vietnam por falta de dados.

forma os autores optaram por tratar a variável emissão de CO₂ pela transformação não-linear monotônica decrescente (1/CO₂). Os autores constataram que a diminuição do consumo de energia suja e o aumento do consumo de energia limpa, favorecem a eficiência produtiva dos países, aumentando a capacidade de desenvolvimento sustentável de longo prazo.

Halkos e Tzeremes (2009), por meio da análise de janela da DEA, objetivavam construir a eficiência ambiental de 17 países da OECD, entre 1980 e 2002. Assim como Bampatsou e Hadjiconstantinou (2009), Halkos e Tzeremes (2009) adotaram como variável de *output* desejável o PIB, mas utilizaram como variável de *output* indesejável emissões per capita de enxofre. Quanto aos *inputs* do modelo, os autores se aproximaram da função de produção neoclássica, considerando como variáveis o estoque de capital e o número total de pessoas empregadas. Os autores concluíram que Japão, Áustria, Holanda, Suécia e Dinamarca foram os países mais ambientalmente eficientes no período analisado, constatando por fim que o crescimento econômico nem sempre garante a proteção e a manutenção ambiental.

Zhou, Ang e Han (2010) propuseram uma modificação ao Índice de Malmquist-DEA para calcular o desempenho das emissões de CO₂ ao longo do tempo. Com uma amostra dos 18 maiores países emissores de CO₂, no horizonte temporal entre os anos de 1997 e 2004, os autores concluíram que a produtividade total dos fatores de emissão de CO₂ aumentaram em 24%, principalmente em decorrência do avanço tecnológico. O modelo utilizado pelos autores era composto por estoque de capital, força de trabalho total e consumo de energia primária como *inputs*; PIB e emissão de CO₂ como *outputs*.

Nessa mesma linha, Yeh, Chen e Lai (2010) utilizaram a DEA para comparar a eficiência do consumo de energia entre China e Taiwan (divididos em 31 regiões), no período entre os anos de 2002 e 2007. O modelo dos autores compreendia três variáveis de *output*, sendo duas indesejáveis, emissões de CO₂ e emissões de SO₂, e uma desejável, o PIB; e cinco variáveis de *input*, estoque de capital, número de pessoas empregadas, consumo de carvão, consumo de petróleo e consumo de eletricidade. Com os resultados, os autores concluíram que a região leste da China é mais eficiente no consumo de energia do que o oeste chinês. Também observaram que, no período, as emissões chinesas de CO₂ são mais de 11% superiores ao que deveriam ser, enquanto em Taiwan esse número é próximo de 1,5%.

Aguado e Martinez (2012) analisaram a eficiência de 29 países da OECD no contexto do desenvolvimento sustentável. Utilizando um modelo DEA CCR orientado para *output*, os autores

tomaram como variáveis de *input*: a) nível de conclusão do ensino superior, b) taxa de desemprego harmonizada e c) taxa de reciclagem de lixo; e como *outputs*: a) PIB per capita, b) emissão de CO₂, c) índice de Gini e d) proporção de famílias com crianças vivendo com renda inferior a metade da renda média nacional. Após os resultados, os autores concluíram que é possível atingir simultaneamente desenvolvimento social e a manutenção do meio ambiente, sendo ambos positivamente correlacionados com o crescimento do PIB.

Tendo em vista a redução das emissões de CO₂, Choi, Zhang e Zhou (2012) utilizaram a DEA, mais precisamente o modelo dual (ou envelope) SBM, para estimar o custo marginal de abatimento das emissões de CO₂ na China, em 30 províncias entre 2001 e 2010. Como variáveis de *input* os autores consideraram estoque de capital, consumo de energia e trabalho, e como variáveis de *output* o PIB e a emissão de CO₂. Os autores concluíram que, de forma geral, as províncias chinesas são ineficientes ambientalmente, sendo que o país ainda se encontra no estágio inicial das políticas de abatimento de carbono. Também concluíram que essa ineficiência pode estar atrelada ao alto custo marginal do abatimento de emissões no país, bem maior que a média internacional.

Mariano e Rebelatto (2014) calcularam a eficiência social, riqueza convertida em qualidade de vida, de 101 países, entre 2000 e 2008. Os autores utilizaram, para tal, uma das mais novas abordagens de DEA, o índice triplo, uma combinação dos modelos tradicional, multiplicativo e invertido. O modelo dos autores era composto por uma variável de *input* e 10 variáveis de *outputs*, sendo: *input* o PIB per capita (em paridade de poder de compra) e *outputs* a expectativa de vida ao nascer, taxa de mortalidade infantil, expectativa de anos de escolarização, média de anos de escolarização, taxa de desemprego, taxa de inflação, índice de Gini, expectativa de vida das mulheres ao nascer, taxa de homicídios intencional, e taxa de saneamento. Os resultados demonstraram que os países do leste europeu ainda estão bastante atrasados em relação a eficiência social, e que mesmo os países mais desenvolvidos, com bons indicadores sociais, também não se demonstraram socialmente eficientes. Os países da ex-União Soviética apresentaram bom desempenho social, sendo os mais eficientes.

A tese de Santana (2012), cuja proposta de futuros estudos baseia o presente trabalho, resultou no artigo de Santana et al. (2014). O artigo objetivava analisar a eficiência dos países

BRICS⁹ em transformar investimentos em inovação tecnológica em desenvolvimento sustentável, no período entre 2000 e 2007. Utilizando uma função de produção do tipo Cobb-Douglas como modelo econométrico e, como variáveis a Formação Bruta de Capital Fixo, População Ocupada e Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), a autora optou pelo modelo de DEA BCC orientada ao *output*, pois desejava manter os níveis dos *inputs* e maximizar os níveis dos *outputs*. Os resultados demonstraram que os gastos com P&D contribuíram de forma positiva com desenvolvimento econômico (crescimento do PIB) e social (aumento da expectativa de vida). Dentre os BRICS, o Brasil foi o país mais eficiente na conversão de investimentos em P&D em crescimento econômico. Em termos ambientais, a África do Sul foi o país mais eficiente na relação emissão de CO₂ e investimentos em P&D e no campo social o Brasil também demonstrou ser o mais eficiente na conversão de tecnologia em expectativa de vida.

Dentro do contexto da sustentabilidade, Halkos, Tzeremes e Kourtzidis (2015) utilizaram um modelo DEA de dois estágios para calcular índices de eco-eficiência para microrregiões da Europa. Ao todo, os autores analisaram 157 microrregiões por sete países da Europa, todos entre os 15 mais ricos e comprometidos com o Protocolo de Kyoto para redução dos gases estufa. No primeiro estágio da DEA, os autores tomaram como variáveis de *inputs*: estoque de capital e trabalho; e como variável de *output* intermediário o PIB. No segundo estágio, os autores consideraram o PIB como único *input* e como *outputs* as emissões de CO₂ e a produção de resíduos municipais. Com os resultados, aos autores observaram que existe bastante desigualdade entre as regiões quanto as atividades poluidoras, porém, na média, existe relativa estabilidade entre os países.

Também inserido no campo da sustentabilidade, Santana et al. (2015) utilizaram análise de janela e o índice triplo da DEA para calcular a eficiência dos países BRICS e do G7 em converter capacidade nacional de inovação (NIC em inglês) em desenvolvimento econômico, social e ambiental, no período entre os anos 2000 e 2008. Os autores utilizaram como variáveis de *input* os gastos em P&D e o número de patentes, como componentes do NIC, e como variáveis de *output* o PIB per capita (econômico), emissões de CO₂ e consumo energético (ambiental), e média de anos escolares e expectativa de vida (social). Os resultados mostram que, apesar dos altos investimentos em P&D, EUA, China, Rússia e Japão apresentaram as menores taxas médias de eficiência. Com poucos investimentos em P&D e altos estoques de patentes, os países europeus apresentaram, em

⁹ Acrônimo cunhado em 2001 pelo economista Jim O'Neil para referir-se aos quatro países de maior crescimento econômico do mundo emergente: Brasil, Rússia, Índia e China.

média, desempenho superior aos demais países. Os autores consideraram que os resultados não permitem concluir que a inovação tecnológica caminha no mesmo sentido dos desenvolvimentos econômico, social e ambiental.

Woo et al. (2015), com o objetivo de calcular a eficiência ambiental dos países da OECD¹⁰, utilizaram modelos DEA estático (CCR, BCC, eficiência de escala e super-eficiência) e temporal (Malmquist) em um painel entre os anos de 2004 e 2011. Os autores tomaram como *inputs*: trabalho, estoque de capital e oferta de energia renovável; e como *outputs*: PIB, emissões de CO₂ e geração de eletricidade renovável. Após os resultados, os autores concluíram, pela análise estática, que embora a média de eficiência dos países da OECD da América seja mais alta entre os três grupos definidos (América, Europa e Ásia & Oceania) os países da Europa estão melhores classificados no quesito eficiência. Sob a análise temporal, o índice Malmquist foi influenciado por choques externos como a crise financeira global, sendo os países da América os mais afetados.

Com o objetivo de analisar a eficiência econômica-ambiental-energética, Suzuki e Nijkamp (2016) desenvolveram um novo modelo DEA baseado no método de minimização de distância de fricção (DFM em inglês) orientado por meta (*target-oriented* – TO). Os autores estudaram um grupo de países da União Europeia, APEC (Cooperação Econômica da Ásia e do Pacífico) e ASEAN (Associação de Nações do Sudeste Asiático) entre os anos de 2003 e 2012, considerando como variáveis de *input* consumo de energia primária e população, e como variáveis de *output* PIB e emissão de CO₂. Os autores concluíram que, em média, os escores de eficiência dos países da Europa são superiores aos dos países da APEC e ASEAN, com aumento da diferença após 2006. Também concluíram que um aumento do PIB mantendo constante a emissão de CO₂ significa que tecnologias de energia renováveis mais eficientes precisam ser adotadas.

De forma geral, o estado da arte demonstra o grande potencial de aplicação da análise envoltória de dados para o estudo de eficiência de países em termos da sustentabilidade, embasando e direcionando o presente trabalho, cuja contribuição ao estado da arte se refere a utilização de um segundo estágio de estudo econométrico dos resultados dos modelos DEA.

2.2 Crescimento e Desenvolvimento Econômico

¹⁰ O artigo não considerou Chile, Islândia e Turquia por falta de dados desses países.

De forma recorrente, os conceitos de desenvolvimento e crescimento econômico são confundidos e tomados muitas vezes como sinônimos. Porém, na moderna literatura econômica faz-se cada vez mais importante a diferenciação de ambos os conceitos. O conceito de crescimento econômico diz respeito ao crescimento, em seus aspectos teóricos e matemáticos, do PIB per capita de um país. Conforme Barro e Sala-i-Martin (2004), a teoria moderna do crescimento econômico teve início com o trabalho inovador de Ramsey¹¹ (1928). Ramsey introduziu à teoria importantes contribuições incluindo a otimização do consumo doméstico, formação de preços e teoria do ciclo de negócios, sendo sua função de utilidade tão utilizada quanto a função de produção de Cobb-Douglas. Ainda de acordo com Barro e Sala-i-Martin (2004), depois que Harrod¹² e Domar¹³ tentaram introduzir elementos keynesianos à teoria na década de 1950, vieram as contribuições mais relevantes ao crescimento econômico, a função neoclássica de produção, cujos princípios foram formulados por Solow¹⁴ (1956) e Swan¹⁵ (1956) (que ficou conhecido como modelo Solow-Swan), sendo retornos constantes a escala, retornos decrescentes para cada variável *input*, e pequenas e positivas elasticidades de substituição entre as variáveis *inputs*. Combinando esses princípios com a taxa constante de poupança obtém-se o modelo de equilíbrio geral da economia. Acemoglu (2009) explica que a grande vantagem do modelo Solow-Swan é sua capacidade de representar o complexo ambiente econômico com simplicidade, por meio de uma representação de economia de um único bem com alguma referência às decisões individuais, sendo o modelo base para outros de maior complexidade.

Segundo Aghion e Howitt (2009), políticas econômicas voltadas a incentivar o aumento da poupança elevam a taxa de crescimento da economia. Entretanto, de acordo com Barro e Sala-i-Martin (2004), no longo prazo, na ausência de avanço tecnológico, devido aos retornos decrescentes dos *inputs* a elevação da taxa de crescimento não se sustenta. Nesse mesmo contexto, Aghion e Howitt (2009) apresentam um contraponto. Apesar de, na teoria neoclássica, a tecnologia ser uma variável exógena, os autores acreditam que a mesma é estimulada por forças endógenas à economia como direitos de propriedade intelectual, políticas de competitividade, e abertura ao comércio internacional, possibilitando o crescimento de longo prazo.

¹¹ RAMSEY, F. A Mathematical Theory of Saving. **Economic Journal**. n. 38, p. 543–559, dez. 1928.

¹² HARROD, R. F. An Essay in Dynamic Theory. **Economic Journal**. n. 49, p. 14–33, jun. 1939.

¹³ DOMAR, E. D. Capital Expansion, Rate of Growth, and Employment. **Econometrica**. n. 14, p. 137–147, abr. 1946.

¹⁴ SOLOW, R. M. A Contribution to the Theory of Economic Growth. **Quarterly Journal of Economics**. n. 70, p. 65–94, fev. 1956.

¹⁵ SWAN, T. W. Economic Growth and Capital Accumulation. **Economic Record**. n. 32, p. 334–361, nov. 1956.

Barro e Sala-i-Martin (2004) ressaltam que a inclusão da tecnologia no modelo neoclássico é bastante difícil dado o pressuposto da competição perfeita que não permite os retornos crescentes da replicação da inovação, sendo que esta possui aspectos de não rivalidade e de bens públicos. Segundo os autores, na década de 1980, os estudos sobre crescimento de longo prazo ganharam força, principalmente com o surgimento dos modelos de crescimento endógeno. Barro e Sala-i-Martin (2004) relatam que nesses modelos, decorrentes dos trabalhos de Romer¹⁶ (1986), Lucas¹⁷ (1988) e, Rebelo¹⁸ (1991), a taxa de crescimento não cessa porque os benefícios do conhecimento sobre a produção e sobre o capital humano evitam a tendência de diminuição dos retornos da acumulação de capital. Ainda segundo os autores, os estudos de Romer (1987¹⁹, 1990²⁰), Aghion e Howitt²¹ (1992), e Grossman e Helpman²² (1991) introduziram as atividades de P&D e competição imperfeita na teoria do crescimento.

Nesses modelos, o avanço tecnológico resulta da atividade intencional de P&D, e essa atividade é beneficiada por algum poder *ex post* de monopólio. Se não há tendência de escassez de ideias inovadoras na economia, a taxa de crescimento pode permanecer positiva no longo prazo. A taxa de crescimento e a atividade inovativa subjacente tendem, entretanto, a não ser um ótimo de Pareto devido a distorções relacionadas a criação de novos produtos e métodos de produção. Nesse cenário, a taxa de crescimento em longo prazo depende de ações governamentais como a tributação, a manutenção da lei e da ordem, a prestação de serviços de infraestrutura, a proteção dos direitos de propriedade intelectual, a regulamentação do comércio internacional, os mercados financeiros, e outros aspectos da economia. Por isso, o governo tem um grande potencial para o bem ou para o mal através de sua influência sobre a taxa de longo prazo de crescimento (BARRO E SALA-I-MARTIN, 2004, p. 20).

Segundo Sala-i-Martin (2002), com os modelos de crescimento endógeno com inovação tecnológica, os estudos econômicos mais recentes aceitam que estes não são ótimos de Pareto e

¹⁶ ROMER, P. M. Increasing Returns and Long-Run Growth. **Journal of Political Economy**. v. 94, n. 5, p. 1002–1037, out. 1986.

¹⁷ LUCAS, R. E. Jr. On the Mechanics of Economic Development. **Journal of Monetary Economics**. v. 22, p. 3–42, jul. 1988

¹⁸ REBELO, S. Long-Run Policy Analysis and Long-Run Growth. **Journal of Political Economy**. v. 99, n. 3, p. 500–521, jun. 1991

¹⁹ ROMER, P. M. Growth Based on Increasing Returns Due to Specialization. **American Economic Review**. v. 77, n. 2, p. 56–62, mai. 1987.

²⁰ ROMER, P. M. Endogenous Technological Change. **Journal of Political Economy**. v. 98, n. 5, p. S71–S102, out. 1990.

²¹ AGHION, P.; HOWITT, P. W. A Model of Growth Through Creative Destruction. **Econometrica**. v. 60, n. 2, p. 323–351, mar. 1992.

²² GROSSMAN, G. M.; HELPMAN, E. Innovation and Growth in the Global Economy. MIT Press, 1991.

permitem a competição imperfeita. Esses novos modelos também trazem importantes contribuições no campo de políticas de P&D, principalmente quanto aos subsídios a P&D. Devido às falhas de mercado, os autores relatam que não é claro qual é o momento adequado do governo subsidiar o setor de P&D, como o subsídio deve ser realizado ou quais seus efeitos. Os autores trazem como exemplo uma situação em que os preços ficam acima do custo marginal e a quantidade de inovações abaixo do ótimo. Nesse caso, não se deve subsidiar a P&D, e sim subsidiar os compradores dos bens com preços superestimados.

O conceito de desenvolvimento econômico, por sua vez, possui uma abrangência muito mais ampla, na qual o crescimento econômico é uma de suas muitas variáveis, que podem incluir o desenvolvimento social, sustentabilidade ambiental, entre outros. Myrdal²³ (1974 apud BRINKMAN, 1995) definiu desenvolvimento econômico como a evolução de toda sociedade, elaborando um modelo onde se incluem variáveis econômicas e não-econômicas, como estrutura educacional, sistema de saúde e acesso a tomada de decisões por parte da sociedade. Nessa mesma linha, Sheram e Soubbotina (2000) destacam que nem sempre o desenvolvimento de uma sociedade é diretamente proporcional ao seu crescimento econômico que muitas vezes é obtido com altos custos sociais e ambientais, se tornando insustentável no longo prazo.

Com uma linha de pensamento um pouco divergente, Bresser-Pereira (2006) define o desenvolvimento econômico como produto do sistema capitalista, intrinsecamente ligado à acumulação de capital e avanço tecnológico. Segundo o autor, do desenvolvimento decorrem o aumento da qualidade de vida, padrões elevados de segurança, liberdade, justiça social e preservação do meio ambiente. O autor também ressalta que o desenvolvimento só é possível em países de Estado forte, com capacidade de suprir as necessidades coletivas de sua sociedade. Para Bresser-Pereira (2006), o desenvolvimento pode ser observado sobre duas óticas: da oferta e da demanda. Sob a ótica da oferta, mais frequentemente abordada, o desenvolvimento no longo prazo depende da acumulação de capital humano, com acesso da força de trabalho a saúde, crédito, e preparo técnico-educacional de qualidade, fatores que impulsionam a produtividade do trabalho. Já sob a ótica da demanda, o desenvolvimento depende do investimento e da acumulação de capital, que só ocorre na presença de uma taxa de lucro atrativa, uma taxa de cambio competitiva e uma taxa de juros moderada. O autor ainda destaca que, sob uma ou outra ótica, é fundamental ao

²³ MYRDAL, G. What is Development? *Journal of Economic Issues* v. 8, n. 4, p. 729-736, dez. 1974.

desenvolvimento a transferência do capital humano acumulado e qualificado aos setores desenvolvedores de tecnologia da economia.

Mais alinhado ao contexto de Myrdal (1974 apud BRINKMAN, 1995) e Sheram e Soubbotina (2000), Sachs (2006) observa que as discussões sobre desenvolvimento começaram na década de 1940, diante da necessidade de reconstrução do leste europeu no pós-guerra. Segundo o autor, esses países possuíam estruturas agrícolas e industriais bastante atrasadas, forte desemprego e fragilidades comerciais, sociais e políticas, situação similar às de outros países periféricos do mundo. Sachs (2006) coloca como peças fundamentais para o desenvolvimento a igualdade, equidade e solidariedade entre os membros da sociedade, principalmente no sentido da redução da pobreza. Este autor trouxe o conceito de desenvolvimento como uma combinação da sustentabilidade ambiental e da sustentabilidade social, ou seja, o crescimento econômico deve estar condicionado a impactar de forma positiva esses dois quesitos. O desenvolvimento econômico deve ser capaz de proporcionar, aos indivíduos, a oportunidade de expressar e maximizar suas qualidades e habilidades, além de garantir as condições básicas de subsistência. Deve permitir o acesso a condições de consumo de bens e serviços, o acesso à educação, acesso ao emprego decente, acesso universal aos serviços públicos, acesso a moradias dignas e acesso ao chamado ócio criativo e cultural. Assim, a necessidade de alinhamento do tripé econômico, social e ambiental, levou o desenvolvimento, segundo Sachs (2006), ao ecodesenvolvimento e, posteriormente, ao desenvolvimento sustentável.

Sen (2000) considera as liberdades básicas do ser humano como caminho ao desenvolvimento. Os indivíduos de uma sociedade devem ter liberdade para ter o modo de vida desejável, liberdade para obterem nutrição adequada, liberdade de acesso à educação e a liberdade para evitar todos os desdobramentos negativos correlacionados à privação dessas liberdades básicas. Sen (2000) trata a liberdade humana como caminho e produto final do desenvolvimento, envolvendo como instrumentos a “liberdade política” (relacionada aos direitos civis, direitos políticos, liberdade de expressão, sufrágio universal), “liberdade econômica” (relacionada ao suprimento das necessidades e direitos de consumo, produção e trocas), “liberdade social” (relacionadas aos fatores que provêm qualidade de vida aos indivíduos como saúde e educação), “garantias de transparência” (relacionadas à sinceridade, confiança e honestidade com o propósito de evitar a corrupção e fraudes financeiras) e “segurança protetora” (relacionada às instituições sociais que evitam que os indivíduos sejam negativamente afetados pelos desdobramentos do

sistema econômico como fome e desemprego de longo prazo). Segundo o autor, essas liberdades instrumentais se complementam e reforçam mutuamente e afetam diretamente o potencial humano. Sen (2000) observa, também, que o desenvolvimento não pode ser atingido apenas via crescimento econômico, ou que o mesmo seja exclusivo de países ricos. O autor traz o exemplo do Japão durante o período da Restauração Meiji²⁴, que por meio de investimentos maciços em educação básica possuía uma taxa de alfabetização superior à da Europa no mesmo período, que já possuía um nível de industrialização muito mais avançado do que o japonês. Nesse sentido, é possível destacar que o desenvolvimento econômico japonês foi conduzido via acumulação de capital humano.

O escopo do presente trabalho aproxima-se da linha de pensamento proposta por Sachs (2006), comparando de que forma os componentes, utilizados com maior frequência na literatura (capital, trabalho e tecnologia), responsáveis pelo crescimento econômico, impactam a qualidade de vida dos indivíduos de determinados países e o meio ambiente em que estão inseridos. Sem excluir, no entanto, os demais conceitos, trazendo suas principais questões para a reflexão final.

2.3 Desenvolvimento Sustentável

A ideia de desenvolvimento sustentável é facilmente difundida e aceita por um de seus pontos de maiores críticas: o seu conceito vago e abrangente, que, conseqüentemente, permitiu sua adoção ampla e diversificada, desde o ativismo ambiental até as maiores corporações capitalista. Para Veiga (2010), o desenvolvimento sustentável passou a ser institucionalizado como “expressão normativa”, principalmente com a polarização dos debates em torno do crescimento econômico e preservação ambiental. Ainda segundo Veiga (2010), o conceito de desenvolvimento sustentável converge para o início de uma sociedade “pós-industrial”, de mesma magnitude da passagem da sociedade europeia agrária para a era industrial, embora as características dessa nova era ainda não possam ser visualizadas. Ao atingir grandes instituições internacionais como PNUD, Banco Mundial, FMI, e ONGs como a WWF e WBCSD, Nobre (2002 apud BARBIERI et al., 2010) afirma que o conceito vago e impreciso de desenvolvimento sustentável, elaborado para o consenso, leva a institucionalização das questões ambientais e dos cenários políticos relacionados. Para Mitcham (1995), o conceito de desenvolvimento sustentável torna-se perigoso quando passa

²⁴ 1868 - 1912

a significar qualquer coisa de forma que seja socialmente aceito, ainda que nessa aceitação universal exista um acordo sobre nada, ou seja, vazio.

O desenvolvimento sustentável teve sua primeira expressão no chamado ecodesenvolvimento. Segundo Layrargues (1997) e Mantovaneli Jr. e Sampaio (2007) o conceito de ecodesenvolvimento foi aprimorado por Ignacy Sachs, nos anos 1980, a partir dos estudos de Maurice Strong sobre o desenvolvimento nas áreas rurais de países subdesenvolvidos, em 1973. De acordo com os autores, o ecodesenvolvimento não trata das soluções universais tratadas pelo desenvolvimento sustentável, eles ressaltam que é fundamental que as soluções se originem para cada ecorregião, considerando suas próprias características culturais, ambientais e tecnológicas. Embora a inovação sempre torne o possível, no ecodesenvolvimento o crescimento econômico não pode ser ilimitado e, também, não é capaz de resolver os problemas de pobreza e desigualdade em sua totalidade.

Essa característica regional do ecodesenvolvimento o aproxima do desenvolvimento econômico endógeno proposta por Sachs, destacado por Barbieri et al. (2010) como solidária e de autonomia local, segundo o autor não é agradável às classes políticas e da livre iniciativa, pois a primeira se baseia nas vantagens de satisfazer a segunda, cujo interesse é a criação e reprodução de um alto padrão de consumo multinacional. Dessa forma, o conceito de desenvolvimento sustentável encontrou vasto campo para se estabelecer.

Ainda segundo Barbieri et al. (2010), embora existam diversas críticas ao desenvolvimento sustentável, o conceito ainda é muito importante pois é capaz de alguma forma instigar discussões e debates acerca do ser humano como parte social e como parte ambiental do planeta.

O conceito de desenvolvimento sustentável defendido por Sachs (2006) é formado por três grandes dimensões: econômica, social e ambiental. Para Giddings, Hopwood e O'Brien (2002), diferentemente da tradicional representação de três círculos alinhados como um "diagrama de venn", o desenvolvimento sustentável é melhor representado por três círculos concêntricos, sendo o mais interior representante da economia, o intermediário o representante da sociedade e o mais exterior representante do ambiente, demonstrando uma relação de dominância, a economia não existe sem a sociedade e a sociedade não existe sem o ambiente.

Figura 1 - Diagrama do Desenvolvimento Sustentável
Fonte: Adaptado de Giddings, Hopwood, e. O'Brien (2002).

Conforme Van Bellen (2006), a dimensão econômica está relacionada à alocação e distribuição dos recursos e à escala. Segundo o autor, as crises se originam quando não há eficiência econômica nesses termos, pois os recursos provindos do meio ambiente são escassos e limitados. Van Bellen (2006) também destaca a visão de Bartelmus²⁵ (1995), de que as economias têm incorrido em grave erro ao não contabilizar a escassez dos recursos naturais e os impactos da degradação ambiental, que afetam a qualidade de vida humana. Um sistema de contas integradas poderia auxiliar nesse sentido fornecendo bases para subsídios e taxações ambientais. Segundo Pawlowski (2008), não é simples inserir as questões ambientais dentro do contexto de mercado, porém existem instrumentos econômicos importantes nesse sentido, como, por exemplo, a taxa dos descartes de poluentes no ambiente e uso dos recursos naturais, subsídios a projetos e os investimentos de cunho ambiental, como o fortalecimento dos mercados de carbono, entre outros.

Sobre a dimensão social, Pawlowski (2008) destaca que esta engloba diversos aspectos como cultura, religião (ou espiritualidade), padrões de vida e relacionamento com o meio. Segundo Sztumski (2000 apud PAWLOWSKI, 2008, p. 84), as crises nessa dimensão se originam da constante busca do lucro e de um modo de vida de bem-estar individual, que só poderá ser atingido por poucos. Para Van Bellen (2006) a riqueza de uma sociedade não é determinante para o acesso

²⁵ BARTELMUS, P. Indicators of sustainable growth and development – linkage integration and policy use. In: WORKSHOP ON INDICATORS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT, Wuppertal, 1995.

à qualidade de vida e aos seus direitos básicos, está mais ligada à ideia de Sachs²⁶ (1997) de distribuição equitativa da renda.

De acordo com Pawlowski (2008) a dimensão ambiental não é definida apenas pela proteção e preservação do meio, ela também é intrinsicamente ligada às relações humanas e ao espaço povoado. Poluentes do ar e da água podem atravessar grandes distâncias desde seu ponto de origem, atingindo inclusive lugares remotos sob proteção ambiental. Van Bellen (2006) destaca as visões de Rutherford²⁷ (1997) e Sachs (1997), nas quais a dimensão ambiental trata da busca constante pela redução dos impactos negativos da ação humana e pelo consumo de recursos do ambiente.

Conforme afirmam Hansmann, Mieg e Frischknecht (2012), a integração entre as três dimensões nem sempre ocorre de forma harmoniosa, conflitos tendem a aparecer quando se busca o balanço entre as três. Nesse sentido, segundo Kaivo-Oja et al. (2014), existe uma forte correlação negativa entre o bem-estar humano e o bem-estar ambiental, porém o *trade-off* entre as duas esferas tem se reduzido nos últimos anos, denotando uma perspectiva positiva do ponto de vista da sustentabilidade.

Van Bellen (2004, 2006) lista, a partir da literatura, algumas formas de se medir o nível de desenvolvimento sustentável por meio do uso de indicadores, entre eles o *ecological footprint method*, o *dashboard of sustainability*, e o *barometer of sustainability*.

Segundo Van Bellen (2004, 2006) e Wiedmann e Barrett (2010) o *ecological footprint method* (método de “pegada ecológica”) é um indicador que avalia a relação entre a atividade humana e o local geográfico em que se insere em termos de recursos disponíveis, sendo capaz de avaliar desde a sustentabilidade de produtos até auxiliar na formulação de políticas ambientais. Ainda segundo os autores, o método consiste em determinar uma área mínima capaz de fornecer a uma sociedade, por tempo ilimitado, energia e recursos, e absorver os resíduos produzidos pela atividade humana, levando em conta o uso direto e indireto da terra nessas atividades além dos impactos na biodiversidade resultante da contaminação pelos resíduos produzidos. Entre as vantagens da pegada ecológica, se refere à eficiência de medir a relação entre a esfera ambiental e

²⁶ SACHS, I. Desenvolvimento sustentável, bio-industrialização descentralizada e novas configurações rural-urbana. Os casos da Índia e do Brasil. In: VIEIRA, P.F. e WEBER, J. (orgs.). **Gestão de Recursos Naturais Renováveis e Desenvolvimento: Novos Desafios para a Pesquisa Ambiental**. São Paulo: Cortez, 1997.

²⁷ RUTHERFORD, I. Use of models to link indicators of sustainable development. In: MOLDAN, B.; BILHARZ, S. **Sustainability indicators: report of the project on indicators of sustainable development**. Chichester: John Wiley& Sons Ltd, 1997.

econômica da sustentabilidade, mas é bastante limitado no aspecto social. Além disso o método é estático, não podendo se fazer inferências temporais.

O *dashboard of sustainability*, conforme Van Bellen (2004, 2006) e Rodrigues e Najberg (2012), é um índice interdisciplinar que aborda as vertentes social, econômica, ambiental e institucional. O índice é agregado em termos de disponibilidade de fluxos para cada vertente, assim o *ecological footprint* pode ser uma medida de fluxo ambiental e o PIB pode ser uma medida de fluxo econômico. Segundo Rodrigues e Najberg (2012), o software utilizado para o cálculo do índice está disponível de forma gratuita na internet, e possui fácil adaptação para diferentes tipos de aplicações. Os resultados são observados em ponteiros de um marcador por cores, sendo vermelho indicador de pior desempenho e verde o melhor desempenho.

De acordo com Van Bellen (2004, 2006), o *barometer of sustainability* é também um índice agregativo de sustentabilidade, mas que considera as diferenças de escala entre os diversos indicadores. Os indicadores que compõem o *barometer of sustainability* são escolhidos utilizando-se uma hierarquia, de forma que as reais situações sociais e ambientais sejam representadas.

Para calcular ou medir o progresso em direção à sustentabilidade, são calculados os valores para os índices de bem-estar social e da ecosfera, bem como os dos subíndices, caso existam. O índice de bem-estar do ecossistema identifica tendências da função ecológica no tempo. É uma função da água, terra, ar, biodiversidade e utilização dos recursos. O índice de bem-estar humano representa o nível geral de bem-estar da sociedade e é uma função do bem-estar individual, saúde, educação, desemprego, pobreza, rendimentos, crime, bem como negócios e atividades humanas. Trata-se de um gráfico bidimensional onde os estados do bem-estar humano e do ecossistema são colocados em escalas relativas, que vão de 0 a 100, indicando uma situação de ruim até boa em relação à sustentabilidade. A localização do ponto definido por estes dois eixos, dentro do gráfico bidimensional, fornece uma medida de sustentabilidade ou insustentabilidade do sistema (VAN BELLEN, 2004, p. 82).

Outro conceito bastante relevante na literatura é a chamada *environmental Kuznets curve* (EKC). De acordo com Stern, Common e Barbier (1996) e Stern (2004) a EKC analisa econometricamente a relação entre indicadores de degradação ambiental e renda per capita. Segundo esse conceito, no início do processo de crescimento econômico, tanto a degradação quanto a poluição ambiental crescem, porém conforme a economia evolui e a renda cresce, os indicadores ambientais se retraem formando uma curva em forma de U invertido. Em suma, o crescimento econômico seria um caminho para a preservação ambiental, fato já derrubado pelos

desdobramentos do ecodesenvolvimento e do desenvolvimento sustentável. Além dos problemas de robustez, estatísticos e econométricos, os autores afirmam que a redução dos níveis de degradação pode ser obtida, entre outros, pelo surgimento de novas tecnologias menos impactantes ao ambiente.

2.4 Tecnologia e Inovação

A pauta de Ciência e Tecnologia (C&T) é peça fundamental na elaboração dos programas políticos que dirigem os países, principalmente com a interligação global das economias.

Em um contexto de fluxos crescentes de comércio internacional, em especial de produtos de alto conteúdo tecnológico, os países exportadores desses produtos são os que apresentam melhor desempenho econômico. Em consequência, o maior nível de renda auferido cria condições para que consolidem mais facilmente sua trajetória de desenvolvimento ao longo do tempo. É esse cenário que motiva os países em desenvolvimento a investirem em Ciência, Tecnologia e Inovação, mesmo reconhecendo as dificuldades que enfrentarão, por força dos hiatos existentes entre suas trajetórias passadas e a complexidade dos processos contemporâneos de avanço científico e tecnológico (LIVRO BRANCO: CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, p. 23, 2002).

Na base da C&T se encontra a Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), que juntamente à educação técnica e superior tornam possível a aplicação da C&T. O Manual Frascati (OECD, 2002) define P&D como qualquer trabalho criativo sistemático capaz de aumentar o conhecimento cultural e social, e gerar novas aplicações para este conhecimento. Segundo o Manual, essa variável já foi fortemente validada em diversos estudos, porém, ainda assim possui duas desvantagens: não é capaz de mensurar a mudança de nível tecnológico, e não é capaz de medir outros tipos de desenvolvimento tecnológico como *learning by doing*.

A inovação tecnológica, considerada na literatura como um dos pilares da evolução do mundo, é todo novo implemento introduzido em um produto ou processo que proporciona ganhos de produtividade ou qualidade. Segundo o Manual de Oslo (OECD, 2005), a inovação tecnológica sobre um produto traz a melhoria do desempenho desse produto, de forma que o consumidor possa ter ganhos em seu uso ou um novo tipo de aplicação para esse produto. A inovação tecnológica sobre o processo produtivo, ainda segundo o Manual de Oslo, traz ganhos de produtividade ou

novos métodos ao processo de produção, sejam eles obtidos via novos equipamentos, melhorias do capital humano, ou ambos.

Um dos principais teóricos da inovação, Schumpeter (1997) diz que a inovação tecnológica ocorre quando se combinam, de formas diferentes ou com novos métodos, insumos capazes de gerar novos e diferentes produtos dos gerados anteriormente. O ciclo econômico atual se rompe e há desenvolvimento quando: a) há a introdução de um novo produto; b) há a introdução de um novo processo produtivo; c) há a abertura de um novo segmento de mercado em um país, mesmo já existindo em outros países ou não; d) há o estabelecimento de novas fontes de insumos; ou e) há uma reorganização industrial, por exemplo, via monopolização ou aumento da concorrência. Este mesmo autor ainda ressalta que as inovações tecnológicas não decorrem necessariamente dos agentes produtivos já estabelecidos, na maioria das vezes elas decorrem de novas empresas.

Segundo Lemos (1999), a inovação tecnológica pode ocorrer de duas formas: radical ou incremental. A inovação radical consiste na inserção de um produto completamente novo no mercado, que pode até mesmo provocar o surgimento de um novo nicho de mercado. Já a inovação incremental consiste no processo de melhoria de um produto já existente, introduzindo ganhos de produtividade, qualidade, nova interface, ou novas formas de utilização do mesmo e, geralmente, não causam o mesmo impacto das inovações radicais.

Conforme Constantinescu e Frone (2014), a inovação tecnológica possui influencia tanto no desenvolvimento sustentável quanto no não-sustentável, corroborando a ideia de Vollenbroek (2002) sobre os problemas causados quando as inovações tecnológicas criam novas necessidades ao invés de suprir as necessidades da sociedade. Para os autores, os benefícios das inovações aparecem quando há uma mudança na postura e comportamento da sociedade, conciliando o progresso tecnológico e a consciência do todo ecológico.

Em suma, inovação tecnológica e o desenvolvimento da sociedade estão intrinsecamente ligados. No contexto de sociedade sustentável, é preciso sempre avançar em termos de preencher as necessidades atuais, produzindo com menor consumo de recursos e menos despejos de resíduos no meio, assim preservando as capacidades de produção futura, conforme proposto pelo relatório Brundtland. Assim, se faz importante conhecer o papel desempenhado pela inovação para a eficiência dos países em termos da sociedade sustentável, como forma possível de se observar melhores práticas políticas. Nessa linha, o capítulo 3 apresenta ferramentas capazes de calcular a eficiência de diferentes unidades dentro de um determinado conjunto.

3. REFERENCIAL METODOLÓGICO

Este capítulo tem por objetivo contextualizar o método e as ferramentas, descritos no capítulo 4, que serão utilizados no presente trabalho. Assim, buscou-se descrevê-los de forma abrangente em seus mais importantes aspectos, de forma a fundamentar o método escolhido posteriormente.

3.1 Análise de Dados em Painel

Dados em painel ou longitudinais, são estruturas combinantes de informações em *cross-section* e séries temporais. Segundo Frees (2004), essa combinação permite a análise de aspectos dinâmicos e pontuais de um problema. Ainda segundo o autor, as principais vantagens em se trabalhar com dados em painel é que eles são capazes de analisar relações dinâmicas e modelar diferenças (heterogeneidade), sendo sua principal desvantagem o fato de que nem sempre as mesmas unidades *cross-section* em estudo podem ser acompanhadas no tempo (atrito).

3.1.1 Modelo de Dados Empilhados

De acordo com Wooldridge (2010), a análise de dados em painel é muito eficaz para estimar parâmetros mesmo em modelos que incluem variáveis não identificáveis. Segundo Park (2011) e Greene (2012), excluindo da análise as características de *cross-section* e séries temporais e seus efeitos individuais ($\mu_i = 0$), isto é, tomando cada unidade ou indivíduo em cada unidade temporal como uma unidade ou indivíduo diferentes, pode-se obter uma grande base de dados *cross-section* formada por painéis “empilhados” (*pooling*). Assim, o seguinte modelo é apresentado como um modelo genérico de dados em painel com n variáveis explicativas para cada unidade (i):

$$y_{it} = \alpha + \beta x_{it} + \varepsilon_{it} \quad i = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T \quad (1)$$

Se a equação (1) for verdadeira, pode-se utilizar o modelo de Mínimo Quadrado Ordinário - MQO. Porém, na presença de efeitos individuais, o modelo de MQO será inconsistente.

Ainda segundo Wooldridge (2010), na visão tradicional dos modelos de dados em painel, o efeito não observável, μ_i , é chamado de “efeito aleatório” quando é estimado como uma variável

aleatória, e “efeito fixo” quando é tratado como um parâmetro a ser estimado para cada unidade (*i*).

3.1.2 Modelo de Efeitos Fixos

Retomando a equação (1), um modelo de efeito não observável qualquer:

$$y_{it} = \beta_1 x_{it1} + \beta_2 x_{it2} + \dots + \beta_n x_{itn} + \mu_i + \varepsilon_{it}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

E para cada unidade tomamos a média entre os períodos:

$$\bar{y}_i = \beta_1 \bar{x}_{i1} + \beta_2 \bar{x}_{i2} + \dots + \beta_n \bar{x}_{in} + \mu_i + \bar{\varepsilon}_i \quad (3)$$

Ao subtrair-se a equação (3) da equação (1), temos:

$$\ddot{y}_i = \beta_1 \ddot{x}_{it1} + \beta_2 \ddot{x}_{it2} + \dots + \beta_n \ddot{x}_{itn} + \ddot{\varepsilon}_{it}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

Segundo Wooldridge (2006), a equação (4) resulta da transformação de efeitos fixos (ou efeitos internos – o MQO usa a variação no tempo em *y* e *x* dentro de cada observação do *cross-section*). Como o efeito não observado, μ_i , foi eliminado, pode-se utilizar o método de MQO. O erro idiossincrático, $\ddot{u}_{it}$, deve ser não correlacionado com cada variável explicativa em todos os períodos.

Ainda de acordo com Wooldridge (2006) e Greene (2012), tradicionalmente para se obter os estimadores de efeitos fixos, assume-se que para cada indivíduo *i* possui um parâmetro a ser estimado, no caso o efeito não observado μ_i . Tal estimação deve ser feita inserindo-se uma variável *dummy* para cada observação do *cross-section* (e em algumas vezes variável *dummy* para cada período de tempo), sendo o processo também chamado de regressão de mínimos quadrados de variável *dummy* (*Least Squares Dummy Variables regression – LSDV*).

3.1.3 Modelo de Efeitos Aleatórios

Segundo Gujarati (2004), a utilização do modelo de efeitos fixos, na presença de muitas unidades *cross-section*, pode ser inconsistente no que diz respeito ao número de graus de liberdade.

Tomando novamente a equação (1), um modelo de efeito não observável qualquer:

$$y_{it} = \beta_1 x_{it1} + \beta_2 x_{it2} + \dots + \beta_n x_{itn} + \mu_i + \varepsilon_{it}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

É possível reescrever a equação (6) criando um termo componente erro, de forma que:

$$y_{it} = \beta_1 x_{it1} + \beta_2 x_{it2} + \dots + \beta_n x_{itn} + v_{it}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

Onde: $v_{it} = \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (7)$

De acordo com Wooldridge (2006), o motivo de utilizar os efeitos fixos é a eliminação do efeito não observável, dado que este é supostamente correlacionado com uma ou várias variáveis explicativas. Entretanto, se μ_i não apresenta correlação, a transformação interna pode resultar em estimadores ineficientes. O modelo de efeitos aleatórios assume os mesmos pressupostos dos efeitos fixos, adicionando o pressuposto de que μ_i é independente de todas as variáveis explicativas em todos os períodos.

$$Cov(x_{itj}, \mu_i) = 0 \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad j = 1, 2, \dots, k. \quad (8)$$

Wooldridge (2006) afirma que na maioria dos casos, deve-se estimar os dois modelos, e então, testar estatisticamente suas significâncias por meio do teste de Hausman, presente na maioria dos softwares estatísticos. A hipótese nula do teste é que não há correlação entre o efeito não observável e as variáveis explicativas, ou seja, a hipótese nula do teste é que deve-se optar pelo modelo de efeitos aleatórios. Também pode-se testar a escolha entre modelos com efeitos e MQO em dados empilhados, utilizando os testes F e de Breusch e Pagan LM, conforme a Figura 2.

Efeitos Fixos (Teste F)	Efeitos Aleatórios (Breusch e Pagan LM)	Modelo Indicado
Não rejeita H_0 (sem efeitos fixos)	Não rejeita H_0 (sem efeitos aleatórios)	MQO em dados empilhados
Não aceita H_0 (efeitos fixos)	Não rejeita H_0 (sem efeitos aleatórios)	Efeitos Fixos
Não rejeita H_0 (sem efeitos fixos)	Não aceita H_0 (efeitos aleatórios)	Efeitos Aleatórios
Não aceita H_0 (efeitos fixos)	Não aceita H_0 (efeitos aleatórios)	Efeitos fixos se não aceita H_0 do teste de Hausman. Efeitos aleatórios se não rejeita H_0 .

Figura 2 - Testes para escolha de modelos em dados em painel
Fonte: Adaptado de Park (2011).

3.2 Análise Envolvória de Dados

Esta seção tem por objetivo expor o conceito de Análise Envolvória de Dados e seus principais modelos, bem como o modelo a ser utilizado nesse trabalho (o BCC) e uma breve exposição de outros modelos relevantes na literatura.

Introduzida por Charnes²⁸ et al. (1978), a Análise Envolvória de Dados (*Data Envelopment Analysis* - DEA) está relacionada à avaliação do desempenho de determinados indivíduos ou unidades semelhantes (*benchmark*). Esses indivíduos ou unidades são chamados de Unidades Tomadoras de Decisão (*Decision Making Units* - DMUs) e são analisados com relação a sua eficiência na conversão de seus insumos produtivos, *inputs*, em determinados produtos, *outputs*. Ferreira e Gomes (2009) definem a DEA como “modelos matemáticos não paramétricos”, de forma que não consideram requisitos referentes a testes presentes nos modelos estatísticos e econométricos tradicionais, levando em conta as variáveis de cada DMU em suas unidades de medidas próprias, não sendo necessária a uniformização destas. Cooper, Seiford e Zhu (2010) também ressaltam essa característica flexível da DEA, que devido aos poucos pressupostos exigidos, facilita a interpretação e análise de relações, muitas vezes complexas no âmbito paramétrico entre as variáveis *input* e *output*. Cook e Seiford (2009) ressaltam que foi essa complexidade que levou Charnes et al. (1978) a formularem metodologia capaz de calcular a eficiência relativa de múltiplos *inputs* e *outputs* de unidades produtivas.

De acordo com Cooper, Seiford e Zhu (2010), diferenciando-se das ferramentas estatísticas paramétricas, a DEA utiliza o conceito de fronteiras no lugar das tendências centrais, estabelecendo uma linha de ótimo de eficiência a ser atingido pelas DMUs. Ainda segundo os autores, essa eficiência encontra duas definições: a) uma DMU é totalmente eficiente se, e somente se, nenhum de seus *inputs* ou *outputs* podem ser aumentados sem prejudicar outros *inputs* ou *outputs* (eficiência de Pareto-Koopmans); e, b) uma DMU é totalmente eficiente se, e somente se, o desempenho de outras DMUs não demonstrar que alguns *inputs* ou *outputs* podem ser aumentados sem prejudicar outros *inputs* ou *outputs* (eficiência relativa).

Basicamente, a DEA consiste em minimizar os *inputs* ou maximizar os *outputs* de um processo de produção. Conforme Cook, Tone e Zhu (2014), a eficiência é obtida a partir de menores níveis de *inputs* e maiores níveis de *outputs*, podendo ser isso uma regra de classificação aos fatores

²⁸ CHARNES, A.; COOPER, W.W.; RHODES, E.L. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, n. 6, p. 429–444, 1978.

de produção. Dessa forma, escolhe-se a orientação dos modelos DEA: a) orientação *input*: minimização das variáveis insumo; b) orientação *output*: maximização das variáveis produto; ou c) orientação mista (ou não orientado): maximiza *outputs* e minimiza *inputs* simultaneamente.

A eficiência calculada pela DEA decorre do conceito de produtividade, definida pela razão, ou proporção, entre a soma ponderada dos produtos gerados (*output* virtual) e a soma ponderada dos insumos consumidos no processo produtivo (*input* virtual). Joro e Korhonen (2015) destacam a importância de se diferenciar os conceitos de eficiência e produtividade. Segundo os autores, produtividade é uma medida absoluta, a partir da qual é possível desenhar uma fronteira de produção, que representa o *output* máximo atrelado a cada nível de *input*. A eficiência mostra quais DMUs estão operando na fronteira de produção (tecnicamente eficiente) ou abaixo dela (tecnicamente ineficiente).

Dessa forma tem-se que:

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{Output virtual}}{\text{Input virtual}} = \frac{\sum_r u_r y_{r0}}{\sum_i v_i x_{i0}} \quad (9)$$

Onde: u_r e v_i são os pesos atribuídos a y , os *outputs*, e x , os *inputs*, respectivamente.

3.2.1 Modelo CCR

Como dito anteriormente, o primeiro modelo de DEA introduzido por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) – CCR, também chamado de modelo de Retornos Constantes à Escala (*Constant Returns to Scale* - CRS), buscava maximizar a eficiência, citada anteriormente, de uma determinada DMU. Segundo Cooper, Seiford e Zhu (2010), numa amostra de n DMUs, uma DMU_j utiliza uma quantidade x_{ij} do *input* i gerando uma quantidade y_{ij} do *output* r , é possível assumir que $x_{ij} \geq 0$ e $y_{ij} \geq 0$, e cada DMU possui no mínimo um valor de *input* e um de *output* positivos. Assim, segundo Cook e Seiford (2009), a eficiência técnica de uma DMU_0 é dada pela solução do problema de programação fracional (orientação *input*):

$$e_0 = \max \frac{\sum_r u_r y_{r0}}{\sum_i v_i x_{i0}} \quad (10)$$

Sujeito à:

$$\sum_r u_r y_{rj} - \sum_i v_i x_{ij} \leq 0; \text{ para todo } j$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon, \text{ para todo } r, i$$

Onde: u_r e v_i são os pesos atribuídos a y (*output*), e a x (*input*), respectivamente, e ε é um valor não-arquimediano, menor que qualquer número real positivo, que força as soluções para as variáveis do modelo ser positivas.

O modelo (10) corresponde a orientação para o *input*. De acordo com Cook e Seiford (2009), para a orientação ao *output*, basta inverter a fração e solucionar o modelo via minimização. O modelo fracional (10), segundo Cooper, Seiford e Zhu (2010), possui infinitas soluções, entretanto pode-se transformar o modelo em um problema de programação linear, resultando em uma única solução. Segundo Cook e Seiford (2009), essa transformação pode ser feita mudando-se as variáveis $\mu_r = tu_r$, $v_i = tv_i$, e $t = (\sum_i v_i x_{i0})^{-1}$. Dessa forma, temos o modelo de programação linear:

$$e_0 = \max \sum_r \mu_r y_{r0} \quad (11)$$

Sujeito à:

$$\sum_r v_i x_{i0} = 1$$

$$\sum_r \mu_r y_{rj} - \sum_i v_i x_{ij} \leq 0, \text{ para todo } j$$

$$\mu_r, v_i \geq \varepsilon, \text{ para todo } r, i$$

Onde: u_r e v_i são os pesos atribuídos a y (*output*), e a x (*input*), respectivamente, e ε é um valor não-arquimediano.

O modelo (12), segundo Coelli et al. (2005), é conhecido como forma multiplicativa. Ainda de acordo com o autor, pode-se utilizar a propriedade de dualidade da programação linear e derivar a forma equivalente de envoltória. Esta forma possui menos restrições e é a forma mais frequentemente escolhida para solucionar o modelo, segundo o autor. Segundo Mariano (2008), a inserção de variáveis folga (*slacks*) torna possível a transformação da inequação de restrição em uma equação, assim, soma-se uma variável folga do tipo menor/menor ou igual e subtrai-se uma variável folga do tipo maior/menor ou igual no problema. As folgas (*slacks*), nos modelos radiais (CCR e BCC), são distorções resultantes do fato de a fronteira ser linear por partes (*piecewise linear*) e não completamente convexa como na teoria.

$$\min \theta_0 - \varepsilon (\sum_r s_r^+ + \sum_i s_i^-) \quad (12)$$

Sujeito à:

$$\sum_j \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta_0 x_{i0}, \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_j \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{r0}, \quad r = 1, \dots, s$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_j^+ \geq 0, \text{ para todo } i, j, r$$

$$\theta_0 \text{ sem restrições}$$

Onde: u_r e v_i são os pesos atribuídos a y (*output*), e a x (*input*), respectivamente, e ε é um valor não-arquimediano, λ_j é a participação da DMU_j na meta da DMU₀, s_i^- (excesso de *input*) e s_j^+ (escassez de *output*) são as variáveis folga (*slacks*).

Cooper, Seiford e Zhu (2010) observam que uma DMU é perfeitamente eficiente se, e somente se, ambos $\theta^* = 1$ e todas as folgas (*slacks*) $s_i^{-*} = s_r^{+*} = 0$. Ainda segundo os autores, a DMU pode ser fracamente eficiente, se e somente se ambos $\theta^* = 1$ e $s_i^{-*} \neq 0$ e/ou $s_r^{+*} \neq 0$ para algum i ou r .

Desenvolvendo o modelo fracional de forma semelhante, pode-se derivar o modelo em sua forma envoltória também para a orientação *output*, resultando em:

$$\text{máx } \varphi_0 - \varepsilon(\sum_r s_r^+ + \sum_i s_i^-) \quad (13)$$

Sujeito à:

$$\sum_j \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{i0}, \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_j \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = \varphi y_{r0}, \quad r = 1, \dots, s$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_j^+ \geq 0, \text{ para todo } i, j, r$$

$$\varphi_0 \text{ sem restrições}$$

Onde: φ_0 é o inverso da eficiência, u_r e v_i são os pesos atribuídos a y (*output*), e a x (*input*), respectivamente, e ε é um valor não-arquimediano, λ_j é a participação da DMU_j na meta da DMU₀, s_i^- (excesso de *input*) e s_j^+ (escassez de *output*) são as variáveis folga (*slacks*).

3.2.2 Modelo BCC

Segundo Coelli et al. (2005), o modelo CCR não é adequado em economias de mercado imperfeito, regulamentações do governo, e restrições financeiras, mais próximas da realidade da maioria das empresas, pois pode-se confundir a eficiência técnica com eficiência de escala. Portanto faz-se necessário considerar as variações de escala na solução do modelo. Formulado por Banker, Charnes e Cooper²⁹ (1984), de acordo com Mariano (2008), o modelo BCC possui as

²⁹ BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.

mesmas premissas do modelo CCR, adicionando os efeitos da economia de escala, e dessa forma, também é conhecido como modelo de Retornos Variáveis à Escala (*Variable Returns to Scale - VRS*). A configuração do modelo BCC segue a mesma estrutura do modelo CCR, incluindo a variável de retorno a escala do *input* ou *output*. Dessa forma, pode ser orientado por *input* da seguinte maneira:

$$e_0 = \text{máx} \frac{\sum_r u_r y_{r0} - u_0}{\sum_i v_i x_{i0}} \quad (14)$$

Sujeito à:

$$\sum_r u_r y_{rj} - u_0 - \sum_i v_i x_{ij} \leq 0; \text{ para todo } j$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon, \text{ para todo } r, i$$

u_0 sem restrição de sinal

Onde: u_r e v_i são os pesos atribuídos a y (*output*), e a x (*input*), respectivamente, e ε é um valor não-arquimediano.

Transformando para programação linear, tem-se:

$$e_0 = \text{máx} \sum_r \mu_r y_{r0} - \mu_0 \quad (15)$$

Sujeito à:

$$\sum_r v_i x_{i0} = 1$$

$$\sum_r \mu_r y_{rj} - \mu_0 - \sum_i v_i x_{ij} \leq 0, \text{ para todo } j$$

$$\mu_r, v_i \geq \varepsilon, \text{ para todo } r, i$$

μ_0 sem restrições

Onde: u_r e v_i são os pesos atribuídos a y (*output*), e a x (*input*), respectivamente, e ε é um valor não-arquimediano.

Sendo a forma de envoltória dada por:

$$\min \theta_0 - \varepsilon(\sum_r s_r^+ + \sum_i s_i^-) \quad (16)$$

Sujeito à:

$$\sum_j \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta_0 x_{i0}, \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_j \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{r0}, \quad r = 1, \dots, s$$

$$\sum_j \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_j^+ \geq 0, \text{ para todo } i, j, r$$

θ_0 sem restrições

Onde: θ_0 é a eficiência, u_r e v_i são os pesos atribuídos a y (*output*), e a x (*input*), respectivamente, e ε é um valor não-arquimediano, λ_j é a participação da DMU_j na meta da DMU₀, e s_i^- (excesso de *input*) e s_j^+ (escassez de *output*) são as variáveis folga (*slacks*).

A condição de retornos variáveis de escala do modelo BCC orientado para *inputs* pode ser observada conforme a Tabela 1. Retornos de escala crescente significam que a DMU em análise está operando em nível inferior à escala ótima, existindo espaço para a expansão de sua produtividade. Retornos decrescentes de escala significam que a DMU em questão opera acima do seu nível ótimo de produção, diminuindo sua produtividade. Já retornos constantes de escala significam que a DMU em estudo está operando no seu nível ótimo de escala, devendo manter esse nível de produção. Assim, grandes empresas ou países muito desenvolvidos, por exemplo, tendem a apresentar retornos decrescentes de escala, enquanto que pequenas empresas ou países com baixo nível de desenvolvimento tendem a apresentar retornos crescentes de escala.

Tabela 1 - Retornos de escala do modelo BCC para *input*

Coefficiente μ_0	Retorno de Escala
$\mu_0 = 0$	Constante
$\mu_0 > 0$	Crescente
$\mu_0 < 0$	Decrescente

Se for desenvolvida a forma fracional, com orientação *output*, obtém-se a seguinte forma de multiplicadores:

$$e_0 = \min \sum_r v_i x_{i0} - v_0 \quad (17)$$

Sujeito à:

$$\sum_r \mu_r y_{r0} = 1$$

$$\sum_i v_i x_{ij} - v_0 - \sum_r \mu_r y_{rj} \geq 0, \text{ para todo } j$$

$$\mu_r, v_i \geq \varepsilon, \text{ para todo } r, i$$

v_0 sem restrições

Onde: μ_r e v_i são os pesos atribuídos a y (*output*), e a x (*input*), respectivamente, e ε é um valor não-arquimediano.

Senda a forma de envoltória dada por:

$$\max \varphi_0 - \varepsilon(\sum_r s_r^+ + \sum_i s_i^-) \quad (18)$$

Sujeito à:

$$\sum_j \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{i0}, \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_j \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = \varphi y_{r0}, \quad r = 1, \dots, s$$

$$\sum_j \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_j^+ \geq 0, \text{ para todo } i, j, r$$

$$\varphi_0 \text{ sem restrições}$$

Onde: φ_0 é o inverso da eficiência, u_r e v_i são os pesos atribuídos a y (*output*), e a x (*input*), respectivamente, ε é um valor não-arquimediano, λ_j é a participação da DMU_j na meta da DMU₀, s_i^- (excesso de *input*) e s_j^+ (escassez de *output*) são as variáveis folga (*slacks*).

A condição de retornos variáveis de escala do modelo BCC, orientado para *inputs*, pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Retornos de escala do modelo BCC para *output*

Coefficiente v_0	Retorno de Escala
$v_0 = 0$	Constante
$v_0 > 0$	Decrescente
$v_0 < 0$	Crescente

Segundo Cook e Seiford (2009), assim como no modelo CCR, uma DMU é eficiente se e somente se ambos $\theta^* = 1$ e todas as folgas (*slacks*) $s_i^{-*} = s_r^{+*} = 0$. Os autores também destacam que ambos os modelos, CCR e BCC, possuem projeção radial, isto é, no caso de orientação ao *input*, os insumos se reduzem de forma proporcional enquanto os *outputs* se mantem fixos, e no caso de orientação ao *output*, os *outputs* são aumentados de forma proporcional, enquanto os *inputs* se mantêm fixos.

De acordo com Mariano (2008), com as soluções dos modelos CCR e BCC encontradas podemos calcular a eficiência de escala, que é dada pela razão entre a eficiência total (resultante do modelo CCR) e a eficiência técnica (resultante do modelo BCC). O autor ainda ressalta que as informações de quanto a eficiência técnica ou a de escala representam é fundamental no processo de tomada de decisão empresarial. Joro e Korhonen (2015) ressaltam que os modelos CCR e BCC são do tipo radial, isto é, tratam os *inputs* e *outputs* de forma proporcional, e isso faz com que nem

sempre uma DMU sobre a fronteira seja eficiente, ela pode ser fracamente eficiente, quando não há possibilidade de aumentar todos os *inputs* e *outputs* simultaneamente.

3.2.3 Outros Modelos

A literatura sobre DEA possui ainda outros diversos modelos e variações desenvolvidos nos mais de 30 anos da ferramenta, a destacar: os modelos aditivos, modelos baseados nas folgas (*slack based measures* – SBM); o *free disposal hull* (FDH); os modelos multiplicativos; o *enhanced Russel measure* (ERM); os modelos *network*; e os modelos dinâmicos.

3.2.4 Análise de Janela

Uma das formas mais utilizadas para o cálculo da eficiência de DMUs ao longo do tempo (painéis) é a, primeiramente introduzida por Charnes et al.³⁰ (1984), análise de janela (*window analysis*). Segundo Cook e Seiford (2009), uma janela é definida por k (número de períodos) observações por DMU, e são tratadas como se fossem k diferentes DMUs. Assim a análise de n (número de DMUs) x k “DMUs” gera k eficiências. Essa análise se repete a cada troca de períodos, isto é, se a primeira janela vai do Ano 1 ao Ano 4, por exemplo, a próxima janela vai do Ano 2 ao Ano 5 (supondo que a amplitude calculada seja de 4 anos), e assim sucessivamente. Ainda segundo os autores, a análise de janela permite observar a eficiência pontual de uma DMU e a tendência do desempenho dessa DMU ao longo do tempo.

Conforme Cooper, Seiford e Tone (2000), definindo n como o número de DMUs, k o número de períodos, p a amplitude da janela, d o número de DMUs por janela, e w o número de janelas, temos:

$$\begin{aligned} p &= \frac{k+1}{2} \\ w &= k - p + 1 \\ d &= \frac{np}{2} \end{aligned} \tag{19}$$

Arredondando p para cima quando necessário.

³⁰ CHARNES, A. et al. A developmental study of data envelopment analysis in measuring the efficiency of maintenance units in the U.S. air forces. **Annals of Operations Research**, v. 2, n. 1, p. 95–112, dez. 1984.

Segundo Charnes et al. (1994) e Cook e Seiford (2009), a análise de janela ainda pode ser bastante desenvolvida, principalmente com respeito a frequência de testes dos primeiros e últimos anos da janela, e a sensibilidade presumida ao cálculo da amplitude das janelas.

3.2.5 Índice de Malmquist

Segundo Cooper, Seiford e Tone (2000) e Cook e Seiford (2009), o índice Malmquist-DEA também é uma ferramenta de análise intertemporal, capaz de medir mudanças de produtividade total dos fatores (PTF). Ainda conforme os autores, o índice é composto pelo produto de dois sub-índices: índice de mudança tecnológica da fronteira (*frontier shift*) e índice de mudança da eficiência técnica (*catch-up*). O primeiro observa o deslocamento da fronteira de eficiência entre dois períodos, e o segundo o aumento ou redução da eficiência das DMUs entre dois períodos.

O índice de Malmquist pode ser adaptado para qualquer modelo DEA. Para o modelo DEA BCC-O, temos:

Para o período t :

$$\varphi_0^t(x_0^t, y_0^t) = \text{máx } \varphi_0 \quad (20)$$

Sujeito à:

$$\sum_j \lambda_j x_{ij}^t \geq x_{i0}^t, \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_j \lambda_j y_{rj}^t \leq \varphi y_{r0}^t, \quad r = 1, \dots, s$$

$$\sum_j \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j \geq 0, \text{ para todo } i, j, r$$

φ_0 sem restrições

Para o período $t + 1$:

$$\varphi_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1}) = \text{máx } \varphi_0 \quad (21)$$

Sujeito à:

$$\sum_j \lambda_j x_{ij}^t \geq x_{i0}^{t+1}, \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_j \lambda_j y_{rj}^t \leq \varphi y_{r0}^{t+1}, \quad r = 1, \dots, s$$

$$\sum_j \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j \geq 0, \text{ para todo } i, j, r$$

φ_0 sem restrições

De forma semelhante pode-se obter $\varphi_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)$ e $\varphi_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})$. Assim o índice de Malmquist-DEA BCC-O é dado por:

$$M_0 = \left[\frac{\varphi_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{\varphi_0^t(x_0^t, y_0^t)} \times \frac{\varphi_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{\varphi_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)} \right]^{1/2} \quad (22)$$

Sendo que valores de $M_0 > 1$ indicam aumento da PTF e valores de $M_0 < 1$ indicam que houve decréscimo da PTF.

Decompondo o índice dado pela equação (22), obtêm-se os efeitos de *catch-up* (23) e *frontier shift* (24):

$$C_0 = \frac{\varphi_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{\varphi_0^t(x_0^t, y_0^t)} \quad (23)$$

$$F_0 = \left[\frac{\varphi_0^t(x_0^t, y_0^t)}{\varphi_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)} \times \frac{\varphi_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{\varphi_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \right]^{1/2} \quad (24)$$

Sendo que valores de $C_0, F_0 > 1$ indicam aumento da eficiência e deslocamento positivo da fronteira, respectivamente, e valores $C_0, F_0 < 1$ indicam decréscimo da eficiência e deslocamento negativo da fronteira, respectivamente. O aumento ou perda de eficiência está relacionado a eficiência produtiva por parte da DMU utilizando em seu processo de produção práticas (tecnologias) já existentes. Já o descolamento positivo ou negativo da fronteira de produção está relacionado ao ganho ou perda de escala de eficiência produtiva da DMU ao utilizar novas práticas (tecnologias) em seu processo de produção.

3.2.6 Tratamento de Variáveis Indesejáveis

Na maioria dos casos, a DEA estima a eficiência das DMUs maximizando os *outputs* ou minimizando os *inputs*. Entretanto pode haver variáveis *inputs* ou *outputs* indesejáveis que podem interferir na estimação. Na literatura são muitos os estudos os quais temos emissões de poluentes como *outputs*, de forma que não é desejável sua maximização, e pode ser que também não seja desejável a minimização dos *inputs* que os geram. Nesse contexto, algumas formas de tratamento dessas variáveis indesejáveis foram desenvolvidas.

Scheel (2001) compilou em seu estudo os métodos mais utilizados na literatura para o tratamento de variáveis indesejáveis. O autor destacou da literatura três ferramentas (

Tabela 3): o método aditivo inverso, o translado, e o multiplicativo inverso. Segundo o autor, a abordagem aditiva inversa consiste simplesmente em tomar os valores dos *outputs* indesejáveis como *outputs* desejáveis $f(U) = -U$, método sugerido por Koopmans³¹ (1951), produzindo uma classificação de DMUs igual ao método de se considerar o *output* indesejável como um *input*. A mesma classificação obtida na abordagem aditiva inversa se mantém se os valores dos *outputs* indesejáveis forem translados, isto é, adiciona-se aos valores do método aditivo inverso um vetor escalar grande o suficiente para tornar todos os valores positivos. Scheel (2001) ainda destaca a abordagem multiplicativa inversa, proposta por Golany e Roll³² (1989), segundo a qual incorpora-se os valores inversos dos *outputs* indesejáveis. Os resultados da classificação também se mantem nesse caso, se uma DMU é eficiente utilizando-se a abordagem multiplicativa inversa também é eficiente sob a abordagem aditiva inversa. Essa última técnica também é destacada por Seiford e Zhu (2002), chamada de transformação monotônica decrescente.

Tabela 3 - Ferramentas para o tratamento de variáveis indesejáveis

Abordagem	Transformação
Aditiva Inversa	$f(U) = -U$
Translado	$f_i^k(U) = -u_i^k + \beta_i$
Multiplicativa Inversa	$f_i^k(U) = 1/u_i^k$

Fonte: Adaptado de Scheel (2001)

3.2.7 Ferramentas de Desempate

Em uma determinada análise é perfeitamente possível que algumas DMUs apresentem o mesmo valor de eficiência, ocorrendo até mesmo empates na máxima eficiência relativa (DMUs com 100% de eficiência). Nessas circunstâncias técnicas de desempate são necessárias para a construção do ranking. Ângulo-Meza e Lins (2002) e Hosseinzadeh Lotfi et al. (2013) realizaram uma revisão das ferramentas mais frequentes na literatura. Os primeiros dividiram as técnicas em dois grupos globais: técnicas que requerem informações a priori e técnicas que não requerem informação. Segundo os autores, as técnicas do segundo grupo são preferíveis, pois as informações a priori podem conter viés ou serem imprecisas, além de que a falta de consenso entre os tomadores

³¹ KOOPMANS, T. C. Analysis of production as an efficient combination of activities. **Activity analysis of production and allocation**, v. 13, p. 33-37, 1951.

³² GOLANY, B.; ROLL, Y. An application procedure for DEA. **Omega**, v. 17, n. 3, p. 237-250, 1989.

de decisão pode atrasar ou interferir no resultado do estudo. Já Hosseinzadeh Lotfi et al. (2013) classificaram as ferramentas em sete grupos mais específicos: i) ranking baseado na matriz de eficiência cruzada; ii) ranking baseado em pesos ótimos; iii) ranking baseado na super-eficiência; iv) ranking baseado em *benchmarking*; v) técnicas de estatística multivariada; vi) técnicas de decisão multicritério; e vii) outros métodos.

Uma das técnicas mais recorrentes na literatura, segundo Mariano e Rebelatto (2014), o índice composto deriva diretamente do conceito de fronteira invertida. A fronteira invertida resulta da permutação de *inputs* e *outputs* em um modelo de DEA, isto é, colocam-se os *inputs* no lugar dos *outputs* e os *outputs* no lugar dos *inputs* e resolve-se o problema linear (Figura 3).

Figura 3 - Fronteira DEA BCC Clássica e Invertida
Fonte: Silveira, Angulo-Meza e Mello (2012)

A fronteira invertida é uma avaliação pessimista das DMUs. Para tanto é feita uma troca dos inputs com os outputs do modelo original. Esta fronteira invertida é composta pelas DMUs com as piores práticas gerenciais (e pode ser chamada de fronteira ineficiente). Pode-se igualmente afirmar que as DMUs pertencentes à fronteira invertida têm as melhores práticas sob uma ótica oposta (LETA et al. 2005).

De acordo com Mariano e Rebelatto (2014), o índice composto é dado por:

$$E_k^{Comp} = \frac{[E_{kk} + (1 - E_{kk}^{-1})]/2}{\max\{[E_{kk} + (1 - E_{kk}^{-1})]/2\}} \quad (25)$$

Onde: E_{kk} é a eficiência da fronteira clássica para a DMU_k, e E_{kk}^{-1} é a eficiência da fronteira invertida para a DMU_k.

Ainda segundo os autores, a DMU mais eficiente apresentará um bom desempenho em seus pontos fortes, observados na fronteira clássica, e um desempenho não ruim em seus pontos fracos observados na fronteira invertida subtraindo 1.

4. MÉTODO DE PESQUISA E DADOS

Apresentado o referencial metodológico, neste capítulo opta-se pelo método mais apropriado aos objetivos propostos, bem como se justifica a opção. Também são apresentados os dados utilizados, suas fontes, e suas referências na literatura consultada.

4.1 Dados

Os dados utilizados nesse trabalho foram obtidos de acordo com disponibilidade (maior número de países – objetos do estudo – e maior período temporal) nas bases de dados do Banco Mundial (*World Bank*), da Organização Mundial de Propriedade Intelectual (*World Intellectual Property Organization* - WIPO), e da *Penn World Table*, conforme a Figura 4. As variáveis foram selecionadas com base na literatura consultada, em termos de relevância, potencial de contribuição e objetivo do estudo. Dado que o estudo utiliza uma função de produção do tipo Cobb-Douglas é pertinente a inclusão das variáveis Estoque de Capital (investimento) e número de pessoas empregadas (trabalho). A variável Patentes Aplicadas corresponde, no modelo adotado, às inovações tecnológicas que compõem parte da problemática em estudo. A outra parte, a questão acerca de desenvolvimento sustentável, é preenchida pelas variáveis PIB, Emissões de CO₂, e Expectativa de vida, correspondendo ao tripé econômico, ambiental, e social, respectivamente.

Variáveis <i>Outputs</i>	Fonte	Variáveis <i>Inputs</i>	Fonte
PIB Real Constante (Em milhões 2005 US\$)	Penn World Table 8.0	Estoque de Capital (Em milhões 2005 US\$)	Estimado pelo autor
Emissão de CO ₂ (quilo-toneladas)	World Bank	Número de Pessoas Empregadas (em milhões)	Penn World Table 8.0
Expectativa de vida (Anos)	World Bank	Patentes Aplicadas	WIPO

Figura 4 - Classificação das variáveis

As séries de Estoque de Capital foram construídas pelo Método do Inventário Perpétuo, conforme Hall e Jones (1999), considerando o valor inicial de estoque de capital obtido na base de dados da Penn World Table 8.0, e substituindo, na fórmula (26), juntamente a formação de capital (investimento total) obtida no International Monetary Fund – IMF, assim tem-se:

$$K_t = (1 - \delta)K_{t-1} + I_t \quad (26)$$

Onde: K_t é o nível de estoque de capital no período t , I_t é o investimento no período t , e δ é a taxa de depreciação, assumida constante. Seguindo sugestão encontrada na literatura como Hall e Jones (1999), Chien e Hu (2007) e Berleemann e Wesselhöft (2012) foi considerada para os cálculos uma taxa de depreciação de 6%.

Tabela 4 - Sumário estatístico das variáveis

Variável	Obs.	Média	Desv. Pad.	Mínimo	Máximo
PIB Real Constante (Em milhões 2005 US\$)	869	694.722,80	1.702.569,00	7.642,28 (Islândia, 2000)	13.144.400,00 (EUA, 2007)
Expectativa de vida (Anos)	869	74,14	5,62	51,56 (África do Sul, 2005)	85,16 (Israel, 2006)
Emissão de CO ₂ (quilo-toneladas)	869	324.456,40	932.322,40	1.235,78 (Madagáscar, 2002)	8.286.892,00 (China, 2010)
Estoque de Capital (Em milhões 2005 US\$)	869	2.354.788,00	5.761.429,00	21.330,86 (Quirguistão, 2000)	38.100.000,00 (EUA, 2010)
Número de Pessoas Empregadas (em milhões)	869	30,45	97,65	0,16 (Islândia, 2004)	781,38 (China, 2010)
Patentes Aplicadas	869	19.448,52	68.530,66	6 (Armênia, 2004)	490.226 (EUA, 2010)

As quantidades de variáveis e de DMUs presentes nesse estudo satisfazem a chamada regra do dedão (*thumb rule*). Segundo Cooper, Sieford, e Tone (2000) e Toloo e Tichý (2015), a *thumb rule* é dada por: $n \geq \max\{3(m + s), m \times s\}$, sendo n o número de DMUs, m o número de *inputs* e s o número de *outputs*. No caso, temos: $n = 79$ e $\max\{3(3 + 1), 3 \times 1\} = 12$, para os modelos econômico, social, e ambiental; e $n = 79$ e $\max\{3(3 + 3), 3 \times 3\} = 18$, para o modelo de desenvolvimento sustentável. Todavia, Cook, Tone e Zhu (2014) destacam que, embora um número de variáveis muito superior ao número de DMUs pode afetar a discriminação nos resultados da DEA, a *thumb rule* não tem base estatística e não necessariamente deve ser satisfeita, sendo apenas um conveniente indicador.

Dado o número pequeno de variáveis *inputs* e *outputs* optou-se pela não utilização de nenhum método DEA de seleção de variáveis, como o I-O *stepwise* ou o multicritério. De acordo com Lins e Angulo-Meza³³ (2000 apud SENRA et al., 2007) nas situações em que se envolvem poucas variáveis e muitas DMUs, como nesse caso, não é necessário a utilização de técnicas de seleção de

³³ LINS, M.P.E.; ANGULO-MEZA, L. **Análise Envolvente de Dados e perspectivas de integração no ambiente do Apoio à Decisão**. Rio de Janeiro: Editora da COOPE/UFRJ, 2000.

variáveis, sendo que o uso de todas as variáveis não deve causar distorções nos resultados da DEA. Sendo assim, optou-se apenas pela validação via correlação conferida pela regressão dos dados em painel. Da mesma forma, também não se fez necessária a utilização de métodos de redução de variáveis como a análise de componente principal (*Principal Component Analysis* - PCA). Assim, as variáveis propostas serão apenas validadas em termos de significância estatística por meio de regressão de dados em painel.

As variáveis foram escolhidas de acordo com suporte encontrado na literatura (Figura 5). Além disso, a variável Emissão de CO₂ é indicador ambiental recomendado pela OECD no texto *OECD Environmental Indicators* (2001), a variável Expectativa de Vida é o indicador de desenvolvimento social sugerido pelo texto *Society at a Glance: OECD Social Indicators* (2014), e a variável Patentes Aplicadas é sugerida como indicador de tecnologia pelos textos *OECD Patent Statistics Manual* (2009) e *Patent Manual* (1994), todos da OECD.

Variável	Artigo	Proxy	Tipo	Método
Expectativa de Vida	Sen (1998)	Desenvolvimento Social	-	-
	Mariano e Rebelatto (2014)	Desenvolvimento Social	<i>Output</i>	DEA
	Despotis (2005)	Desenvolvimento Social	<i>Input</i>	DEA
	Ramanathan (2006)	Desenvolvimento Social	<i>Input</i>	DEA
	Santana et al. (2014)	Desenvolvimento Social	<i>Output</i>	DEA
Emissões de CO₂	Zaim e Taskim (2000)	Desenvolvimento Ambiental	<i>Output</i>	DEA
	Bampatsou e Hadjiconstantinou (2009)	Poluição Ambiental	<i>Output</i>	DEA
	Zhou, Ang e Han (2010)	Poluição Ambiental	<i>Output</i>	DEA
	Yeh, Chen e Lai (2010)	Poluição Ambiental	<i>Output</i>	DEA
	Santana et al. (2014)	Desenvolvimento Ambiental	<i>Output</i>	DEA
PIB	Zaim e Taskim (2000)	Desenvolvimento Econômico	<i>Output</i>	DEA
	Yeh, Chen e Lai (2010)	Produto Agregado	<i>Output</i>	DEA
	Maudos, Pastor e Serrano (1999)	Produto Agregado	<i>Output</i>	DEA
	Lábaj, Luptáčík e Nežinský (2014)	Crescimento Econômico	<i>Output</i>	DEA
	Kumar e Russel (2002)	Crescimento Econômico	<i>Output</i>	DEA
	Zhou, Ang e Han (2010)	Crescimento Econômico	<i>Output</i>	DEA
	Bampatsou e Hadjiconstantinou (2009)	Crescimento Econômico	<i>Output</i>	DEA
	Santana et al. (2014)	Desenvolvimento Econômico	<i>Output</i>	DEA
Patentes Aplicadas	Wang e Huang (2007)	Produto da atividade de P&D	<i>Output</i>	DEA
	Thomas, Jain e Sharma (2009)	Produto da atividade de P&D	<i>Output</i>	DEA
	Sharma e Thomas (2008)	Produto da atividade de P&D	<i>Output</i>	DEA
	Santana et al. (2015)	Capacidade Inovação Nacional	<i>Input</i>	DEA
Estoque de Capital	Zaim e Taskim (2000)	Capital	<i>Input</i>	DEA
	Yeh, Chen e Lai (2010)	Capital	<i>Input</i>	DEA
	Maudos, Pastor e Serrano (1999)	Capital	<i>Input</i>	DEA
	Lábaj, Luptáčík e Nežinský (2014)	Capital	<i>Input</i>	DEA
	Zhou, Ang e Han (2010)	Capital	<i>Input</i>	DEA
Número de Pessoas Empregadas	Zaim e Taskim (2000)	Trabalho	<i>Input</i>	DEA
	Yeh, Chen e Lai (2010)	Trabalho	<i>Input</i>	DEA
	Maudos, Pastor e Serrano (1999)	Trabalho	<i>Input</i>	DEA
	Lábaj, Luptáčík e Nežinský (2014)	Trabalho	<i>Input</i>	DEA
	Zhou, Ang e Han (2010)	Trabalho	<i>Input</i>	DEA

Figura 5 - Usos das variáveis selecionadas na literatura

Analisando de forma preliminar as variáveis (Tabela 5), pode-se observar um elevado nível de correlação entre os *outputs* PIB e emissões de CO₂ e os *inputs*, indicando bom potencial de interação entre essas variáveis. A grande quantidade de países em estudo impede que as altas

correlações entre as variáveis tenham algum efeito sobre a discriminação dos modelos DEA (*thumb rule*). Destaca-se também a tendência de comportamento inverso entre as variáveis Pessoas Empregadas e Expectativa de Vida, com coeficiente de correlação negativo, ainda que pouco significativo.

Tabela 5 - Matriz de correlação das variáveis

	PIB Real Constante	Expectativa de vida	Emissão de CO₂	Estoque de Capital	Número de Pessoas Empregadas	Patentes Aplicadas
PIB Real Constante	1,000					
Expectativa de vida	0,121	1,000				
Emissão de CO₂	0,945	0,017	1,000			
Estoque de Capital	0,908	0,164	0,832	1,000		
Pessoas Empregadas	0,610	-0,128	0,757	0,510	1,000	
Patentes Aplicadas	0,839	0,189	0,745	0,780	0,385	1,000

Os países foram selecionados conforme a maior disponibilidade dos dados encontrados ao longo do tempo, dessa forma o conjunto de países é composto de acordo com a Tabela 6. O espaço temporal é definido pelo período compreendido entre os anos de 2000 e 2010 (11 anos - maior serie de dados recentes disponíveis sem intervalos), assim, organizando os dados em forma de painel.

Tabela 6 - Conjunto de países em estudo e suas respectivas classificações regionais

Região	Nº Países	Países
África	4	África do Sul, Egito, Madagascar, Tunísia
América-Central	4	Guatemala, Jamaica, México*, Panamá
América-Norte	2	Canadá*, Estados Unidos*
América-Sul	8	Argentina, Brasil, Chile*, Colômbia, Equador, Paraguai, Peru, Uruguai
Ásia-Central	3	Cazaquistão, Quirguistão, Uzbequistão
Ásia-Leste	4	China, Coreia do Sul*, Hong Kong, Japão*
Ásia-Oeste	7	Armênia, Chipre, Geórgia, Iêmen, Israel*, Jordânia, Turquia*
Ásia-Sul	11	Bangladesh, Filipinas, Índia, Indonésia, Irã, Malásia, Paquistão, Singapura, Sri Lanka, Tailândia, Vietnam
Europa-Leste	10	Bielorrússia, Bulgária, Eslováquia*, Hungria*, Moldávia, Polônia*, República Tcheca*, Romênia, Rússia, Ucrânia
Europa-Norte	10	Dinamarca*, Estônia*, Finlândia*, Irlanda*, Islândia*, Letônia, Lituânia, Noruega*, Reino Unido*, Suécia*
Europa-Oeste	7	Alemanha*, Áustria*, Bélgica*, França*, Holanda*, Luxemburgo*, Suíça*
Europa-Sul	7	Albânia, Croácia, Eslovênia*, Espanha*, Grécia*, Itália*, Portugal*
Oceania	2	Austrália*, Nova Zelândia*

(*) Países membros da OECD

Dessa forma, o estudo abrange, no total, 79 países distribuídos por todos os continentes, agrupados em sub-regiões de acordo com a definição da ONU³⁴.

4.2 Método

Tendo em vista o objetivo proposto pelo estudo, o método utilizado para verificar a contribuição da inovação tecnológica para a eficiência é composto por três fases: i) validação dos dados a serem utilizados nos modelos de DEA; ii) aplicação dos modelos de DEA; e iii) aplicação dos modelos de Análise Envoltória de Dados em dois estágios (DEA e subsequente regressão).

4.2.1 Validação dos dados dos modelos de DEA

As análises econométricas, para validação dos dados, foram feitas sob três óticas: econômica, social e ambiental. Para tal, utilizou-se uma função de produção adaptada do tipo Cobb-Douglas, composta da seguinte forma:

$$Y = F(K, L) = K^{\alpha} L^{\beta} T^{\gamma} \quad (27)$$

Onde: Y é o produto, K é o capital (ou investimento), L é o trabalho e T é a tecnologia.

Para a modelagem econométrica, a variável capital (K) é preenchida pelo Estoque de Capital, que corresponde ao montante de investimentos feitos pelo país em estudo, a variável trabalho (L) é preenchida pelo Número de Pessoas Empregadas, que corresponde à força de trabalho empregada no país em estudo e, por fim, a variável tecnologia (T) é preenchida pelo número de patentes aplicadas, que corresponde à uma *proxy* do nível de inovação tecnológica do país.

Considerando os aspectos econômico, ambiental e social da análise, os produtos são representados pelo PIB real, pela quantidade emitida de CO₂, e pela expectativa de vida, respectivamente, tanto de formas separadas, um produto analisado por vez, quanto todos os três produzidos conjuntamente (este último apenas utilizando DEA).

Sendo assim, as equações do modelo econométrico assumem as seguintes formas:

$$\ln Y_{Eco\,it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln K_{it} + \alpha_2 \ln L_{it} + \alpha_3 \ln T_{it} + \varepsilon_{it} \quad (28)$$

³⁴ ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. World Population Prospects: The 2012 Revision. Disponível em: <http://esa.un.org/wpp/Documentation/pdf/WPP2012_Volume-I_Comprehensive-Tables.pdf>. Acesso em: 17 mar 2015.

$$\ln Y_{Amb_{it}} = \beta_0 + \beta_1 \ln K_{it} + \beta_2 \ln L_{it} + \beta_3 \ln T_{it} + \varepsilon_{it} \quad (29)$$

$$\ln Y_{Soc_{it}} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln K_{it} + \gamma_2 \ln L_{it} + \gamma_3 \ln T_{it} + \varepsilon_{it} \quad (30)$$

Onde: α_n , β_n , e γ_n ($n = 0, \dots, 3$) são os coeficientes estimados, Y_{Eco} é o PIB real, Y_{Amb} são as emissões de CO₂, Y_{Soc} é a expectativa de vida, K é o estoque de capital, L é o número de pessoas empregadas e T é o número de patentes aplicadas.

Os modelos foram estimados com os dados configurados em painel, optando pelo de efeitos fixos ou aleatórios, de acordo com a orientação do teste de Hausman. A análise econométrica, realizada com o uso do *software* estatístico Stata 13 e considerando o método de matriz de covariância de White (consistência à presença de heterocedasticidade), tem o objetivo de demonstrar a robustez dos modelos propostos e validar as variáveis, que constituírem relações estatisticamente significativas entre *outputs* e *inputs*, que finalmente serão utilizadas na DEA. Também será feita uma terceira estimativa dos modelos, considerando o método de Mínimos Quadrados Generalizados Factíveis – MQGF, dada a necessidade de consistência à presença de autocorrelação, esta observada pelo teste de Wooldridge³⁵ e pelo teste de Pesaran³⁶. Nesse método, a autocorrelação foi controlada utilizando os mecanismos do Stata 13 de: i) painéis correlacionados, no qual assume-se que os termos de erro do painel são correlacionados, dada as diferentes escalas das variâncias; e ii) painel-específico AR(1), que determina que há autocorrelação do tipo AR(1) e que o coeficiente AR(1) é específico para cada painel.

4.2.2 Aplicação dos modelos de DEA

Após a etapa de validação das variáveis, via regressão, segue-se a etapa de cálculo das eficiências. Dado o limite de capacidade de restrições do aplicativo Solver do *software* Microsoft Excel, foi inviável a utilização de modelos mais recentes como o DEA SBM Orientado, devido ao grande número de DMUs em janela. Desse modo, o modelo escolhido foi BCC, utilizando-se o *software* Banxia Frontier Analyst Professional, disponível no departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da EESC-USP.

³⁵ DRUKKER, D. M. et al.. Testing for serial correlation in linear panel-data models. **Stata Journal**, v. 3, n. 2, p. 168-177, 2003.

³⁶ DE HOYOS, R. E.; SARAFIDIS, V. Testing for cross-sectional dependence in panel-data models. **Stata Journal**, v. 6, n. 4, p. 482, 2006.

É válido ressaltar que o *software* Frontier Analyst é capaz de calcular o modelo DEA SBM, mas apenas na sua forma não orientada. Como o objetivo do presente trabalho visa à maximização dos *outputs* sem a diminuição dos *inputs*, foi necessário orientar o modelo BCC ao *output*.

Considerando que os modelos de eficiência ambiental e de desenvolvimento sustentável possuem outputs indesejáveis, no caso emissão de CO₂, optou-se pela técnica do vetor de translação, encontrada em Scheel (2001) e Seiford e Zhu (2002), para o tratamento dessa variável, tendo em vista que ela é capaz de preservar a convexidade da DEA.

Dessa forma, os modelos DEA BCC assumem, desde que as variáveis dos modelos independentes sejam validadas, formas conforme a Figura 6:

Figura 6 - Modelos DEA em estudo e suas respectivas variáveis

A disposição de dados em painel (79 países ao longo de 11 anos – 2000 a 2010) permitiu a realização da análise estática da eficiência, além da análise em janela e do índice Malmquist. Conforme exposto no capítulo de referencial metodológico, a análise em janela de DEA foi composta por 6 janelas (p), com amplitude de 6 anos por janela (w), totalizando assim 474 “DMUs” em cada janela (d).

$$p = \frac{k+1}{2} = \frac{11+1}{2} = 6$$

$$w = k - p + 1 = 11 - 6 + 1 = 6 \quad (31)$$

$$d = np = 79 \times 6 = 474$$

Tabela 7 - Horizonte temporal das janelas

Janela	Amplitude
1	2000 – 2005
2	2001 – 2006
3	2002 – 2007
4	2003 – 2008
5	2004 – 2009
6	2005 – 2010

Ao final da etapa de cálculo das eficiências, em caso de empate no *ranking*, optou-se pela técnica do índice composto para o desempate das DMUs. Embora o índice triplo³⁷ seja uma abordagem mais recente, novamente a limitação técnica do aplicativo Solver, dado o número máximo de restrições, impediu o uso deste. Assim, a opção pelo índice composto se deu pela sua robustez e várias aplicações na literatura.

4.2.3 Aplicação dos modelos em dois estágios

Por fim, na terceira fase do método de estudo, para o cálculo da contribuição da inovação tecnológica para o desenvolvimento sustentável, será calculado o modelo DEA em dois estágios. No primeiro estágio, uma nova análise envoltória de dados será rodada, da mesma forma da anterior, porém dessa sem a inclusão da variável patentes dentre os *inputs*, considerando como *inputs* apenas estoque de capital e pessoas empregadas.

³⁷ Vide tópico 2.1 **Estado da Arte**: Mariano e Rebelatto (2014).

Figura 7 - Modelos DEA em dois estágios em estudo e suas respectivas variáveis

No segundo estágio, após a nova DEA, outra análise econométrica foi realizada, considerando como variável explicativa os índices de eficiência obtidos nos modelos DEA. Dessa forma, para avaliar o impacto da variável tecnológica (T) na eficiência, a mesma foi preenchida pelo número de patentes aplicadas, que corresponde à uma *proxy* do nível de inovação tecnológica do país. A execução desse segundo estágio abre a possibilidade de se fazer inferências quanto aos resultados da DEA com segurança estatística, incrementando ainda mais o ferramental da DEA e compondo um diferencial do presente trabalho.

Sendo assim, as equações do modelo econométrico pós DEA assumem as seguintes formas:

$$\ln S_{Eco\ it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln T_{it} + \varepsilon_{it} \quad (32)$$

$$\ln S_{Amb\ it} = \beta_0 + \beta_1 \ln T_{it} + \varepsilon_{it} \quad (33)$$

$$\ln S_{Soc\ it} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln T_{it} + \varepsilon_{it} \quad (34)$$

$$\ln S_{Des\ it} = \delta_0 + \delta_1 \ln T_{it} + \varepsilon_{it} \quad (35)$$

Onde: α_n , β_n , γ_n e δ_n ($n = 0, 1$) são os coeficientes estimados, S_{Eco} são os escores de eficiência resultados do modelo DEA econômico, S_{Amb} são os escores de eficiência resultados do modelo DEA ambiental, S_{Soc} são os escores de eficiência resultados do modelo DEA social, S_{Des}

são os escores de eficiência resultados do modelo DEA desenvolvimento sustentável e T é o número de patentes aplicadas.

Os modelos pós-DEA também serão estimados com os dados configurados em painel, optando pelo de efeitos fixos ou aleatórios, além do método de MQGF com os mesmos mecanismos de controles de autocorrelação da etapa de validação, utilizando o *software* estatístico Stata 13. Ressalta-se que, embora os escores de eficiência resultantes da DEA possuam distribuição censurada (variem entre 0 e 1 ou 0 e 100), conforme Proite e Sousa (2004) e Poveda e Martinez (2011), ao se aplicar o logaritmo natural nos valores da variável, esta adquire padrão linear, assim permitindo a estimação econométrica via regressão linear em painel.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Validação Econométrica Pré-DEA

A análise por regressão de dados em painel permitiu avaliar, para as aplicações econômica, social e ambiental, quais variáveis eram robustas a cada modelo para o consequente cálculo da DEA. Com relação ao modelo econômico, este apresentou tanto para efeitos fixos quanto para efeitos aleatórios ajuste satisfatório, sendo o teste F estatisticamente significativo. O ajuste do modelo também foi estatisticamente significativo no MQGF.

Com respeito às variáveis, o modelo econômico também apresentou ajuste bastante satisfatório (Tabela 8). Para ambos os efeitos, as variáveis apresentaram significância a pelo menos 90%, um nível estatisticamente bastante aceitável, exceto a variável Patentes, que não foi significativa em nenhum modelo de efeitos. Entretanto, considerando-se a estimativa dada pelo MQGF, robusto à autocorrelação e heterocedasticidade, todas as variáveis foram estatisticamente significantes, demonstrando que todas são válidas para o cálculo das eficiências pelo DEA. Todas as variáveis também apresentaram relação positiva com a variável dependente, no caso o PIB.

Tabela 8 - Resultados da regressão para o modelo econômico

Variável dependente: PIB		Período: 2000 - 2010		
	MQO	Efeitos Fixos	Efeitos Aleatórios	MQGF
Intercepto	0,8228 ^A (0,000)	1,6880 ^E (0,103)	1,4216 ^B (0,003)	1,0578 ^A (0,000)
Estoque de Capital	0,8170 ^A (0,000)	0,6850 ^A (0,000)	0,7667 ^A (0,000)	0,8021 ^A (0,000)
Pessoas Empregadas	0,1220 ^A (0,000)	0,6974 ^A (0,000)	0,2607 ^A (0,000)	0,1460 ^A (0,000)
Patentes	0,0367 ^A (0,000)	0,0059 ^E (0,638)	0,0099 ^E (0,435)	0,0093 ^B (0,020)
R ²	0,9731	0,9246	0,9676	-
Wald Chi ² (gl) ou F(gl)	12.170,52 (0,000)	110,72 (0,000)	1.939,44 (0,000)	87.357,26 (0,000)
Teste F	98,72 (0,000)			
Teste Breusch e Pagan LM	3.354,10 (0,000)			
Teste de Hausman	2,12 (0,000)			

Obs: Nível de significância: (A) 0,001; (B) 0,01; (C) 0,05; (D) 0,1; (E) não significante.

Considerando o modelo ambiental, a exemplo do modelo econômico, este também apresentou tanto para efeitos fixos, efeitos aleatórios quanto para MQGF ajuste satisfatório, sendo a estatística F estatisticamente significativa, apesar do baixo valor de F nos efeitos fixos.

As variáveis para o modelo ambiental apresentaram significância a pelo menos 90%, um nível estatisticamente bastante aceitável, exceto a variável Pessoas Empregadas nos efeitos fixos (Tabela 9).

Tabela 9 - Resultados da regressão para o modelo ambiental

Variável dependente: Emissões de CO ₂		Período: 2000 - 2010		
	MQO	Efeitos Fixos	Efeitos Aleatórios	MQGF
Intercepto	0,6142 ^B (0,096)	5,5012 ^A (0,000)	4,2703 ^A (0,000)	0,5706 ^B (0,002)
Estoque de Capital	0,7168 ^A (0,000)	0,3366 ^B (0,002)	0,4194 ^A (0,000)	0,7256 ^A (0,000)
Pessoas Empregadas	0,2350 ^A (0,000)	0,3986 ^E (0,106)	0,4406 ^A (0,000)	0,2380 ^A (0,000)
Patentes	0,0785 ^A (0,000)	0,0532 ^A (0,000)	0,0610 ^A (0,000)	0,0667 ^A (0,000)
R ²	0,9040	0,8826	0,8872	-
Wald Chi ² (gl) ou F (gl)	3025,55 (0,000)	17,05 (0,000)	252,27 (0,000)	7.216,65 (0,000)
Teste F	270,41 (0,000)			
Teste Breusch e Pagan LM	3.945,42 (0,000)			
Teste de Hausman	46,10 (0,000)			

Obs: Nível de significância: (A) 0,001; (B) 0,01; (C) 0,05; (D) 0,1; (E) não significativo.

Analisando agora a regressão para o modelo social, a exemplo dos demais modelos, este também apresentou ajuste do modelo satisfatório, sendo a estatística F estatisticamente significativa, apesar do baixo valor de F nos efeitos fixos.

Assim como nos outros modelos, os resultados da regressão para as variáveis do modelo social pelo método de MQGF apresentaram um ajuste bastante satisfatório (Tabela 10), apresentando significância a pelo menos 99%.

Tabela 10 - Resultados da regressão para o modelo social

Variável dependente: Expectativa de Vida	Período: 2000 - 2010			
	MQO	Efeitos Fixos	Efeitos Aleatórios	MQGF
Intercepto	3,6856 ^A (0,000)	3,5678 ^A (0,000)	3,6332 ^A (0,000)	3,6728 ^A (0,000)
Estoque de Capital	0,0524 ^A (0,000)	0,0485 ^A (0,000)	0,0532 ^A (0,000)	0,0549 ^A (0,000)
Pessoas Empregadas	-0,0631 ^A (0,000)	0,0528 ^A (0,000)	-0,0129 ^E (0,170)	-0,0631 ^A (0,000)
Patentes	0,0063 ^A (0,001)	-0,0008 ^E (0,417)	-0010 ^E (0,402)	0,0033 ^A (0,000)
R ²	0,5745	0,0004	0,1041	-
Wald Chi ² (gl) ou F(gl)	462,43 (0,000)	52,51 (0,000)	114,60 (0,000)	7.088,76 (0,000)
Teste F	360,65 (0,000)			
Teste Breusch e Pagan LM	3.858,02 (0,000)			
Teste de Hausman	507,85 (0,000)			

Obs: Nível de significância: (A) 0,001; (B) 0,01; (C) 0,05; (D) 0,1; (E) não significante.

Confirmada a presença de autocorrelação nos três modelos apontadas pelos testes de Wooldridge e Pesaran (Tabela 11), sendo os valores p pequenos o suficiente para não aceitar as hipóteses nulas de que não há autocorrelação, serão considerados os resultados dos modelos de MQGF. Dessa forma, contabilizando todos os resultados das regressões para os três modelos, conclui-se que todas as variáveis propostas (Estoque de capital, Pessoas Empregadas, e Patentes) são estatisticamente válidas para a aplicação da DEA (Figura 8).

Tabela 11 - Teste de autocorrelação em dados em painel

	Teste de Wooldridge	Teste de Pesaran	
		Efeitos Fixos	Efeitos Aleatórios
Modelo Econômico	436,75 (0,000)	57,43 (0,000)	31,46 (0,000)
Modelo Social	36,38 (0,000)	45,36 (0,000)	86,59 (0,000)
Modelo Ambiental	63,27 (0,000)	13,11 (0,000)	15,11 (0,000)

Variável	Ótica Econômica	Ótica Social	Ótica Ambiental
Estoque de Capital	Válido	Válido	Válido
Pessoas Empregadas	Válido	Válido	Válido
Patentes	Válido	Válido	Válido

Figura 8 - Validação das variáveis pela regressão em painel

Em suma, a composição de variáveis para as quatro aplicações da DEA é dada conforme mostra a Figura 9. Como todas as variáveis *inputs* foram validadas para todos os modelos do tripé sustentável, também foram consideradas válidas para o modelo com três *outputs* de desenvolvimento sustentável.

Ótica	Inputs	Outputs
Econômica	Estoque de Capital, Pessoas Empregadas, Patentes	PIB
Social	Estoque de Capital, Pessoas Empregadas, Patentes	Expectativa de Vida
Ambiental	Estoque de Capital, Pessoas Empregadas, Patentes	Emissão de CO ₂
Desenvolvimento Sustentável	Estoque de Capital, Pessoas Empregadas, Patentes	PIB, Expectativa de Vida, Emissão de CO ₂

Figura 9 - Composição de variáveis dos modelos DEA após validação via regressão

5.2 Resultados da Análise por Envolvência de Dados

Com a DEA, foi possível estabelecer um *ranking* dos países em termos de suas eficiências na transformação dos insumos estoque de capital, trabalho e tecnologia em desenvolvimento sustentável e em seus componentes econômico, social e ambiental, separadamente.

5.2.1 Resultados para o Modelo Econômico

Tomando inicialmente as análises para o modelo econômico, observou-se que o EUA foi, ao longo do período, o país mais eficiente na conversão dos *inputs* em crescimento econômico (Tabela 12), mas com desempenho bastante próximo dos subsequentes Irlanda e Índia. Dentre os 20 países mais eficientes, 13 são membros da OECD e 10 são europeus (todos pertencentes à OECD), podendo ser estas características determinantes do bom desempenho. Com relação aos grandes

emergentes, apenas Índia, Turquia e China estão entre os 20 primeiros, com destaque para a Índia, que alcançou a terceira posição classificação no ranking.

Tabela 12 - *Ranking* dos resultados da análise de janela dos 20 países mais eficientes sob a ótica econômica

Rank	País	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
1º	EUA	99,14	99,89	99,92	100,00	100,00	99,80	99,793	0,000
2º	Irlanda	99,92	100,00	99,88	99,77	99,72	99,21	99,748	0,000
3º	Índia	99,68	99,73	99,84	99,99	99,67	99,56	99,746	0,000
4º	Espanha	99,27	99,27	98,93	99,28	99,50	99,53	99,297	0,000
5º	Noruega	99,54	99,53	99,29	99,38	99,35	98,63	99,287	0,000
6º	Itália	99,51	99,45	99,49	99,54	99,00	98,58	99,261	0,000
7º	Egito	98,29	98,42	99,31	99,72	99,52	99,34	99,101	0,000
8º	Canadá	99,91	99,83	99,66	99,11	98,11	97,34	98,994	0,000
9º	Islândia	96,27	98,42	99,63	99,64	99,65	99,71	98,887	0,000
10º	Luxemburgo	99,20	99,42	99,75	99,27	97,61	96,22	98,577	0,000
11º	França	97,51	97,24	97,36	98,23	98,72	99,13	98,029	0,000
12º	Turquia	96,35	96,90	98,58	99,47	98,34	97,98	97,935	0,000
13º	Holanda	98,84	97,50	96,48	97,39	97,85	98,30	97,725	0,000
14º	China	98,21	97,84	97,65	97,98	97,22	97,11	97,666	0,000
15º	Bélgica	97,41	97,44	97,13	97,93	98,03	97,81	97,624	0,000
16º	Panamá	89,10	93,10	96,78	99,54	98,84	97,96	95,884	0,001
17º	Iêmen	97,03	98,29	95,93	93,96	92,78	95,41	95,566	0,000
18º	Quirguistão	94,07	93,41	96,44	96,35	95,22	97,27	95,459	0,000
19º	Portugal	97,86	98,13	97,20	94,17	90,30	86,80	94,076	0,002
20º	Armênia	97,18	98,36	96,94	94,14	88,24	87,74	93,766	0,002

Agrupando os países de acordo com suas sub-regiões (Tabela 13), entre 2000 e 2010, a América do Norte, composta por EUA e Canadá, apresentou o melhor desempenho econômico, consideravelmente acima da Europa-Norte, segunda colocada. Nesses dois grupos, 10 dos 12 países são membros da OECD. Também se destacam os baixos desempenhos das regiões Europa-Leste, Oceania e América do Sul, compostas por 20 países (sendo sete membros da OECD) e que abrigam importantes economias como Brasil, Rússia e Austrália. Ressalva deve ser feita ao desempenho da África, muito puxado pelo bom desempenho do Egito, em detrimento de África do Sul, Madagáscar e Tunísia.

Tabela 13 - *Ranking* dos resultados da análise de janela para sub-regiões sob a ótica econômica

Rank	Sub-Região	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
1º	América-Norte	99,53	99,86	99,79	99,56	99,05	98,57	99,39	0,000
2º	Europa-Norte	92,88	92,64	92,46	93,14	93,00	92,83	92,82	0,000
3º	Ásia-Sul	86,34	86,13	86,90	88,08	87,20	89,73	87,40	0,000
4º	Europa-Sul	83,50	85,18	85,63	86,34	85,73	86,17	85,43	0,000
5º	África	77,90	78,76	80,02	81,33	81,85	82,68	80,42	0,000
6º	Europa-Oeste	74,25	75,49	76,06	76,89	76,89	81,14	76,79	0,000
7º	Ásia-Oeste	74,31	75,42	74,42	75,54	76,12	78,06	75,65	0,000
8º	Ásia-Leste	73,49	74,42	74,89	75,97	76,10	76,05	75,15	0,000
9º	América-Central	69,63	70,69	71,80	73,37	74,99	76,28	72,79	0,001
10º	Ásia-Central	64,44	67,14	70,29	72,43	73,34	76,08	70,62	0,002
11º	Oceania	62,65	63,37	64,99	66,43	67,67	70,01	65,85	0,001
12º	América-Sul	52,47	54,94	57,45	60,75	63,47	66,86	59,33	0,002
13º	Europa-Leste	51,55	54,99	58,16	61,54	63,46	65,12	59,14	0,002

Com relação aos fatores endógenos ao estudo, que envolvem o desempenho econômico dos países (Figura 10) ao longo do período, a variável estoque de capital tem sido o principal fator para a eficiência econômica, contrabalanceando a contribuição das variáveis pessoas empregadas e patentes para a eficiência. Dessa forma, observa-se que a variável patentes apresentou pouco peso na eficiência econômica no período em estudo.

Figura 10 - Evolução da contribuição média das variáveis inputs para a eficiência econômica dos países entre 2000 e 2010

Tomando-se a evolução da produtividade total dos fatores (PTF) (Anexo A Tabela 30), observa-se que nos anos afetados pela crise econômica, principalmente 2008 e 2009, a PTF caiu em praticamente todas as sub-regiões (inclusive na média total), exceto na América do Sul. Diferentemente da produtividade, a eficiência (Anexo A Tabela 31), na maioria das sub-regiões, apresentou crescimento mesmo nos anos de crise econômica. Nesse caso, a Ásia Central também apresenta bom desempenho, com a eficiência média de seus países crescendo em todo o período em estudo.

De forma geral, os países apresentaram ganhos de eficiência econômica em todos os anos em análise, contrapondo-se aos dois anos de redução da PTF, correspondentes aos de 2008 e 2009 de crise financeira mundial. Ao final do período, apresentaram ganho acumulado de PTF (Figura 11), em média, de 14% e ganho de eficiência de 21%.

Figura 11 - Produtividade total dos fatores (índice Malmquist) e eficiência (*catch-up*) acumulados (em média dos países) em 2010 para o modelo econômico

5.2.2 Resultados para o Modelo Social

Considerando as análises para o modelo social, observou-se que a Islândia foi, ao longo do período, o país mais eficiente na conversão dos *inputs* em aumento da expectativa de vida, sucedido por Luxemburgo e Chipre (Tabela 14). Dentre os 20 países mais eficientes, 17 são membros da OECD e 13 são europeus (todos pertencentes a OECD), podendo ser, assim como no modelo econômico, características determinantes ao bom desempenho. Destaca-se a ausência de grandes emergentes como Brasil, Rússia, Índia, China (BRICs), México, Indonésia, Coreia do Sul e Turquia (MIST) entre os 20 países mais eficientes socialmente.

Tabela 14 - *Ranking* dos resultados da análise de janela dos 20 países mais eficientes sob a ótica social

Rank	País	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
1º	Islândia	99,63	99,92	99,93	99,92	99,84	99,72	99,826	0,000
2º	Luxemburgo	98,99	99,30	99,00	98,96	98,52	98,16	98,819	0,000
3º	Chipre	99,75	99,51	98,12	98,05	98,37	98,68	98,745	0,000
4º	Suíça	98,73	98,12	98,30	98,51	98,70	98,81	98,528	0,000
5º	Suécia	98,13	96,62	96,87	97,11	97,36	97,50	97,262	0,000
6º	Grécia	97,39	97,10	96,90	96,95	97,04	97,12	97,083	0,000
7º	Japão	99,51	96,09	96,31	96,51	96,74	96,90	97,008	0,000
8º	Espanha	97,57	96,39	96,51	96,65	96,87	97,08	96,844	0,000
9º	Hong Kong	99,58	95,89	96,07	96,24	96,53	96,76	96,843	0,000
10º	Bélgica	96,06	96,34	96,50	96,64	96,86	96,96	96,560	0,000
11º	Israel	97,53	95,23	96,25	96,42	96,68	96,88	96,499	0,000
12º	Irlanda	95,47	95,81	96,13	96,45	96,72	97,01	96,265	0,000
13º	Áustria	96,54	95,84	95,92	96,06	96,23	96,34	96,154	0,000
14º	Holanda	96,32	95,42	95,67	95,92	96,23	96,44	96,000	0,000
15º	Portugal	96,75	96,83	95,45	95,53	95,64	95,71	95,986	0,000
16º	Nova Zelândia	96,99	95,20	95,37	95,51	95,64	95,71	95,735	0,000
17º	Finlândia	95,94	95,33	95,49	95,67	95,85	95,99	95,709	0,000
18º	Itália	98,14	94,51	94,78	95,07	95,47	95,78	95,624	0,000
19º	Armênia	99,16	98,23	96,10	94,64	92,96	92,08	95,526	0,001
20º	Austrália	97,89	94,37	94,69	94,98	95,23	95,47	95,436	0,000

Agrupando os países de acordo com suas sub-regiões (Tabela 15), entre 2000 e 2010, a Europa-Oeste apresentou o melhor desempenho social, pouco acima da Oceania, segunda colocada. Nesses dois grupos todos os 9 países são membros da OECD. Também destacam-se os maus desempenhos das regiões África, Ásia-Sul e Ásia-Central, compostas por 18 países (nenhum membros da OECD) e que abrigam importantes economias emergentes como Índia, Indonésia e Singapura.

Tabela 15 - *Ranking* dos resultados da análise de janela para sub-regiões sob a ótica social

Rank	Sub-Região	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
1º	Europa-Oeste	97,10	95,86	96,00	96,20	96,36	96,47	96,33	0,000
2º	Oceania	97,44	94,78	95,03	95,24	95,44	95,59	95,59	0,000
3º	Europa-Sul	95,72	95,02	94,79	94,95	95,16	95,32	95,16	0,000
4º	Europa-Norte	94,47	93,66	93,46	93,62	93,85	94,06	93,86	0,000
5º	Ásia-Leste	95,69	92,37	92,70	93,02	93,35	93,64	93,46	0,000
6º	América-Norte	95,71	92,26	92,45	92,65	92,84	93,04	93,16	0,000
7º	Ásia-Oeste	91,66	91,12	90,56	90,36	90,20	90,13	90,67	0,000
8º	América-Central	92,22	90,54	89,37	89,17	89,12	89,62	90,01	0,000
9º	América-Sul	90,15	89,36	89,26	89,35	89,51	89,67	89,55	0,000
10º	Europa-Leste	87,05	85,99	86,12	86,40	86,71	86,97	86,54	0,000
11º	Ásia-Central	86,58	86,03	85,72	85,56	85,48	85,79	85,86	0,000
12º	Ásia-Sul	86,06	84,88	84,93	85,03	85,16	85,32	85,23	0,000
13º	África	80,37	79,56	78,82	78,47	78,48	80,12	79,30	0,000

Com relação *inputs*, que envolvem o desempenho social dos países (Figura 12) ao longo do período, a variável patentes tem sido o principal fator para a eficiência social, com pesos bastante superiores aos das variáveis estoque de capital e pessoas empregadas, mesmo com tendência de redução da contribuição nos últimos anos, balanceado pelo aumento dos pesos da variável estoque de capital.

Figura 12 - Evolução da contribuição média das variáveis inputs para a eficiência social dos países entre 2000 e 2010

Avaliando-se a evolução da produtividade total dos fatores (Anexo A Tabela 33), observa-se que a maioria dos subcontinentes as variáveis de *input* estoque de capital, pessoas empregadas e patentes apresentaram aumento de produtividade, ainda que pequeno, no período em estudo, não sendo nem mesmo influenciados nos anos de crise. O mesmo pode ser observado com o agrupamento dos países membros da OECD. Diferentemente da produtividade, a eficiência (Anexo A Tabela 34), todas as sub-regiões, apresentaram redução da eficiência social por no mínimo duas vezes durante o referido período, inclusive países OECD.

De forma geral, ainda que pequeno, os países apresentaram ganhos de PTF social em todos os anos em análise, acumulando ganhos de 3%, e contrapondo-se a evolução irregular da eficiência social no período. Mesmo com o ganho de capacidade de os *inputs* produzirem índices maiores de expectativa de vida, a eficiência da conversão dos inputs não conseguiu seguir o padrão da PTF, acumulando ao final do período perda de aproximadamente 1% de eficiência (Figura 13).

Figura 13 - Produtividade total dos fatores (índice Malmquist) e eficiência (*catch-up*) acumulados (em média dos países) em 2010 para o modelo social

5.2.3 Resultados para o Modelo Ambiental

Considerando agora as análises para o modelo ambiental, observou-se que a Islândia foi, ao longo do período, o país mais eficiente na redução das emissões de CO₂ pelo consumo de seus *inputs*, sucedido por Madagascar e Armênia (Tabela 16). Dentre os 20 países mais eficientes, apenas quatro são membros da OECD indicando que esta não é necessariamente uma característica determinante ao bom desempenho. Destaca-se a ausência de grandes economias como EUA, China, Alemanha e Japão, que ocupam as últimas posições do *ranking* de desempenho ambiental (Tabela 17). Assim como apontaram Hansmann, Mieg e Frischknecht (2012) e Kaivo-Oja et al. (2014), as esferas econômica e ambiental podem apresentar de fato não apenas movimentos opostos, mas bem como conflitantes.

Tabela 16 - *Ranking* dos resultados da análise de janela dos 20 países mais eficientes sob a ótica ambiental

Rank	País	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
1º	Islândia	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	0,000
2º	Madagascar	99,995	99,997	99,995	100,000	100,000	100,000	99,998	0,000
3º	Armênia	99,997	99,993	99,988	99,983	99,980	99,978	99,987	0,000
4º	Quirguistão	99,987	99,983	99,982	99,982	99,982	99,982	99,983	0,000
5º	Albânia	99,988	99,985	99,980	99,980	99,980	99,980	99,982	0,000
6º	Chipre	99,993	99,992	99,977	99,972	99,978	99,982	99,982	0,000
7º	Paraguai	99,980	99,982	99,980	99,980	99,978	99,977	99,979	0,000
8º	Moldávia	99,980	99,977	99,975	99,973	99,970	99,970	99,974	0,000
9º	Geórgia	99,978	99,977	99,973	99,968	99,965	99,962	99,971	0,000
10º	Uruguai	99,967	99,963	99,962	99,957	99,952	99,950	99,958	0,000
11º	Panamá	99,963	99,960	99,955	99,952	99,947	99,940	99,953	0,000
12º	Letônia	99,960	99,958	99,948	99,945	99,945	99,943	99,950	0,000
13º	Luxemburgo	99,970	99,967	99,953	99,943	99,927	99,920	99,947	0,000
14º	Jamaica	99,953	99,927	99,913	99,908	99,910	99,927	99,923	0,000
15º	Guatemala	99,907	99,902	99,898	99,897	99,895	99,897	99,899	0,000
16º	Sri Lanka	99,903	99,902	99,898	99,900	99,897	99,895	99,899	0,000
17º	Lituânia	99,898	99,897	99,883	99,880	99,880	99,878	99,886	0,000
18º	Eslovênia	99,868	99,865	99,863	99,860	99,860	99,862	99,863	0,000
19º	Estônia	99,868	99,872	99,862	99,855	99,858	99,860	99,863	0,000
20º	Iêmen	99,850	99,840	99,828	99,818	99,810	99,810	99,826	0,000

Tabela 17 - *Ranking* dos resultados da análise de janela dos 10 países menos eficientes sob a ótica ambiental

Rank	País	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
70º	Coreia do Sul	95,388	95,348	95,272	95,207	95,135	94,993	95,224	0,000
71º	Irã	95,828	95,600	95,365	95,090	94,825	94,618	95,221	0,000
72º	Reino Unido	94,597	94,600	94,635	94,657	94,765	94,843	94,683	0,000
73º	Canadá	94,598	94,572	94,513	94,475	94,542	94,630	94,555	0,000
74º	Alemanha	91,712	91,747	91,863	91,947	92,115	92,248	91,939	0,000
75º	Japão	87,720	87,702	87,620	87,640	87,868	88,017	87,761	0,000
76º	Índia	87,245	86,717	86,038	85,067	83,898	82,798	85,294	0,000
77º	Rússia	84,180	83,993	83,810	83,553	83,605	83,377	83,753	0,000
78º	China	56,355	51,338	45,833	40,267	34,987	29,987	43,128	0,008
79º	EUA	42,898	42,858	42,480	42,470	43,087	43,683	42,913	0,000

Tomando os agrupamentos os países de acordo com suas sub-regiões (Tabela 18), entre 2000 e 2010, a Ásia-Oeste apresentou o melhor desempenho ambiental, pouco acima da Europa-Norte. Nesses dois grupos, nove dos 17 países são membros da OECD. Também destacam-se os maus

desempenhos das regiões América-Norte e Ásia-Leste, que possuem as três maiores economias mundiais China, EUA e Japão.

Tabela 18 - *Ranking* dos resultados da análise de janela para sub-regiões sob a ótica ambiental

Rank	Sub-Região	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
1º	Ásia-Oeste	99,56	99,54	99,51	99,49	99,47	99,45	99,50	0,000
2º	Europa-Norte	99,19	99,19	99,19	99,19	99,21	99,21	99,20	0,000
3º	América-Sul	99,20	99,18	99,15	99,12	99,09	99,05	99,13	0,000
4º	Ásia-Central	99,09	99,05	99,01	98,98	98,95	98,91	99,00	0,000
5º	América-Central	98,95	98,92	98,89	98,85	98,83	98,82	98,88	0,000
6º	Europa-Sul	98,62	98,60	98,58	98,58	98,60	98,64	98,60	0,000
7º	África	98,65	98,61	98,54	98,47	98,39	98,36	98,50	0,000
8º	Oceania	98,14	98,10	98,06	98,02	97,98	97,96	98,04	0,000
9º	Europa-Oeste	97,71	97,71	97,73	97,75	97,78	97,81	97,75	0,000
10º	Europa-Leste	97,38	97,35	97,33	97,30	97,33	97,31	97,33	0,000
11º	Ásia-Sul	97,53	97,42	97,29	97,13	96,95	96,79	97,18	0,000
12º	Ásia-Leste	84,77	83,50	82,09	80,68	79,40	78,16	81,44	0,001
13º	América-Norte	68,75	68,72	68,50	68,47	68,81	69,16	68,73	0,000

Analisando os *inputs* que envolvem o desempenho ambiental dos países (Figura 14) ao longo do período, a variável pessoas empregadas tem sido o principal fator para a eficiência ambiental a contribuir com a minimização das emissões CO₂ (maximização do vetor de translação na DEA), com pesos bastante superiores aos das variáveis estoque de capital e patentes, exceto no último ano de 2010, sendo superado pela variável estoque de capital.

Figura 14 - Evolução da contribuição média das variáveis inputs para a eficiência ambiental dos países entre 2000 e 2010

Em relação à evolução da PTF (Anexo A Tabela 36), observa-se que em todos os subcontinentes as variáveis de entrada perderam capacidade de produzir menores emissões de CO₂ entre os anos de 2000 e 2010, com destaque para as regiões da Ásia-Leste e Ásia-Sul que apresentaram sucessivas reduções de PTF no período. O mesmo destaque é dado para os países não membros da OECD, que, em média, também acumularam sucessivas perdas de PTF. Observando a evolução da eficiência (Anexo A Tabela 37), esta acompanhou a dinâmica da PTF, também com todos os subcontinentes apresentando redução da eficiência da conversão de seus insumos estoque de capital, pessoas empregadas e patentes em menores níveis de emissão de CO₂ (redução da capacidade de maximização do vetor de translação).

Em suma, na média, todos os países em estudo perderam capacidade de redução das emissões de gás estufa a partir do consumo das variáveis de *input* (Figura 15), fato também observado em termos da eficiência de conversão destes. Como resultado da redução da PTF e da eficiência, podemos observar o aumento das emissões de CO₂ entre os anos de 2000 e 2010 (Figura 16).

Figura 15 - Produtividade total dos fatores (índice Malmquist) e eficiência (*catch-up*) acumulados (em média dos países) em 2010 para o modelo ambiental

Figura 16 - Emissões totais de CO₂ pelos 79 países em estudo entre os anos de 2000 e 2010
Fonte: World Bank

5.2.4 Resultados para o Modelo Desenvolvimento Sustentável

Por fim, considerando o modelo de desenvolvimento sustentável, optou-se pela utilização do índice composto³⁸ para o cálculo das eficiências desse modelo, dado o elevado número de empates mesmo com o método das janelas. Assim, observou-se que a Irlanda foi, ao longo do período, o país mais eficiente na conversão dos *inputs* (Tabela 19), seguido por Lituânia e Panamá. Dentre os 20 países mais eficientes, 17 são membros da OECD e 17 são europeus (16 membros OECD) denotando ser estas características determinantes ao bom desempenho. Destacam-se as duas maiores economias mundiais EUA e China nas penúltima e última posições respectivamente (Tabela 21), além dos maus desempenhos de países desenvolvidos como Japão e Coreia do Sul.

O baixo desempenho desses países pode estar atrelado ao fato de que, nos casos de EUA, China, Japão e Coreia do Sul, a variável de *output* Emissão de CO₂ teve peso superior a 90% (em média das janelas – em ambos tipos de fronteira), e dessa forma influenciando negativamente o desempenho sustentável pois esses países também apresentaram altas ineficiências no modelo ambiental.

Tabela 19 - *Ranking* dos resultados da análise de janela dos 20 países mais eficientes sob a ótica desenvolvimento sustentável

<i>Rank</i>	<i>País</i>	<i>Janela 1</i>	<i>Janela 2</i>	<i>Janela 3</i>	<i>Janela 4</i>	<i>Janela 5</i>	<i>Janela 6</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
1º	Irlanda	99,84	99,49	99,13	98,50	97,80	96,98	98,62	0,000
2º	Lituânia	97,62	97,60	97,43	97,09	96,25	95,27	96,88	0,000
3º	Panamá	97,17	96,46	96,08	95,65	95,16	94,66	95,86	0,000
4º	Holanda	96,11	95,62	95,14	94,59	93,90	93,13	94,75	0,000
5º	Bélgica	96,41	95,83	95,23	94,46	93,64	92,75	94,72	0,000
6º	Turquia	94,48	94,64	94,96	94,72	94,25	93,51	94,43	0,000
7º	Luxemburgo	96,26	95,58	94,89	94,10	93,23	92,33	94,40	0,000
8º	Suécia	94,67	94,78	94,79	94,51	94,04	93,47	94,38	0,000
9º	Grécia	95,40	94,94	94,41	93,73	92,86	91,94	93,88	0,000
10º	Suíça	94,91	94,47	94,05	93,49	92,85	92,13	93,65	0,000
11º	Portugal	94,78	94,12	93,46	92,66	91,86	91,05	92,99	0,000
12º	Letônia	93,98	93,94	93,81	93,08	91,31	89,48	92,60	0,000
13º	Dinamarca	93,92	93,53	93,09	92,46	91,74	90,83	92,59	0,000
14º	Áustria	94,10	93,54	92,97	92,30	91,60	90,84	92,56	0,000
15º	Espanha	94,59	93,86	93,17	92,17	91,18	90,08	92,51	0,000

(continua)

³⁸ Vide capítulo 3.2.7 Ferramentas de Desempate

Tabela 20 - *Ranking* dos resultados da análise de janela dos 20 países mais eficientes sob a ótica desenvolvimento sustentável

(conclusão)									
Rank	País	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
16°	Noruega	93,14	92,99	92,64	92,27	91,98	91,78	92,47	0,000
17°	Eslováquia	89,56	90,62	91,32	92,23	92,60	92,21	91,42	0,000
18°	Eslovênia	92,94	92,61	92,03	91,49	90,15	89,08	91,38	0,000
19°	Itália	93,08	92,39	91,72	90,80	89,87	88,77	91,10	0,000
20°	França	92,68	92,06	91,53	90,82	90,10	89,21	91,07	0,000

Tabela 21 - *Ranking* dos resultados da análise de janela dos 10 países menos eficientes sob a ótica desenvolvimento sustentável

Rank	País	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
70°	Rússia	56,14	57,15	58,64	60,32	58,54	56,94	57,95	0,000
71°	Vietnam	55,99	56,59	56,07	56,71	56,15	55,09	56,10	0,000
72°	Coreia do Sul	58,19	56,79	55,20	53,71	52,94	52,79	54,94	0,000
73°	Bangladesh	53,66	54,11	54,75	55,32	55,36	55,26	54,75	0,000
74°	Japão	54,42	54,71	53,95	54,10	54,99	56,00	54,69	0,000
75°	África do Sul	56,77	54,15	53,83	54,59	54,10	54,03	54,58	0,000
76°	Índia	53,97	53,74	53,62	53,71	53,82	53,37	53,71	0,000
77°	Madagáscar	53,67	53,34	53,33	53,19	53,71	53,76	53,50	0,000
78°	EUA	53,06	53,20	53,32	53,59	53,73	53,65	53,42	0,000
79°	China	52,93	52,78	52,71	52,74	52,60	52,44	52,70	0,000

Observando os agrupamentos dos países de acordo com suas sub-regiões (Tabela 22), entre 2000 e 2010, a Europa-Oeste apresentou o melhor desempenho sustentável, pouco acima da Europa-Sul. Nesses dois grupos, 12 dos 14 países são membros da OECD. Também destacam-se os baixos desempenhos das regiões América-Norte e Ásia-Leste, muito influenciado pelos maus desempenhos individuais de EUA e Coreia do Sul, Japão e China, respectivamente.

Tabela 22 - *Ranking* dos resultados da análise de janela para sub-regiões sob a ótica desenvolvimento sustentável

Rank	Sub-Região	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
1°	Europa-Oeste	94,075	93,510	92,928	92,245	91,534	90,754	92,508	0,000
2°	Europa-Sul	92,215	91,651	91,091	90,462	89,322	88,562	90,551	0,000
3°	Europa-Norte	86,405	86,343	86,634	87,051	86,194	84,900	86,254	0,000
4°	América-Sul	86,495	86,158	85,899	85,514	85,105	84,863	85,672	0,000
5°	Ásia-Oeste	84,645	84,701	84,904	84,752	83,814	83,424	84,373	0,000
6°	América-Central	85,023	83,902	84,070	83,447	82,758	81,833	83,505	0,000
7°	Europa-Leste	80,147	80,938	80,563	81,292	80,795	80,234	80,661	0,000

(continua)

Tabela 23 - *Ranking* dos resultados da análise de janela para sub-regiões sob a ótica desenvolvimento sustentável

(conclusão)									
Rank	Sub-Região	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5	Janela 6	Média	Variância
8º	Oceania	80,591	80,412	80,124	80,148	79,623	79,067	79,994	0,000
9º	Ásia-Sul	71,393	71,356	71,310	71,114	70,610	69,929	70,952	0,000
10º	África	71,893	70,965	70,621	70,637	70,492	70,201	70,802	0,000
11º	Ásia-Central	73,477	72,653	70,250	70,495	68,023	66,696	70,266	0,001
12º	América-Norte	69,935	69,872	69,765	69,705	69,498	69,202	69,663	0,000
13º	Ásia-Leste	62,472	61,958	61,274	60,862	60,790	60,942	61,383	0,000

Com relação às variáveis endógenas que envolvem a eficiência de desenvolvimento sustentável dos países (Figura 17) ao longo do período, as variáveis estoque de capital e patentes apresentaram os maiores níveis de contribuição aos pesos para o desempenho sustentável, sendo patentes a variável de maior contribuição nos anos de 2005 e 2006. Isso indica que a capacidade de investimento e a inovação tecnológica possuem importante peso no desenvolvimento sustentável dos países em estudo. Entretanto essa contribuição não está diretamente relacionada a quantidade de estoque de capital e patentes, mas sim a forma como são utilizadas pelos países, fato evidenciado pela presença dos três países com maior nível de estoque de capital e patentes – China, EUA e Japão – entre os países de pior desempenho.

Figura 17 - Evolução da contribuição média das variáveis inputs para a eficiência de desenvolvimento sustentável dos países entre 2000 e 2010

Tomando-se a evolução da produtividade total dos fatores (Anexo A Tabela 39), observa-se que na maioria dos subcontinentes as variáveis de *input* estoque de capital, pessoas empregadas e patentes apresentaram perda de produtividade, ainda que pequeno, no período em estudo. O melhor desempenho pode ser observado pela Oceania, que apresentou queda na PTF apenas no ano de 2008. Diferentemente da PTF, os países em estudo não apresentaram ganhos ou perdas significativas de eficiência sustentável no período observado, mantendo-se praticamente estável, conforme mostra a Tabela 40 do Anexo A.

De forma geral, os países oscilaram entre ganhos e perdas de PTF sustentável ao longo do período em análise (Figura 18), acumulando ao final de 2010, perda de aproximadamente 3%, e contrapondo-se a evolução praticamente constante da eficiência no período.

Figura 18 - Produtividade total dos fatores (índice Malmquist) e eficiência (*catch-up*) acumulados (em média dos países) em 2010 para o modelo desenvolvimento sustentável

5.2.5 Discussão dos Resultados DEA

Para ajudar a fundamentar a análise e comparação dos países são apresentados a seguir os cinco países com a média (do período entre 2000 e 2010) dos melhores indicadores de cada variável de entrada e saída utilizados no estudo. Assim, a Figura 19 apresenta os indicadores das variáveis de *output* e a Figura 20 os indicadores das variáveis de *input*.

Figura 19 - Melhores indicadores (em média) das variáveis de *output*

Figura 20 - Melhores indicadores (em média) das variáveis de *input*

Partindo da aplicação econômica, os três primeiros países do ranking de maior eficiência (Tabela 12), EUA, Irlanda e Índia, nessa ordem, diferem bastante entre si em sua conjectura. O país mais eficiente economicamente (EUA) possui a maior economia dentre os três, com um PIB real médio no período de aproximadamente US\$ 12,3 trilhões de dólares, sendo também o país com as maiores variáveis de *input* Estoque de Capital e Patentes, perdendo apenas para a Índia na variável Pessoas Empregadas, fato relacionado à diferença populacional entre os dois países. Mesmo possuindo recursos abundantes, produto já elevado e apresentando redução da produtividade total de fatores no período (Figura 21), os EUA ainda assim conseguem ser mais eficiente do que os demais países em estudo. Com configurações diferentes, a Irlanda apresenta indicadores bem mais modestos do que EUA e Índia, alcançando em 2010 apenas o 46º PIB entre os 79 países, e variáveis de input muito menores do que os outros dois países. Entretanto, mesmo nessas condições, também com queda da PTF no período, e, diferentemente de EUA e Índia, apresentou retornos decrescentes de escala nos anos 2001, 2005, 2008 e 2010. Com menos recursos, a Irlanda conseguiu ser muito eficiente economicamente em converter seus *inputs* e

produzir seu PIB. Dessa forma, pode-se esperar que EUA e Índia sejam capazes de atingir PIB ainda maiores do que os atuais, mesmo sendo os países mais eficientes.

Figura 21 - Produtividade Total dos Fatores Econômicos (Índice Malmquist) acumulado dos EUA, Índia e Irlanda entre os anos de 2000 e 2010

Analisando o modelo social, os três países mais eficientes (Tabela 14) possuem características bem próximas: são países europeus com pequena extensão territorial e população e, bom nível de renda per capita³⁹, classificados como de alto desenvolvimento humano pelo IDH de 2014⁴⁰. Além disso, possuem elevada expectativa de vida, acima dos 79 anos (Islândia 81,9; Luxemburgo 80,6; Chipre 79,3; em 2010). Esses países representam modelos de excelência na conversão de seus modestos *inputs* em elevada expectativa de vida (Figura 22). Detendo um número maior de patentes, a Islândia consegue converter com maior eficiência esse *input*, que possui maior peso médio sob a ótica social (Figura 12), se comparado a Luxemburgo e Chipre, que possuem mais quantidades de Estoque de Capital e Pessoas Empregadas, *inputs* de menor peso nessa aplicação.

³⁹ Luxemburgo: US\$ 82.960 per capita, Islândia: US\$ 59.395 per capita, Chipre US\$ 21.852 per capita. Em dólares constantes de 2005. Dados de 2014 do World Bank.

⁴⁰ Disponível em: <http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2015_statistical_annex.pdf>. Acesso em: 18 fev 2016.

Figura 22 - Indicadores (em média) das variáveis de *input* dos países mais eficientes socialmente

Islândia, Luxemburgo e Chipre acompanharam a tendência dos demais países (Figura 13) e também apresentaram ganho de PTF (Figura 23), considerando o período todo em estudo. Observou-se, ainda, que a Islândia obteve em 2007 e o Chipre em 2003 e 2007 retornos decrescentes de escala, isto é, redução na produtividade frente ao acréscimo de uma unidade adicional de *input*.

Figura 23 - Produtividade Total dos Fatores Sociais (Índice Malmquist) acumulado da Islândia, Luxemburgo e Chipre entre os anos de 2000 e 2010

Observando a aplicação ambiental (Tabela 16), os três países mais eficientes em reduzir emissões de CO₂, foram Islândia, Madagáscar e Armênia, nessa ordem. Esses países apresentam características bastante diferentes: a) a Islândia país europeu de altíssimo desenvolvimento humano (IDH 16º) e alta renda per capita⁴¹, b) Madagáscar país do sul da África de baixo desenvolvimento humano (IDH 154º) e baixíssima renda e, por fim, c) Armênia país do oeste asiático de alto desenvolvimento humano (IDH 85º) e baixa renda per capita.

Esses países, que representam modelos de excelência na conversão de seus modestos *inputs* em baixa emissão de CO₂ (Figura 24), podem ter a eficiência explicada justamente pelo baixo nível de atividade industrial.

É válido observar na Figura 25, por exemplo em 2010 o valor adicionado da indústria dos EUA, país mais ineficiente, representou quase 775 vezes o valor adicionado da indústria da Islândia.

Sobre Madagáscar e Armênia, merece destaque o fato de boa parte da população viver fora das áreas urbanas⁴². Em Madagáscar, apenas 34,5% da população vivem em áreas urbanas e na Armênia 62,8%, o que contribui para os baixos níveis de emissão de CO₂. A Islândia ainda se

⁴¹ Islândia: US\$ 59.395 per capita, Madagáscar: US\$ 272 per capita, Armênia US\$ 2.362 per capita. Em dólares constantes de 2005. Dados de 2014 do World Bank.

⁴² Dados de 2014 do World Bank.

destaca no quesito energia, cerca 85% de sua geração de energia primária⁴³ vem de fontes geotérmicas (65%) e hidroelétricas (20%).

Figura 24 - Indicadores (em média) das variáveis de *input* dos países mais eficientes ambientalmente

⁴³ Disponível em: <<http://askjaenergy.com/iceland-introduction/iceland-energy-sector/>>. Acesso em: 31 mar 2016.

Figura 25 - Valor adicionado da indústria da Armênia, Islândia e Madagáscar entre os anos de 2000 e 2010
Fonte: World Bank

Segundo York, Rosa e Dietz (2015), EUA, China e Japão, países de mais baixo desempenho ambiental, apresentaram pioras significativas em suas pegadas ecológicas, muito em função de seu consumo per capita excessivo e, também, de suas escolhas energéticas. Pode-se destacar a China passado os EUA como maior emissor de CO₂ do mundo, devido ao grande e crescente número de usinas movidas a carvão mineral.

Por fim, analisando a ótica do desenvolvimento sustentável (Tabela 19), Irlanda, Lituânia e Panamá também representam modelos de excelência na conversão de seus modestos *inputs* na maximização do PIB e da expectativa de vida e na redução da emissão de CO₂. Isso demonstra que países, como EUA, China, Japão e Alemanha, com níveis de *inputs* superiores têm potencial para se tornarem mais eficientes do que já são.

Figura 26 - Indicadores (em média) das variáveis de *input* dos países mais eficientes no desenvolvimento sustentável

O excelente desempenho sustentável da Irlanda pode ser explicado por características sociais do país e por medidas e programas do governo que visam atingir metas de sustentabilidade. Segundo OECD (2014a), o país possui ótimos níveis educacionais, com a totalidade de crianças entre 5 e 14 anos matriculadas em escolas; com a expectativa de que 93% delas concluam o ensino secundário e que 43% se formem em cursos superiores. Merece destaque o fato de essas taxas superiores à média dos países da OECD, além de a Irlanda ser um dos países que mais investe em educação por aluno entre os membros do bloco.

As medidas para sustentabilidade do governo irlandês transformaram diversas áreas da economia. Conforme Our Sustainable Future (2016), no campo dos dejetos e resíduos, a Irlanda tem ido de encontro às metas estabelecidas pela União Europeia. Tendo iniciado o investimento no tratamento de lixo como commodity, para reuso e reciclagem, geração de energia e aplicação de maiores taxas aos aterros convencionais, que aumentaram também a geração de empregos. Na área das emissões, o governo instituiu a taxa de carbono sobre combustíveis para transportes, a partir

de 2010, estendendo em 2012 a taxa para o diesel de máquinas agrícolas e em 2014 para combustíveis sólidos e outros combustíveis fósseis. Em 2015, o governo passou a incentivar a produção e uso de biocombustíveis.

Na área ambiental, o governo irlandês lançou o *Forest Research Programme*, um grande projeto de conservação, manutenção e restauro da biodiversidade e dos ecossistemas, que inclui programas de prevenção ao desmatamento, guias de boas práticas florestais (essencial passa a obtenção de ajuda de custeio e licenças de exploração), aumento de áreas protegidas e de espécies protegidas, entre outros. Ainda nessa área, foi estabelecido em 2006 o primeiro sistema estatístico de controle e monitoramento florestal, o *National Forest Inventory*.

No campo agrícola, o governo irlandês instituiu o *Rural Development Programme 2014-2020*, com o objetivo de aumentar a mitigação de carbono (semelhante ao plano ABC⁴⁴ brasileiro), aumentar a competitividade do setor agrícola-alimentício, maior controle sustentável do uso dos recursos e garantir um desenvolvimento balanceado das áreas rurais.

Em suma, de forma separada, a Islândia foi o país mais eficiente em duas esferas do tripé sustentável (Social e Ambiental), no período em estudo. Mas ao considerar-se a combinação dos três modelos, a Irlanda foi o país que melhor converteu capital (Estoque de Capital), trabalho (Pessoas Empregadas) e tecnologia (Patentes) em desenvolvimento sustentável. Dado os resultados obtidos, observa-se a necessidade de reais esforços no sentido de aumentar a eficiência sobre todas as aplicações (econômica, social e ambiental) para as grandes economias mundiais, como EUA, China, Japão, Reino Unido e Alemanha, países que apresentaram eficiências muito abaixo do potencial que possuem.

Sobre o desempenho de EUA, China e Japão, Santana et al. (2015) observou que estes países possuem baixa eficiência em converter investimentos em P&D em desenvolvimento sustentável, mesmo sendo países alta capacidade inovativa e alto nível de investimento em tecnologia. Para os autores, no caso dos EUA e China, esse desempenho insatisfatório deveu-se principalmente pelos seus ruins indicadores ambientais, os EUA, por exemplo, é o maior emissor de CO₂ dentre os países analisados.

⁴⁴ O Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono tem o objetivo de organizar e financiar ações a serem realizadas para adoção das tecnologias sustentáveis de produção selecionadas para responder aos compromissos assumidos pelo país de redução de emissão de GEE no setor agropecuário (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2012). Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/download.pdf>.

5.3 Resultados DEA em Dois Estágios

Com o intuito de analisar a contribuição (elasticidade) da inovação tecnológica nos pilares do desenvolvimento sustentável, foi rodado um novo modelo DEA e os escores de eficiência resultantes foram submetidos a uma análise de regressão, conforme explicitado no tópico “4.2.3 Aplicação dos modelos em dois estágios”.

Os testes preliminares demonstraram a presença de autocorrelação em todos os modelos em estudo (Tabela 24), dessa forma foram considerados, para as análises, os resultados das regressões obtidos pelo método de MQGF, que é robusto a este tipo de problema.

Tabela 24 - Teste de autocorrelação em dados em painel do segundo estágio

	Teste de Wooldridge	Teste de Pesaran	
		Efeitos Fixos	Efeitos Aleatórios
Modelo Econômico	1.268,12 (0,000)	68,24 (0,000)	67,66 (0,000)
Modelo Social	380,18 (0,000)	106,09 (0,000)	106,68 (0,000)
Modelo Ambiental	244,38 (0,000)	4,27 (0,000)	4,22 (0,000)
Modelo Desenvolvimento Sustentável	38,66 (0,000)	12,36 (0,000)	12,22 (0,000)

Observando os resultados da aplicação econômica (Tabela 25), a variável Patentes apresentou ótima significância estatística, e correspondeu ao sinal positivo esperado, ou seja, um aumento de 1% no número de patentes acarreta um aumento de 0,0135% na eficiência dos países converterem os *inputs* de capital e de trabalho em PIB. Dessa forma, como o modelo apresenta bom ajuste (estatística *F* significativa), pode-se observar um impacto positivo das inovações tecnológicas na eficiência econômica.

Tabela 25 - Resultados da regressão para o modelo econômico do segundo estágio

Variável dependente: Eficiência Econômica	Período: 2000 - 2010			
	MQO	Efeitos Fixos	Efeitos Aleatórios	MQGF
Intercepto	4,0360 ^A (0,000)	4,1582 ^A (0,000)	4,1135 ^A (0,000)	4,0927 ^A (0,000)
Patentes	0,0280 ^A (0,000)	0,0116 ^E (0,645)	0,0176 ^E (0,327)	0,0135 ^A (0,001)
R ²	0,0437	0,0437	0,0437	-
Wald Chi ² (gl) ou F(gl)	45,17 (0,000)	0,21 (0,644)	0,96 (0,3271)	10,57 (0,001)
Teste F	43,29 (0,000)			
Teste Breusch e Pagan LM	2.718,28 (0,000)			
Teste de Hausman	1,00 (0,3180)			

Obs: Nível de significância: (A) 0,001; (B) 0,01; (C) 0,05; (D) 0,1; (E) não significante.

O impacto positivo das inovações tecnológicas na eficiência econômica também pode ser observado na análise comparativa entre a PTF (Figura 27) dos países em estudo incluindo e excluindo a variável Patentes. Quando se inclui Patentes, em média, os países acumulam maiores ganhos de PTF do que acumulam sem a presença da variável. No período em estudo, com a variável de *proxy* de tecnologia os países acumularam 13,8% de ganho de PTF, enquanto que sem a variável os países acumularam 9,9% de ganho de PTF.

Figura 27 - Produtividade Total dos Fatores Econômicos (Índice Malmquist) acumulado (em média dos países) entre os anos de 2000 e 2010

Analisando os resultados do modelo social (Tabela 26), assim como na aplicação econômica, a variável Patentes apresentou ótima significância estatística e também correspondeu ao sinal positivo esperado, ou seja, um aumento de 1% no número de patentes proporciona um aumento de 0,0028% na eficiência dos países em converter seus *inputs* de capital e de trabalho em expectativa de vida. Nesse caso, com o modelo também apresentando bom ajuste (estatística *F* significativa), pode-se observar um impacto positivo das inovações tecnológicas na eficiência social.

Tabela 26 - Resultados da regressão para o modelo social do segundo estágio

Variável dependente: Eficiência Social		Período: 2000 - 2010		
	MQO	Efeitos Fixos	Efeitos Aleatórios	MQGF
Intercepto	4,4637 ^A (0,000)	4,5120 ^A (0,000)	4,5085 ^A (0,000)	4,4858 ^A (0,000)
Patentes	0,0054 ^A (0,000)	-0,0010 ^E (0,520)	-0,0005 ^E (0,724)	0,0028 ^A (0,000)
R ²	0,0207	0,0207	0,0207	-
Wald Chi ² (gl) ou F(gl)	17,02 (0,000)	0,42 (0,520)	0,12 (0,723)	13,45 (0,000)
Teste F	319,65 (0,000)			
Teste Breusch e Pagan LM	4.045,66 (0,000)			
Teste de Hausman	2,34 (0,126)			

Obs: Nível de significância: (A) 0,001; (B) 0,01; (C) 0,05; (D) 0,1; (E) não significante.

Observando a PTF para o modelo social (Figura 28), com a variável de tecnologia e sem a variável, apesar de, na maior parte do período os países terem conseguido acumular maiores ganhos de PTF no modelo com a variável Patentes, no final do período os dois modelos proporcionaram aos países praticamente os mesmos ganhos de PTF (com tecnologia ganho, em média, de 0,0273% e, sem tecnologia, 0,027%).

Figura 28 - Produtividade Total dos Fatores Sociais (Índice Malmquist) acumulado (em média dos países) entre os anos de 2000 e 2010

Os resultados da aplicação ambiental (Tabela 27) demonstraram bom nível de ajuste (estatística F significativa) e a variável patentes apresentou sinal negativo, contrário ao sinal positivo esperado. Dessa forma pode-se inferir que o aumento de 1% no número de patentes reduz em 0,0042% a eficiência dos países em minimizar a emissão de CO_2 .

O coeficiente negativo apresentado, considerado conjuntamente ao sinal positivo da variável patentes da regressão de validação (Tabela 9), indicam que o aumento de 1% no número de patentes proporciona aumento de 0,0667% na emissão de CO_2 . Além disso, o fato de as emissões de CO_2 , para esse conjunto de países, crescerem entre os anos de 2000 e 2010 (Figura 16), permite inferir que as inovações tecnológicas têm sido insuficientes para reduzir a emissão de poluentes ou que as novas tecnologias não têm considerado a sustentabilidade em seu desenvolvimento.

Tabela 27 - Resultados da regressão para o modelo ambiental do segundo estágio

Variável dependente: Eficiência Ambiental		Período: 2000 - 2010		
	MQO	Efeitos Fixos	Efeitos Aleatórios	MQGF
Intercepto	4,8230 ^A (0,000)	4,7214 ^A (0,000)	4,7500 ^A (0,000)	4,6215 ^A (0,000)
Patentes	-0,0345 ^A (0,000)	-0,0209 ^E (0,269)	-0,0248 ^E (0,140)	-0,0042 ^A (0,000)
R ²	0,2430	0,2430	0,2430	-
Wald Chi ² (gl) ou F(gl)	51,49 (0,000)	1,24 (0,269)	2,18 (0,140)	51,52 (0,000)
Teste F	63,41 (0,000)			
Teste Breusch e Pagan LM	3.113,22 (0,000)			
Teste de Hausman	3,40 (0,065)			

Obs: Nível de significância: (A) 0,001; (B) 0,01; (C) 0,05; (D) 0,1; (E) não significante.

Por fim, observando os resultados do modelo de desenvolvimento sustentável (Tabela 28), a variável Patentes apresentou ótima significância estatística, porém apresentou sinal negativo, diferentemente do esperado, ou seja, um aumento de 1% no número de patentes proporciona redução de 0,0041% na eficiência dos países converterem os *inputs* (capital e trabalho) em PIB, expectativa de vida e menor emissão de CO₂ (maximização do vetor de translação da variável). Dessa forma, com o modelo apresentando bom ajuste (estatística *F* significativa), é possível observar um impacto negativo das inovações tecnológicas na eficiência sustentável.

Tabela 28 - Resultados da regressão para o modelo de desenvolvimento sustentável do segundo estágio

Variável dependente: Eficiência Desenvolvimento Sustentável		Período: 2000 - 2010		
	MQO	Efeitos Fixos	Efeitos Aleatórios	MQGF
Intercepto	4,4541 ^A (0,000)	4,3866 ^A (0,000)	4,3913 ^A (0,000)	4,4072 ^A (0,000)
Patentes	-0,0099 ^C (0,012)	-0,0009 ^E (0,891)	-0,0015 ^E (0,800)	-0,0041 ^A (0,000)
R ²	0,0093	0,0093	0,0093	-
Wald Chi ² (gl) ou F(gl)	6,32 (0,012)	0,02 (0,891)	0,06 (0,799)	44,50 (0,000)
Teste F	330,19 (0,000)			
Teste Breusch e Pagan LM	4.062,60 (0,000)			
Teste de Hausman	0,60 (0,440)			

Obs: Nível de significância: (A) 0,001; (B) 0,01; (C) 0,05; (D) 0,1; (E) não significante.

No período em estudo, os países perderam produtividade dos fatores com relação ao modelo de desenvolvimento sustentável (Figura 29), tanto considerando o modelo com inovação tecnológica quanto sem inovação. Entretanto, no primeiro caso a perda de PTF demonstrou-se menor, acumulando no final do período -0,003% da PTF inicial, enquanto no segundo caso acumulou -0,006% da PTF inicial.

Figura 29 - Produtividade Total dos Fatores de Desenvolvimento Sustentável (Índice Malmquist) acumulado (em média dos países) entre os anos de 2000 e 2010

As perdas de eficiência e de PTF demonstradas no modelo de desenvolvimento sustentável, podem também ser causadas pelo surgimento de novas tecnologias que não foram desenvolvidas em consonância com o conceito da sustentabilidade, principalmente com a preservação do meio ambiente.

Por considerar também a esfera social, outro motivo para o impacto negativo das inovações pode ser dado pelo difícil acesso, pela maioria da população mundial, aos novos meios tecnológicos, sejam eles:

- Na área de saúde, os novos equipamentos para tratamento e prevenção de doenças, novos tipos de medicamentos, ou novas tecnologias de saneamento e higiene;
- Na área de educação, os acessos aos novos conhecimentos e técnicas, à rede de informação e comunicação e às novas tecnologias de apoio ao ensino;
- Na área produtiva, os acessos aos novos tipos de fertilizantes e defensivos (destacando novamente a necessidade de observação dos impactos ambientais), aos novos equipamentos e técnicas de plantio e produção vegetal e animal, aos novos sistemas de produção fabris (aderentes às novas boas práticas *lean*, enxutas e limpas) e às fontes de energia mais limpas, entre outras áreas.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo verificar a contribuição da inovação tecnológica para a eficiência de países em termos de desenvolvimento sustentável, ou seja, nos aspectos econômicos, sociais e ambientais, de modo a identificar os fatores que determinam a maior capacidade de um país converter inovação em desenvolvimento, quando comparado com outros. Também, teve como propósito observar a relação direta (elasticidade) entre a variável número de Patentes (*proxy* de inovação) e o aumento ou diminuição da eficiência.

Foram realizadas análises em duas abordagens: uma por meio da DEA, considerando como variáveis de *output* o PIB, a expectativa de vida e a emissão de CO₂, como variáveis de *input* o estoque de capital, o número de pessoas empregadas e o número de patentes (*proxy* para inovação tecnológica). A outra abordagem foi realizada contando com um primeiro estágio utilizando a DEA, considerando como variáveis de *output* o PIB, a expectativa de vida e emissão de CO₂ e como variáveis de *input* o estoque de capital, o número de pessoas empregadas e com um segundo estágio, regredindo em painel a eficiência dos países (variável dependente) e o número de patentes (variável explicativa).

Os resultados do modelo econômico demonstraram que os países do norte europeu e os países da América do Norte são, em média, mais eficientes que os demais países, sendo EUA e Irlanda os dois mais eficientes. Nesse modelo, a análise da composição da curva de eficiência revelou que as patentes não possuem um grande peso em sua formação.

Os resultados da DEA em dois estágios explicitaram que as patentes possuem um impacto positivo na eficiência, isto é, um aumento das inovações tecnológicas pode aumentar a eficiência dos países em maximizar o PIB, utilizando capital e trabalho. A inovação tecnológica também mostrou ser capaz de acumular maiores ganhos de PTF, quando os resultados são comparados à simulação, considerando-se apenas capital e trabalho como fatores de produção.

A análise do modelo social explicitou que os países europeus são, em média, mais eficientes que os países dos demais continentes, sendo Islândia e Luxemburgo os dois países mais eficientes. Na aplicação social, o número de patentes é a variável de *input* de maior peso na formação da curva de eficiência, indicando a importância da inovação tecnológica para a eficiência social dos países em estudo.

A relevância da inovação tecnológica para a eficiência também ficou evidente com os resultados da DEA em dois estágios. O coeficiente positivo e estatisticamente significativo demonstra a relação direta entre a inovação e a eficiência dos países em transformar capital e trabalho em expectativa de vida das pessoas.

Quanto à produtividade, as simulações com inovação tecnológica, e na ausência desta, resultaram em uma diferença muito pequena entre os ganhos de PTF acumulados no período em estudo.

Com os resultados do modelo ambiental, foi possível observar que os países de relativamente baixos níveis de atividade industrial como Islândia, Madagascar, Armênia, Quirguistão, Albânia e Chipre são, em média, mais eficientes do que os demais em minimizar as emissões de CO₂ a partir dos *inputs* capital, trabalho e tecnologia. Nesse caso, a variável patentes apresentou o menor peso dentre as três variáveis de *input*, denotando baixa importância na formação da curva de eficiência do modelo.

Para essa aplicação, o resultado da DEA em dois estágios demonstrou que há um impacto negativo da inovação tecnológica na eficiência ambiental, ou seja, com o aumento das patentes as emissões de CO₂ também sofrem aumento.

Por fim, considerando o modelo de desenvolvimento sustentável, os resultados demonstraram que os países europeus também são, em média, mais eficientes do que os demais. Nesta aplicação, a variável patentes possui o segundo maior peso na formação da curva de eficiência, demonstrando a importância dessa variável para a eficiência sustentável, quando considerada como endógena ao modelo.

Embora, ao longo do período tenham perdido PTF, os países demonstraram maior capacidade de acumulação de produtividade quando a inovação tecnológica está inserida no modelo simulado.

Os resultados da DEA em dois estágios mostraram que há um impacto negativo da inovação tecnológica sobre a eficiência de desenvolvimento sustentável, isto é, o aumento da inovação diminuiu a eficiência dos países em converter capital e trabalho em PIB, expectativa de vida e menores emissões de CO₂ (maximização do vetor de translação da variável indesejável). Esse resultado reforça a ideia abordada por Hansmann, Mieg e Frischknecht (2012) e Kaivo-Oja et al. (2014) sobre os conflitos que ocorrem na tentativa de equilibrar as esferas do bem-estar humano e o bem-estar ambiental. Na mesma linha, Geraldles (2012) cita que as dimensões econômica e social cooperam entre si de forma quase complementar, uma vez que o crescimento econômico é capaz

de fornecer as bases para a solução de diversas injustiças sociais (como a pobreza, desemprego e a má nutrição), assim como o aumento da justiça social pode levar ao crescimento econômico. Por outro lado, ainda segundo Geraldles (2012), a dimensão ambiental tende a concorrer com as demais, sendo a forma de uso da terra, uso dos recursos e a produção e descarte de resíduos as principais fontes de tensões entre as três dimensões.

Essa relação negativa também pode estar ligada a reflexão trazida por Vollenbroek (2002) de que em muitas vezes as inovações mais do que preencherem nossas necessidades, elas acabam criando novas necessidades, impactando negativamente na sustentabilidade. Demonstrando, desse modo, uma incompatibilidade de se equilibrar igualmente as três esferas. Assim, devem ser elaboradas políticas distintas e próprias para cada pilar do tripé, que busquem ser minimamente conflitantes.

Em outra perspectiva, embora existam entendimentos e acordos internacionais de redução da emissão de poluentes, como o tratado de Kyoto (1997) e a COP21 (2015), as emissões globais de gases estufa vêm aumentando nos últimos anos⁴⁵. Nesse ponto, Porter e van der Linde (1995) e Blind (2012) sugerem que restrições muito mais severas e rigorosas às emissões de poluentes podem aumentar a eficiência ambiental e, conseqüentemente, aumentar a eficiência sustentável dos países. Segundo os autores, a emissão de poluentes esconde ineficiências produtivas que resultam em subutilização e desperdício de *inputs*, processos de controle precários, defeitos e descartes desnecessários. Assim, políticas que beneficiem as inovações tecnológicas orientadas por restrições ambientais severas tendem a ser mais ambientalmente amigáveis (“*eco friendly*”) e podem tornar mais eficientes o consumo de *inputs*, inclusive reduzindo-os, melhores produtos e maiores produtividades.

Também demonstrando que nem sempre há um total alinhamento entre inovação e desenvolvimento sustentável, Vergragt (2006) explica que, nas economias de mercado, a defesa de interesses domina a comunidade científica, abordando o exemplo da internet, desenvolvida inicialmente para fins militares. Assim, as inovações nem sempre são capazes de resolver sozinhas a maioria dos problemas da sociedade, como a biotecnologia erradicando totalmente a fome ou doenças, por meio de novos medicamentos.

⁴⁵ Vide **Anexo B Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Em suma, a análise do tripé da sustentabilidade de forma independente permite inferir que a inovação tecnológica é benéfica ao desenvolvimento sustentável, uma vez que as esferas econômica e social (dois dos três pilares) são impactadas de forma positiva em contrapartida ao impacto negativo da esfera ambiental. Por sua vez, a análise integrada demonstra o impacto negativo da inovação na eficiência do desenvolvimento sustentável, denotando a necessidade de aumentar o acesso às novas tecnologias, um dos maiores gargalos e, também, o desenvolvimento de novas tecnologias que realmente tenham a característica verdadeiramente ambiental em seu âmbito.

De forma geral, os resultados demonstraram que, principalmente para as grandes economias como EUA, China Japão e Reino Unido, ainda há um grande potencial a ser explorado em termos de eficiência dentro dos quatro modelos. Mesmo que sejam eficientes, como os EUA no modelo econômico, esses países ainda podem apresentar um desempenho muito melhor do que apresentaram. Isso evidencia a necessidade de políticas públicas e mudanças culturais voltadas para a sustentabilidade, com melhor uso dos recursos e produção mais limpa, com menos resíduos e reutilização de descartes.

Os modelos propostos neste estudo são simplificações do cenário real da determinação do desenvolvimento sustentável dos países e de seus componentes econômicos, sociais e ambientais. Outros fatores e indicadores como nível de educação, atividade industrial, nível de liberdade, acesso a saúde, entre outros, podem influenciar a eficiência dos países. Dessa forma, este não é um estudo de conclusão definitiva sobre a eficiência dos países dentro do desenvolvimento sustentável. Ainda assim, o estudo se fez importante por analisar os efeitos de um de seus componentes (inovações tecnológicas) e quantificar sua relevância, embasando conjuntamente a outros trabalhos da literatura o processo de tomada de decisão de entidades ligadas ao tema.

Dentre as principais limitações e dificuldades na realização do presente trabalho, encontraram-se a dificuldade em se encontrar uma base de dados com maior horizonte temporal sem dados faltantes (*gaps*) e com mais países, além da limitação do *software* utilizado com relação aos modelos DEA mais recentes.

Como proposta de futuros estudos, além da utilização de outras variáveis, de modelos mais recentes (como o DEA *network* e DEA dinâmico) e expansão do banco de dados, sugere-se a clusterização dos países e, por meio da DEA em dois estágios, comparação dos coeficientes (elasticidades) de impacto da inovação tecnológica na eficiência entre os diferentes grupos de países.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOVAY, R. **Muito além da economia verde**. São Paulo: Editora Abril: Planeta Sustentável, 2012.

ACEMOGLU, D. **Introduction to Modern Economic Growth**. Princeton: Princeton University Press, 2009.

AGHION, P.; HOWITT, P. W. **The economics of growth**. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2009.

AGUADO, R.; MARTINEZ, J. GDP and beyond: towards new measures of sustainability based on Catholic social thought. **Asia-Pacific Journal of Business Administration**, v. 4, n. 2, p. 124–138, 21 set. 2012.

ANGULO-MEZA, L; LINS, M. P. E. Review of methods for increasing discrimination in data envelopment analysis. **Annals of Operations Research**, v. 116, n. 1-4, p. 225-242, 2002.

BAMPATSOU, C.; HADJICONSTANTINO, G. The use of the DEA method for simultaneous analysis of the interrelationships among economic growth, environmental pollution and energy consumption. **International Journal of Economic Sciences and Applied Research**, v. 2, n. 1, p. 65-86, 2009.

BARBIERI, J. C. et al. Inovação e sustentabilidade: novos modelos e proposições. **Revista de Administração de Empresas**, v. 50, n. 2, p. 146–154, jun. 2010.

BARRO, R. J.; SALA-I-MARTIN, X. **Economic Growth**. 2 ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2004.

BELL, S.; MORSE, S. **Measuring sustainability: learning by doing**. London; Sterling, VA: Earthscan Publications, 2003

BERLEMANN, M.; WESSELHÖFT, J. E. **Estimating aggregate capital stocks using the perpetual inventory method: New empirical evidence for 103 countries**. Diskussionspapier, Helmut-Schmidt-Universität, Fächergruppe Volkswirtschaftslehre, 2012.

BLEWITT, J. **Understanding sustainable development**. Reprinted ed. London: Earthscan, 2015.

BLIND, K. The influence of regulations on innovation: A quantitative assessment for OECD countries. **Research Policy**, v. 41, n. 2, p. 391-400, 2012.

BRESSER-PEREIRA, L. C. O Conceito Histórico de Desenvolvimento Econômico. **Textos para Discussão (EESP-FGV)**, n. 157, dez. 2006.

BRINKMAN, R. Economic Growth versus Economic Development: Toward a Conceptual Clarification. **Journal of Economic Issues**, v. 29, n. 4, p. 1171-1188, dez. 1995.

CAMERON, A. C.; TRIVEDI, P. K. **Microeconometrics using Stata**. College Station, Tex: Stata Press, 2010.

CASAGRANDE JR, E. F. Inovação tecnológica e sustentabilidade: possíveis ferramentas para uma necessária interface. **Revista Educação & Tecnologia**, n. 8, 2004.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; LEWIN, A. Y.; SEIFORD, L. M. **Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994.

CHEN, C. M.; VAN DALEN, J. Measuring dynamic efficiency: Theories and an integrated methodology. **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 3, p. 749–760, jun. 2010.

CHIEN, T.; HU, J. L. Renewable energy and macroeconomic efficiency of OECD and non-OECD economies. **Energy Policy**, v. 35, n. 7, p. 3606–3615, 2007.

CHOI, Y.; ZHANG, N.; ZHOU, P. Efficiency and abatement costs of energy-related CO₂ emissions in China: A slacks-based efficiency measure. **Applied Energy**, v. 98, p. 198–208, out. 2012.

COELLI, T.J.; RAO D. S. P.; O'DONNELL C. J.; BATTESE G. E. **An introduction to Efficiency and Productivity Analysis**. 2 ed. Nova Iorque: Springer, 2005.

CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (ED.). **Agenda 21: Programme of action for sustainable development ; Rio declaration on environment and development ; statement of forest principles ; the final text of agreements negotiated by governments at the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), 3 - 14 June 1992, Rio de Janeiro, Brazil**. reprint ed. Geneva: Department of Public Information, United Nations, 1999.

CONSTANTINESCU, A.; FRONE, S. The role of technological innovation in sustainable economic development. **Journal of Knowledge Management, Economics and Information Technology**, v. 4, n. 1.1, 2014.

COOK, W. D.; SEIFORD, L. M. Data envelopment analysis (DEA) – Thirty years on. **European Journal of Operational Research**, v. 192, n. 1, p. 1–17, jan. 2009.

COOPER, W.; SIEFORD, L. TONE, K. **Date Envelopment Analysis - A Comprehensive Text with Models, Applications, Reference and DEA-Solver software**. Kluwer Academic Publishers. Norwell, 2000.

COOPER, W.; SIEFORD, L.; ZHU, J. Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. In: COOPER, W.; SIEFORD, L.; ZHU, J. (Org.). **Handbook on Data Envelopment Analysis**. 2 ed. Springer, 2010.

COOK, W. D.; TONE, K.; ZHU, J. Data envelopment analysis: Prior to choosing a model. **Omega**, v. 44, p. 1–4, abr. 2014.

DESAFIOS DO DESENVOLVIMENTO. História – Rio-92. Brasília: IPEA, ano 7, n. 56, p. 82, nov./dez. 2009. ISSN 1806-9363.

DESPOTIS, D. K. Measuring human development via data envelopment analysis: the case of Asia and the Pacific. **Omega**, v. 33, n. 5, p. 385–390, out. 2005.

FERREIRA, C. M. C.; GOMES, A. P. **Introdução à Análise Envoltória de Dados** – Teoria, Modelos e Aplicações. 22 ed. Viçosa, Editora UFV, 2009.

FREES, E. W. **Longitudinal and Panel Data: Analysis and Applications in the Social Sciences**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

FURMAM, J. L.; PORTER, M. E.; STERN, S. The Determinants of National Innovative Capacity. **Research Policy**, n. 31, p. 899-933, 2002.

GERALDES, A. G. A. **Sustainable development and development banks in the Brazilian Amazon**. Sydney, AUS, 2012. Thesis (Ph.D.) – Faculty of Law, The University of New South Wales.

GIDDINGS, B.; HOPWOOD, B.; O'BRIEN, G. Environment, economy and society: fitting them together into sustainable development. **Sustainable Development**, v. 10, n. 4, p. 187–196, nov. 2002.

GOLANY, B.; THORE, S. The economic and social performance of nations: efficiency and returns to scale. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 31, n. 3, p. 191-204, 1997

GREENE, W. H. **Econometric analysis**. 7. ed., internat. ed ed. Boston, Mass.: Pearson, 2012.

GUJARATI, D. N. **Basic Econometrics**. 4 ed. The McGraw-Hill Companies, 2004.

HANSMANN, R.; MIEG, H. A.; FRISCHKNECHT, P. Principal sustainability components: empirical analysis of synergies between the three pillars of sustainability. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 19, n. 5, p. 451–459, out. 2012.

HALKOS, G. E.; TZEREMES, N. G. Exploring the existence of Kuznets curve in countries' environmental efficiency using DEA window analysis. **Ecological Economics**, v. 68, n. 7, p. 2168–2176, maio 2009.

HALKOS, G. E.; TZEREMES, N. G.; KOURTZIDIS, S. A. Regional sustainability efficiency index in Europe: an additive two-stage DEA approach. **Operational Research**, v. 15, n. 1, p. 1–23, abr. 2015.

HALL, R. E.; JONES, C. I. **Why do some countries produce so much more output per worker than others?** National bureau of economic research, 1999.

HOSSEINZADEH LOTFI, F. et al.. A Review of Ranking Models in Data Envelopment Analysis. **Journal of Applied Mathematics**, v. 2013, p. 1–20, 2013.

HU, J. L.; KAO, C. H. Efficient energy-saving targets for APEC economies. **Energy Policy**, v. 35, n. 1, p. 373–382, jan. 2007.

INTERNATIONAL MONETARY FUND – IMF. Disponível em: <<http://www.imf.org/en/Data/>>. Acesso em: 20 set 2014.

JORO, T.; KORHONEN, P. J. **Extension of Data Envelopment Analysis with Preference Information**. Boston, MA: Springer US, 2015.

KAIVO-OJA, J. et al. Relationships of the dimensions of sustainability as measured by the sustainable society index framework. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 21, n. 1, p. 39-45, 2014.

KRÜGER, J. J. The global trends of total factor productivity: evidence from the nonparametric Malmquist index approach. **Oxford Economic Papers**, v. 55, p. 265-286, 2003.

KUAH, C. T.; WONG, K. Y.; BEHROUZI, F. **A Review on Data Envelopment Analysis (DEA)** IEEE, 2010.

KUMAR, S.; RUSSELL, R. R. Technological change, technological catch-up, and capital deepening relative contributions to growth and convergence. **American Economic Review**, v. 92, n. 3, p. 527-548, jun. 2002.

LÁBAJ, M.; LUPTÁČIK, M.; NEŽINSKÝ, E. Data envelopment analysis for measuring economic growth in terms of welfare beyond GDP. **Empirica**, v. 41, n. 3, p. 407–424, ago. 2014.

LAYRARGUES, P. P. - Do ecodesenvolvimento ao desenvolvimento sustentável: evolução de um conceito. **Proposta**, v.25, n.71, p.5-10, 1997

LEMO, C. Inovação na era do conhecimento. In: LASTRES, H. M. M.; ALBAGLI, S. (Org.). **Informação e globalização na era do conhecimento**. Rio de Janeiro: Campus, 1999.

LETA, F. R. et al. Métodos de melhora de ordenação em DEA aplicados à avaliação estática de tornos mecânicos. **Investigação Operacional**, v. 25, n. 2, p. 229-242, 2005.

Livro branco: ciência, tecnologia e inovação. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2002.

LOVELL, C. A. K.; PASTOR, J. T.; TURNER, J. A. Measuring macroeconomic performance in the OECD: a comparison of European and non-European countries. **European Journal of Operational Research**, v. 87, n. 3, p. 507-518, 1995.

MANTOVANELI JR, O.; SAMPAIO, C. A. C. Sustentabilidade política e administrativa: contribuições para a reformulação da agenda para o ecodesenvolvimento. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 1, n. 2, p. 3-21, 2007.

MARIANO, E. B. **Sistematização e Comparação de Técnicas, Modelos, e Perspectivas não-paramétricas de análise de Eficiência Produtiva**. São Carlos, 2008. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MARIANO, E. B.; REBELATTO, D. A. N. Sistematização do Processo de Escolha dos Modelos e Perspectivas da Análise Envoltória de Dados Por Meio de Um Sistema Especialista. In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2010, São Carlos.

MARIANO, E. B.; REBELATTO, D. A. N. Transformation of wealth produced into quality of life: analysis of the social efficiency of nation-states with the DEA's triple index approach. **Journal of the Operational Research Society**, v. 65, n. 11, p. 1664–1681, nov. 2014.

MAUDOS, J.; PASTOR, J. M.; SERRANO, L. Total factor productivity measurement and human capital in OECD countries. **Economics Letters**, v. 63, n. 1, p. 39–44, 1999.

MITCHAM, C. The Concept of Sustainable Development: its Origins and Ambivalence. **Technology in Society**, v. 17, n. 3, p. 311-326, 1995.

MORENO, J. J.; CARRASCO, O. R. Evolution of efficiency and its determinants in the retail sector in Spain: new evidence. **Journal of Business Economics and Management**, v. 16, n. 1, p. 244-260, 2015.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OECD. **The Measurement of Scientific and Technological Activities. Using Patent Data as Science and Technology Indicators: Patent Manual**. Paris: OECD Publishing, 1994.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD. **OECD environmental indicators: toward sustainable development**. Paris: OECD Publishing, 2001.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD. **Manual de Oslo: Guia para Coleta e Interpretação de Dados de Inovação**. 3 ed. Paris: OECD Publishing, 2005.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD. **OECD patent statistics manual**. Paris: OECD, 2009.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OECD. **Frascati manual: proposed standard practice for surveys on research and experimental development**. Paris: OECD Publishing, 2002

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD. **Education at a glance 2014: Ireland**. Paris: OECD Publishing, 2014a.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD. **Society at a glance: OECD social indicators**. Paris: OECD Publishing, 2014b.

OUR SUSTAINABLE FUTURE - A FRAMEWORK FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN IRELAND: PROGRESS REPORT 2014. Disponível em: <<http://www.environ.ie/sites/default/files/migrated-files/en/Publications/Environment/Miscellaneous/FileDownload,30452,en.pdf>>. Acesso em 28 mar. 2016.

PARK, H. M. Practical guides to panel data modeling: a step-by-step analysis using stata. **Public Management and Policy Analysis Program, Graduate School of International Relations, International University of Japan**, 2011.

PAWŁOWSKI, A. How many dimensions does sustainable development have? **Sustainable Development**, v. 16, n. 2, p. 81–90, mar. 2008.

PENN WORLD TABLES 8.0: FEENSTRA, R. C., INKLAAR, R.; TIMMER, M. P. The Next Generation of the Penn World Table (2013). Disponível em: <www.ggdcc.net/pwt>. Acesso em: 30 out 2014.

PORTER, M. E.; VAN DER LINDE, C. Green and competitive: ending the stalemate. **Harvard business review**, v. 73, n. 5, p. 120-134, 1995.

POVEDA, A. C.; MARTINEZ, C. I. P. Las tendencias de la pobreza y la desigualdad: una evidencia para los departamentos de Colombia. **Ensayos Revista de Economía**, v. 30, n. 2, p. 29-50, 2011.

PROITE, A.; SOUZA, M. C. S. Eficiência técnica, economias de escala, estrutura da propriedade e tipo de gestão no sistema hospitalar brasileiro. ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE CENTROS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA, v. 32, 2004.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – PNUD. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

RAMANATHAN, R. Evaluating the comparative performance of countries of the Middle East and North Africa: A DEA application. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 40, n. 2, p. 156–167, jun. 2006.

RODRIGUES, D. M.; NAJBERG, E. Indicadores de sustentabilidade das políticas públicas decorrentes da expansão do setor sucroalcooleiro em Carmo do Rio Verde (GO). **Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA**, v. 6, n. 3, p. 61-77, set./dez. 2012.

SACHS, I. **Desenvolvimento includente, sustentável, sustentado**. São Paulo: Garamond, 2006.

SALA-I-MARTIN, X. 15 Years of New Growth Economics: What Have We Learnt? **Discussion Paper Series**. n. 0102-47, Departament of Economics Columbia University, abr. 2002.

SAMPAIO, R. F; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Braz. J. Phys. Ther. (Impr.)**, v. 11, n. 1, p. 83-89, 2007.

SANTANA, N. B. **Crescimento econômico, desenvolvimento sustentável e inovação tecnológica – uma análise de eficiência por envoltória de dados para os países do BRICS**. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SANTANA, N. B. et al. Sustainable development in the BRICS countries: an efficiency analysis by data envelopment. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 21, n. 3, p. 259–272, 4 maio 2014.

SANTANA, N. B. et al. National innovative capacity as determinant in sustainable development: a comparison between the BRICS and G7 countries. **International Journal of Innovation and Sustainable Development**, v. 9, n. 3/4, p. 384, 2015.

SCHEEL, H. Undesirable outputs in efficiency valuations. **European Journal of Operational Research**, v. 132, n. 2, p. 400–410, jul. 2001.

SCHUMPETER, J. A. **Teoria do desenvolvimento econômico**. São Paulo: Editora Nova Cultural, 1997.

SEIFORD, L. M.; ZHU, J. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. **European Journal of Operational Research**, v. 142, n. 1, p. 16–20, out. 2002.

SEN, A. Mortality as an Indicator of Economic Success and Failure. **The Economic Journal**, v. 108, n. 446, p. 1–25, jan. 1998.

SEN, A. **Desenvolvimento como liberdade**. São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

SENRA, L. F. A. DE C. et al. Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA. **Pesquisa Operacional**, v. 27, n. 2, ago. 2007.

SHARMA, S.; THOMAS, V. J. Inter-country R&D efficiency analysis: An application of data envelopment analysis. **Scientometrics**, v. 76, n. 3, p. 483-501, 2008.

SHERAM, K. A.; SOUBBOTINA, T. P. **Beyond Economic Growth: Meeting The Challenges Of Global Development**. Washington, D.C.: World Bank, 2000.

SILVEIRA, J. Q. DA; ANGULO-MEZA, L.; MELLO, J. C. C. B. S. Identificação de benchmarks e anti-benchmarks para companhias aéreas usando modelos DEA e fronteira invertida. **Produção**, v. 22, n. 4, p. 788–795, dez. 2012.

SOUSA, M. C. S.; SOUZA, J. C. F. Escores robustos de eficiência e seus determinantes: o caso das agências do Banco do Brasil. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 44, n. 1, 2014.

STATACORP, L. P. et al. Stata data analysis and statistical Software. **Special Edition Release**, v. 13, 2013.

STERN, D. I. The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve. **World Development**, v. 32, n. 8, p. 1419–1439, ago. 2004.

STERN, D. I.; COMMON, M. S.; BARBIER, E. B. Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development. **World Development**, v. 24, n. 7, p. 1151-1160, 1996.

SUZUKI, S.; NIJKAMP, P. An evaluation of energy-environment-economic efficiency for EU, APEC and ASEAN countries: Design of a Target-Oriented DFM model with fixed factors in Data Envelopment Analysis. **Energy Policy**, v. 88, p. 100-112, 2016.

THOMAS, V. J.; JAIN, S. K.; SHARMA, S. Analyzing R&D efficiency in Asia and the OECD: An application of the Malmquist productivity index. In: **Science and Innovation Policy**, 2009 Atlanta Conference on. IEEE, 2009. p. 1-10.

TOLOO, M.; TICHÝ, T. Two alternative approaches for selecting performance measures in data envelopment analysis. **Measurement**, v. 65, p. 29–40, abr. 2015.

VAN BELLEN, H. M. Desenvolvimento Sustentável: Uma Descrição das Principais Ferramentas de Avaliação. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, n. 1, jan.-jun. 2004.

VAN BELLEN, H. M. **Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006.

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI**. Rio de Janeiro: Garamond, 2010.

VERGRAGT, P. J. How technology could contribute to a sustainable world. **GTI Paper Series**, v. 28, 2006.

VOLLENBROEK, F. A. Sustainable development and the challenge of innovation. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, n. 3, p. 215–223, jun. 2002.

WANG, E. C.; HUANG, W. Relative efficiency of R&D activities: A cross-country study accounting for environmental factors in the DEA approach. **Research Policy**, v. 36, n. 2, p. 260–273, mar. 2007.

WIEDMANN, T.; BARRETT, J. A Review of the Ecological Footprint Indicator—Perceptions and Methods. **Sustainability**, v. 2, n. 6, p. 1645–1693, 7 jun. 2010.

WOO, C. et al. The static and dynamic environmental efficiency of renewable energy: A Malmquist index analysis of OECD countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 367-376, 2015.

WOOLDRIDGE, J. M. **Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data**. 2 ed. Londres: MIT Press, 2010.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introductory Econometrics – A Modern Approach**. 3 ed. Thomson South-Western. 2006

WORLD BANK. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/>>. Acesso em: 20 set 2014.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT – WCED. **Our common future**. Oxford: Univ. Press, 1987.

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION – WIPO. Estatísticas. Disponível em: <www.wipo.int/ipstats/en/>. Acesso em: 25 out 2014.

YEH, T.; CHEN, T.; LAI, P. A comparative study of energy utilization efficiency between Taiwan and China. **Energy Policy**, v. 38, n. 5, p. 2386–2394, maio 2010.

YORK, R.; ROSA, E. A.; DIETZ, T. A tale of contrasting trends: Three measures of the ecological footprint in China, India, Japan, and the United States, 1961-2003. **Journal of World-Systems Research**, v. 15, n. 2, p. 134-146, 2015.

XUE, M.; Harker, P. T. Overcoming the inherent dependency of DEA efficiency scores: a bootstrap approach. **Unpublished Working Paper, Wharton Financial Institutions Center, University of Pennsylvania**, 1999.

ZAIM, O.; TASKIN, F. Environmental efficiency in carbon dioxide emissions in the OECD: A non-parametric approach. **Journal of Environmental Management**, v. 58, n. 1, p. 95–107, jan. 2000.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; HAN, J. Y. Total factor carbon emission performance: A Malmquist index analysis. **Energy Economics**, v. 32, n. 1, p. 194–201, jan. 2010.

ANEXOS

ANEXO A

Tabela 29 - Resultado da análise de janela para os modelos econômico, social, ambiental e desenvolvimento sustentável

Rank	Econômico		Social		Ambiental		Desenvolvimento Sustentável	
	País	Eficiência média	País	Eficiência média	País	Eficiência média	País	Eficiência média
1°	EUA	99,793	Islândia	99,826	Islândia	100,000	Irlanda	98,623
2°	Irlanda	99,748	Luxemburgo	98,819	Madagáscar	99,998	Lituânia	96,877
3°	Índia	99,746	Chipre	98,745	Armênia	99,987	Panamá	95,864
4°	Espanha	99,297	Suíça	98,528	Quirguistão	99,983	Holanda	94,750
5°	Noruega	99,287	Suécia	97,262	Albânia	99,982	Bélgica	94,721
6°	Itália	99,261	Grécia	97,083	Chipre	99,982	Turquia	94,426
7°	Egito	99,101	Japão	97,008	Paraguai	99,979	Luxemburgo	94,399
8°	Canada	98,994	Espanha	96,844	Moldávia	99,974	Suécia	94,375
9°	Islândia	98,887	Hong Kong	96,843	Geórgia	99,971	Grécia	93,879
10°	Luxemburgo	98,577	Bélgica	96,560	Uruguai	99,958	Suíça	93,647
11°	França	98,029	Israel	96,499	Panamá	99,953	Portugal	92,989
12°	Turquia	97,935	Irlanda	96,265	Letônia	99,950	Letônia	92,600
13°	Holanda	97,725	Áustria	96,154	Luxemburgo	99,947	Dinamarca	92,593
14°	China	97,666	Holanda	96,000	Jamaica	99,923	Áustria	92,557
15°	Bélgica	97,624	Portugal	95,986	Guatemala	99,899	Espanha	92,510
16°	Panamá	95,884	Nova Zelândia	95,735	Sri Lanka	99,899	Noruega	92,465
17°	Iêmen	95,566	Finlândia	95,709	Lituânia	99,886	Eslováquia	91,422
18°	Quirguistão	95,459	Itália	95,624	Eslovênia	99,863	Eslovênia	91,382
19°	Portugal	94,076	Armênia	95,526	Estônia	99,863	Itália	91,105
20°	Armênia	93,766	Austrália	95,436	Iêmen	99,826	França	91,067
21°	México	93,587	Noruega	95,336	Jordânia	99,826	Croácia	90,951
22°	Alemanha	93,311	Eslovênia	95,172	Croácia	99,792	Finlândia	90,694
23°	Lituânia	90,479	Singapura	94,958	Tunísia	99,791	Bulgária	90,688
24°	Reino Unido	90,203	França	94,908	Equador	99,732	Guatemala	89,941
25°	Chipre	89,979	Canadá	94,822	Singapura	99,718	Hungria	89,885
26°	Suécia	89,764	Quirguistão	94,568	Nova Zelândia	99,681	Chile	89,830
27°	Grécia	88,125	Dinamarca	94,481	Peru	99,659	Tunísia	89,573
28°	Guatemala	86,092	Chile	94,361	Eslováquia	99,636	Romênia	88,931
29°	Austrália	83,061	Panamá	93,603	Hong Kong	99,628	Polônia	88,723
30°	Estônia	82,643	Reino Unido	93,372	Suíça	99,611	Rep Tcheca	88,589
31°	Áustria	82,252	Albânia	93,367	Bangladesh	99,601	México	88,161
32°	Suíça	82,249	Alemanha	93,342	Irlanda	99,585	Paraguai	87,807
33°	África do Sul	77,706	Coreia do Sul	92,622	Noruega	99,581	Equador	86,692

(continua)

Tabela 30 - Resultado da análise de janela para os modelos econômico, social, ambiental e desenvolvimento sustentável

(continuação)

Rank	Econômico		Social		Ambiental		Desenvolvimento Sustentável	
	País	Eficiência média	País	Eficiência média	País	Eficiência média	País	Eficiência média
34°	Brasil	77,383	Uruguai	92,569	Bulgária	99,540	Peru	86,469
35°	Madagáscar	76,377	Rep Tcheca	92,497	Dinamarca	99,519	Alemanha	86,414
36°	Hong Kong	76,339	Croácia	92,051	Suécia	99,502	Colômbia	86,403
37°	Coreia do Sul	75,943	Jamaica	91,740	Hungria	99,454	Uruguai	86,140
38°	Polônia	75,221	EUA	91,491	Belarus	99,436	Iêmen	86,112
39°	Bangladesh	74,645	Equador	91,444	Colômbia	99,406	Belarus	86,040
40°	Jamaica	74,024	Eslováquia	90,633	Finlândia	99,405	Canadá	85,901
41°	Rússia	73,759	Tunísia	90,576	Portugal	99,399	Chipre	85,803
42°	Uzbequistão	73,142	Vietnam	90,421	Chile	99,391	Egito	85,553
43°	Paquistão	72,711	Sri Lanka	89,992	Israel	99,372	Armênia	85,230
44°	Japão	71,748	Polônia	89,782	Áustria	99,318	Sri Lanka	85,097
45°	Dinamarca	69,971	Estônia	89,621	Filipinas	99,290	Argentina	84,876
46°	Irã	69,758	Jordânia	89,419	Romênia	99,061	Israel	83,737
47°	Israel	69,509	Argentina	89,351	Grécia	99,054	Austrália	83,732
48°	Chile	69,303	Geórgia	89,276	Vietnam	99,035	Irã	83,590
49°	Bulgária	68,788	México	89,243	Bélgica	98,931	Hong Kong	83,206
50°	Finlândia	68,412	Bulgária	88,827	Uzbequistão	98,834	Malásia	82,970
51°	Indonésia	66,229	Lituânia	88,525	Rep Tcheca	98,809	Albânia	81,038
52°	Paraguai	65,618	Hungria	88,418	Paquistão	98,645	Geórgia	81,008
53°	Letônia	64,859	Peru	88,284	Argentina	98,415	Estônia	80,866
54°	Singapura	63,441	Letônia	88,162	Egito	98,354	Singapura	77,765
55°	Rep Tcheca Nova Zelândia	63,176	Malásia	88,155	Holanda	98,291	Brasil Nova Zelândia	77,161
56°		62,524	Turquia	88,017	Malásia	98,268		76,256
57°	Eslováquia	62,498	Colômbia	87,897	Cazaquistão	98,173	Tailândia	75,478
58°	Romênia	62,493	Romênia	87,750	Turquia	97,570	Jordânia	74,297
59°	Sri Lanka	60,526	Paraguai	87,727	Tailândia	97,525	Filipinas	74,031
60°	Hungria	60,361	China	87,368	Polônia	96,934	Quirguistão	73,143
61°	Colômbia	58,294	Tailândia	86,215	Ucrânia	96,740	Paquistão	72,473
62°	Vietnam	56,051	Irã	85,579	Espanha	96,694	Uzbequistão	72,158
63°	Filipinas	55,701	Guatemala	85,438	Brasil	96,523	Cazaquistão	65,496
64°	Argentina	55,238	Brasil	84,773	Indonésia	96,518	Islândia	65,076
65°	Malásia	54,651	Egito	84,520	Austrália	96,403	Indonésia	64,517
66°	Tunísia	53,961	Belarus	84,284	França	96,198	Moldávia	63,617
67°	Eslovênia	52,857	Moldávia	83,337	África do Sul	95,865	Ucrânia	60,767
68°	Croácia	52,003	Bangladesh	82,900	México	95,732	Jamaica	60,055

(continua)

Tabela 30 - Resultado da análise de janela para os modelos econômico, social, ambiental e desenvolvimento sustentável

(conclusão)							
Rank	Econômico		Social		Ambiental		Desenvolvimento Sustentável
	País	Eficiência média	País	Eficiência média	País	Eficiência média	País Eficiência média
69°	Belarus	51,618	Indonésia	82,611	Itália	95,421	Reino Unido 58,375
70°	Tailândia	50,904	Uzbequistão	82,405	Coreia do Sul	95,224	Rússia 57,955
71°	Peru	50,748	Filipinas	81,638	Irã	95,221	Vietnam 56,100
72°	Equador	50,031	Ucrânia	81,575	Reino Unido	94,683	Coreia do Sul 54,936
73°	Uruguai	47,990	Cazaquistão	80,604	Canadá	94,555	Bangladesh 54,745
74°	Geórgia	44,189	Madagáscar	79,898	Alemanha	91,939	Japão 54,693
75°	Cazaquistão	43,257	Paquistão	79,347	Japão	87,761	África do Sul 54,581
76°	Albânia	40,440	Rússia	78,297	Índia	85,294	Índia 53,705
77°	Jordânia	38,570	Iêmen	77,214	Rússia	83,753	Madagáscar 53,500
78°	Moldávia	38,544	Índia	75,726	China	43,128	EUA 53,424
79°	Ucrânia	34,904	África do Sul	62,220	EUA	42,913	China 52,698

Tabela 30 - Índice de Malmquist (em média dos agrupamentos) para a aplicação econômica

Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
África	1,055	1,023	1,012	1,006	0,997	1,003	0,997	0,965	0,990	0,989
América-Central	0,958	0,986	0,983	0,985	0,972	0,964	1,006	0,963	0,965	0,993
América-Norte	0,982	1,007	1,008	1,009	0,995	0,991	0,990	0,984	0,975	1,002
América-Sul	1,082	1,032	0,994	1,053	1,039	1,029	1,048	1,034	1,012	1,104
Ásia-Central	1,017	1,026	1,027	1,042	1,012	1,012	1,014	1,009	0,992	0,992
Ásia-Leste	0,997	1,012	1,002	1,020	1,004	1,017	1,026	0,992	0,978	1,025
Ásia-Oeste	1,007	1,058	1,043	1,018	1,012	1,001	1,109	0,926	0,988	1,015
Ásia-Sul	0,984	1,071	1,025	1,025	1,017	1,028	1,032	0,996	1,021	1,079
Europa-Leste	1,039	1,043	1,051	1,086	1,060	1,035	1,020	1,017	0,949	1,008
Europa-Norte	1,006	1,002	1,034	1,037	1,013	0,999	0,996	0,954	0,929	1,028
Europa-Oeste	1,014	1,026	1,002	1,020	1,011	1,015	1,048	0,969	0,951	1,019
Europa-Sul	0,982	0,976	1,015	1,011	0,996	1,015	0,998	0,963	0,936	1,014
Oceania	1,017	1,012	1,005	0,992	0,989	0,991	0,998	0,968	1,003	0,989
Não OECD	1,021	1,035	1,021	1,029	1,017	1,015	1,042	0,985	0,991	1,040
OECD	1,003	1,015	1,019	1,033	1,015	1,010	1,006	0,977	0,950	1,018

Tabela 31 - Índice de Catch-Up (em média dos agrupamentos) para a aplicação econômica

Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
África	1,054	1,024	0,944	0,928	1,087	1,011	1,018	1,011	1,012	0,994
América-Central	1,008	1,001	1,004	0,929	1,067	0,998	0,971	1,008	1,002	1,004
América-Norte	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,997

(continua)

Tabela 32 - Índice de *Catch-Up* (em média dos agrupamentos) para a aplicação econômica

(conclusão)										
Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
América-Sul	1,120	0,997	0,967	1,037	1,053	1,032	1,050	1,060	1,063	1,066
Ásia-Central	1,058	1,042	1,057	1,050	1,047	1,022	1,017	1,047	1,027	0,975
Ásia-Leste	1,000	1,012	1,008	1,014	1,014	1,023	1,024	1,013	1,001	1,020
Ásia-Oeste	1,028	1,036	1,007	1,018	1,027	1,012	1,024	1,015	1,022	1,013
Ásia-Sul	1,009	1,022	0,947	0,998	1,023	1,023	1,054	1,029	1,045	1,054
Europa-Leste	1,077	1,046	1,072	1,078	1,062	1,032	1,032	1,071	1,017	0,990
Europa-Norte	1,015	0,989	1,021	1,006	1,026	1,012	0,988	0,984	0,967	1,016
Europa-Oeste	1,004	0,996	0,995	0,994	1,003	1,006	1,005	1,002	0,994	1,000
Europa-Sul	0,974	0,966	1,016	1,020	1,023	1,029	1,013	1,029	1,003	0,999
Oceania	1,031	1,041	1,046	1,024	1,018	1,014	1,012	1,007	1,052	0,980
Não OECD	1,047	1,020	0,999	1,009	1,048	1,024	1,031	1,031	1,029	1,026
OECD	1,011	1,000	1,010	1,018	1,018	1,012	1,007	1,017	0,998	1,002

Tabela 33 - Índice de Malmquist (em média dos agrupamentos) para a aplicação social

Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
África	1,013	1,007	0,998	0,983	0,999	0,997	0,985	0,975	1,044	1,008
América-Central	1,000	1,002	1,002	1,002	0,999	0,996	1,002	1,003	1,003	1,003
América-Norte	1,002	1,005	1,006	1,022	1,030	0,996	0,997	1,006	1,006	1,005
América-Sul	1,005	1,004	1,003	1,003	1,002	1,002	1,003	1,003	1,003	1,003
Ásia-Central	1,000	0,997	0,995	1,004	0,996	0,999	0,998	1,003	1,002	0,990
Ásia-Leste	1,006	1,004	1,003	1,005	1,002	1,006	1,002	1,002	1,004	1,002
Ásia-Oeste	1,007	1,000	1,002	1,001	0,986	1,007	0,999	0,992	1,004	1,002
Ásia-Sul	1,004	1,005	1,004	1,004	1,003	1,003	1,003	1,002	1,004	1,003
Europa-Leste	1,002	1,001	1,002	1,006	1,001	1,007	1,004	1,003	1,005	1,004
Europa-Norte	1,003	1,002	1,004	1,004	1,000	1,002	1,001	1,005	1,005	1,004
Europa-Oeste	1,004	1,002	1,001	1,008	1,002	1,004	1,005	1,001	1,001	1,002
Europa-Sul	1,004	1,002	1,001	1,008	1,003	1,006	1,000	1,004	1,003	1,004
Oceania	1,003	1,003	1,004	1,004	1,004	1,002	1,002	1,002	1,003	1,001
Não OECD	1,004	1,003	1,002	1,002	0,998	1,001	1,000	1,000	1,008	1,003
OECD	1,004	1,003	1,003	1,007	1,004	1,006	1,001	1,002	1,003	1,003

Tabela 34 - Índice de *Catch-Up* (em média dos agrupamentos) para a aplicação social

Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
África	0,993	0,998	0,993	0,942	1,054	0,990	1,001	0,955	1,009	1,005
América-Central	0,994	0,998	1,006	0,984	1,011	0,987	0,972	1,010	1,001	1,001
América-Norte	0,991	1,005	1,007	1,015	1,047	0,942	0,992	1,017	1,003	1,003
América-Sul	0,996	1,002	1,003	0,998	1,000	0,985	1,000	1,016	1,001	1,001
Ásia-Central	0,993	1,003	0,997	1,001	0,999	0,999	0,999	1,005	1,007	0,998

(continua)

Tabela 35 - Índice de *Catch-Up* (em média dos agrupamentos) para a aplicação social

(conclusão)										
Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Ásia-Leste	1,000	1,003	1,003	1,000	1,004	0,965	1,003	1,034	1,000	1,000
Ásia-Oeste	0,998	1,002	0,972	0,997	1,009	0,992	0,985	0,997	1,002	1,000
Ásia-Sul	0,995	1,005	1,003	1,000	1,001	0,982	1,001	1,019	1,001	1,001
Europa-Leste	0,993	1,001	1,000	1,002	0,998	0,995	1,000	1,011	1,003	1,002
Europa-Norte	0,995	1,002	1,003	1,000	0,998	0,990	0,996	1,014	1,003	1,002
Europa-Oeste	0,994	1,002	1,000	1,004	1,000	0,988	1,002	1,013	0,999	1,000
Europa-Sul	0,993	0,999	1,004	0,999	1,000	0,996	0,994	1,008	1,001	1,002
Oceania	0,994	1,003	1,003	1,000	1,003	0,970	1,002	1,029	0,999	0,999
Não OECD	0,994	1,001	0,997	0,992	1,006	0,987	0,995	1,007	1,003	1,001
OECD	0,995	1,002	1,002	1,003	1,003	0,986	0,999	1,015	1,000	1,001

Tabela 36 - Índice de Malmquist (em média dos agrupamentos) para a aplicação ambiental

Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
África	1,00053	1,00035	0,99860	0,99868	1,00035	0,99895	0,99913	0,99930	0,99895	1,00095
América-Central	0,99958	1,00013	0,99965	0,99983	0,99933	0,99973	0,99953	0,99968	1,00070	1,00010
América-Norte	1,01355	0,99470	0,99465	0,98740	0,99520	1,01135	0,98875	1,02145	1,04135	0,98785
América-Sul	1,00010	1,00015	0,99998	0,99935	0,99964	0,99976	0,99953	0,99954	1,00031	0,99903
Ásia-Central	0,99927	0,99967	1,00003	0,99947	1,00010	0,99930	0,99903	0,99957	1,00063	0,99920
Ásia-Leste	0,99738	0,99130	0,96635	0,96415	0,97445	0,96298	0,97245	0,98200	0,94768	0,93210
Ásia-Oeste	1,00029	0,99987	0,99971	0,99986	0,99971	0,99950	0,99964	0,99986	1,00019	0,99966
Ásia-Sul	0,99895	0,99937	0,99883	0,99829	0,99885	0,99844	0,99782	0,99696	0,99738	0,99952
Europa-Leste	0,99987	1,00020	0,99888	1,00012	0,99995	0,99915	1,00008	0,99957	1,00297	0,99729
Europa-Norte	0,99979	1,00014	0,99975	1,00008	1,00024	0,99979	1,00018	1,00013	1,00071	0,99946
Europa-Oeste	0,99923	1,00050	0,99966	1,00009	1,00029	1,00029	1,00057	0,99996	1,00113	0,99943
Europa-Sul	0,99990	0,99963	0,99969	0,99961	0,99971	1,00021	0,99993	1,00070	1,00140	1,00040
Oceania	1,00015	0,99920	0,99965	0,99985	0,99935	0,99955	0,99970	0,99940	0,99970	1,00120
Não OECD	0,99944	0,99920	0,99642	0,99623	0,99728	0,99598	0,99690	0,99729	0,99504	0,99349
OECD	1,00065	0,99964	0,99926	0,99906	0,99979	1,00051	0,99922	1,00146	1,00371	0,99859

Tabela 37 - Índice de *Catch-Up* (em média dos agrupamentos) para a aplicação ambiental

Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
África	1,00053	1,00035	0,99860	0,99868	1,00038	0,99893	0,99913	0,99933	0,99895	1,00095
América-Central	0,99958	1,00008	0,99965	0,99968	0,99953	0,99978	0,99935	0,99963	1,00070	1,00010
América-Norte	1,01355	0,99465	0,99475	0,98740	0,99520	1,01135	0,98875	1,02145	1,04135	0,98790
América-Sul	1,00009	1,00011	1,00000	0,99936	0,99965	0,99976	0,99954	0,99954	1,00029	0,99904
Ásia-Central	0,99923	0,99967	1,00010	0,99950	1,00007	0,99930	0,99907	0,99957	1,00067	0,99923
Ásia-Leste	0,99735	0,99123	0,96643	0,96415	0,97445	0,96298	0,97248	0,98200	0,94765	0,93210
Ásia-Oeste	1,00029	0,99989	0,99957	0,99983	0,99989	0,99946	0,99963	0,99984	1,00016	0,99966

(continua)

Tabela 38 - Índice de *Catch-Up* (em média dos agrupamentos) para a aplicação ambiental

(conclusão)										
Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Ásia-Sul	0,99894	0,99931	0,99886	0,99831	0,99884	0,99844	0,99784	0,99698	0,99736	0,99953
Europa-Leste	0,99987	1,00019	0,99891	1,00013	0,99996	0,99913	1,00009	0,99959	1,00295	0,99730
Europa-Norte	0,99980	1,00013	0,99977	1,00004	1,00032	0,99971	1,00010	1,00009	1,00070	0,99946
Europa-Oeste	0,99923	1,00047	0,99969	1,00011	1,00029	1,00026	1,00057	0,99996	1,00114	0,99944
Europa-Sul	0,99990	0,99960	0,99971	0,99961	0,99974	1,00017	0,99991	1,00070	1,00140	1,00040
Oceania	1,00015	0,99920	0,99970	0,99985	0,99935	0,99955	0,99970	0,99940	0,99970	1,00120
Não OECD	0,99944	0,99918	0,99642	0,99622	0,99734	0,99598	0,99688	0,99729	0,99502	0,99350
OECD	1,00064	0,99960	0,99929	0,99906	0,99980	1,00047	0,99921	1,00146	1,00371	0,99860

Tabela 39 - Índice de Malmquist (em média dos agrupamentos) para a aplicação desenvolvimento sustentável

Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
África	1,00683	0,98655	1,00583	1,00800	0,99098	0,99740	0,99878	0,97993	0,99890	0,99408
América-Central	0,97733	0,99068	0,99418	1,00733	0,99100	0,99478	1,01093	0,98190	0,98550	0,99450
América-Norte	0,98470	1,00680	1,00730	1,00925	0,99520	0,99335	0,99100	0,99265	0,98430	1,00140
América-Sul	1,00045	1,00019	1,00000	0,99974	0,99983	1,00013	1,00030	1,00030	1,00038	1,02383
Ásia-Central	0,99930	0,99977	1,00160	0,99970	1,00023	0,99940	1,00220	0,99973	1,00080	0,99920
Ásia-Leste	0,99708	0,99428	0,99175	0,99663	0,99003	1,00068	1,00540	0,99658	1,00318	0,99610
Ásia-Oeste	0,99464	1,02253	1,03396	0,99620	0,99627	0,99231	1,07769	0,93453	1,00419	1,00591
Ásia-Sul	0,98262	0,99745	1,00205	0,99390	0,99463	1,00017	0,99936	0,99600	1,00864	1,00730
Europa-Leste	1,00016	1,00047	0,99941	1,00087	1,00086	1,00095	1,00178	1,00089	0,99869	0,99859
Europa-Norte	1,00027	1,00372	1,00534	1,00534	0,99948	0,98860	1,00100	0,98750	0,99061	1,01004
Europa-Oeste	1,01127	1,02301	1,00187	1,01214	1,00580	1,00474	1,03849	0,97199	0,97200	1,00953
Europa-Sul	1,00124	0,99493	1,00676	0,99844	0,99611	0,99666	0,99304	0,97409	0,97920	1,00264
Oceania	1,00200	1,00080	1,00135	1,00120	1,00200	1,00085	1,00055	0,99995	1,00115	1,00090
Não OECD	0,99505	0,99748	1,00076	0,99776	0,99617	0,99706	1,01790	0,98574	1,00179	1,00489
OECD	0,99958	1,00919	1,00950	1,00615	0,99958	0,99837	1,00095	0,98431	0,98593	1,00602

Tabela 40 - Índice de *Catch-Up* (em média dos agrupamentos) para a aplicação desenvolvimento sustentável

Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
África	0,99995	1,00053	0,99933	0,99878	1,00095	0,99948	0,99975	0,99975	0,99915	1,00093
América-Central	1,00000	0,99998	1,00003	0,99978	1,00015	1,00000	0,99980	1,00003	0,99855	1,00015
América-Norte	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
América-Sul	1,00060	1,00010	1,00001	0,99961	0,99970	0,99986	0,99991	1,00058	1,00080	1,00021
Ásia-Central	0,99937	0,99973	1,00017	0,99967	1,00017	0,99943	0,99903	0,99983	1,00107	0,99900
Ásia-Leste	1,00025	1,00023	1,00005	0,99958	1,00063	0,99983	0,99943	1,00050	1,00053	0,99985
Ásia-Oeste	0,99999	1,00003	0,99997	1,00000	1,00003	1,00049	0,99999	0,99960	1,00039	1,00000
Ásia-Sul	0,99967	0,99994	0,99764	0,99915	0,99947	0,99943	0,99905	0,99953	1,00001	1,00058
Europa-Leste	1,00041	1,00022	0,99947	1,00060	1,00067	1,00044	1,00109	1,00110	1,00142	0,99752

(continua)

Tabela 41 - Índice de *Catch-Up* (em média dos agrupamentos) para a aplicação desenvolvimento sustentável
(conclusão)

Sub-Região	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Europa-Norte	1,00019	1,00013	1,00017	1,00004	1,00039	0,99974	1,00010	1,00003	1,00027	0,99967
Europa-Oeste	1,00006	0,99991	0,99989	0,99996	0,99997	1,00004	0,99999	1,00004	1,00007	0,99989
Europa-Sul	1,00000	0,99999	0,99999	1,00000	1,00003	1,00006	0,99963	1,00006	1,00013	0,99990
Oceania	1,00095	1,00015	1,00160	0,99870	1,00300	0,99410	0,99985	1,00445	0,99915	0,99930
Não OECD	1,00004	1,00007	0,99924	0,99968	1,00001	0,99983	0,99984	1,00011	1,00035	0,99972
OECD	1,00019	1,00006	1,00014	0,99991	1,00046	0,99970	0,99993	1,00038	1,00018	0,99972

ANEXO B

Figura 30 - Emissão total mundial de CO2 entre os anos de 1960 e 2011

Fonte: World Bank

ANEXO C

Figura 31 - Os 10 países com maiores ganhos e 10 países com maiores perdas acumuladas de PTF, no modelo econômico, de 2000 a 2010

Figura 32 - Os 10 países com maiores ganhos e 10 países com maiores perdas acumuladas de PTF, no modelo social, de 2000 a 2010

Figura 33 - Os 10 países com maiores ganhos e 10 países com maiores perdas acumuladas de PTF, no modelo ambiental, de 2000 a 2010

Figura 34 - Os 10 países com maiores ganhos e 10 países com maiores perdas acumuladas de PTF, no modelo desenvolvimento sustentável, de 2000 a 2010