

**THIAGO COSTA SOARES**

**EXISTE SUBSTITUTIBILIDADE ENTRE OS INSUMOS NATURAIS E NÃO  
NATURAIS? EVIDÊNCIAS A PARTIR DA FUNÇÃO CES**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2012

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

T

S676e  
2012

Soares, Thiago Costa, 1988-

Existe substitutibilidade entre os insumos naturais e não naturais? Evidências a partir da função CES / Thiago Costa Soares. – Viçosa, MG, 2012.  
xiii, 65f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Elaine Aparecida Fernandes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 57-61.

1. Economia. 2. Modelos econométricos. 3. Meio ambiente - Aspectos econômicos. 4. Macroeconomia. 5. Microeconomia. 6. Desenvolvimento econômico. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 330

**THIAGO COSTA SOARES**

**EXISTE SUBSTITUTIBILIDADE ENTRE OS INSUMOS NATURAIS E NÃO  
NATURAIS? EVIDÊNCIAS A PARTIR DA FUNÇÃO CES**

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

Aprovada em: 20 de Julho de 2012

---

Simone de Faria Narciso Shiki

---

Jader Fernandes Cirino

---

Carlos Henrique Osório Silva  
(Coorientador)

---

Elaine Aparecida Fernandes  
(Orientadora)

Dedico este trabalho a todos que contribuíram de alguma forma para o meu amadurecimento pessoal e profissional, em especial à minha esposa, Catherine.

*“The mind that opens to a new idea  
never returns to its original size.”*

**Albert Einstein**

## AGRADECIMENTOS

Acho que apenas quando se chega nessa seção do trabalho é que vemos realmente que o tempo de mestrado chegou ao fim! Daí, olho para trás e vejo tudo que passou... a maratona de estudos na salinha, que, diga-se de passagem, só foi possível debaixo de várias doses de café; a ansiedade dos minutos antes das provas; as provas, que ora traumatizavam, ora corrompiam minhas habilidades psicológicas futuras (sinônimos?); dentre muitas coisas que talvez sequer caberiam nesta seção.

Mas, pela intensidade, talvez tenha sido a experiência que mais me marcou como acadêmico e como pessoa. E por isso, agradeço a todos os professores e funcionários do departamento de economia da UFV por terem contribuído para a minha formação; em especial, aos professores que diretamente confiaram em meu potencial e me deram o imenso prazer de tê-los como professores: Silvia Toyoshima, Jader Cirino, Francisco Cassuce, Marcelo Braga (DER/UFV), João Estáquio Lima (DER/UFV), Adriano Provezano e Sidney Caetano.

A Elaine Fernandes, não somente professora e orientadora, mas também amiga, que sempre me motivou e se prestou a me ouvir em várias situações onde nem sempre os assuntos eram acadêmicos;

A Evonir Pontes, por ter acreditado no potencial do meu projeto e por ser um dos responsáveis pela concretização do mesmo;

A Orlando Monteiro, por sua dedicação, paciência e pelas valiosas lições acadêmicas do dia a dia;

A Carlos Henrique, pela paciência e por ter atendido prontamente o meu convite de coorientação;

Aos colegas de mestrado que chegaram até aqui e aos que saíram prematuramente; em especial, Glauco Ribeiro e Udilmar Zobot, que foram como irmãos nessa trajetória.

Aos meus pais e minha irmã, Alencar, Edmirtes e Bárbara, por sempre confiarem em meus objetivos e por me apoiarem incondicionalmente;

Ao meu sogro Anselmo pela disposição em todos os assuntos possíveis; e a minha sogra Maria Eny, que, embora Deus tenha a levado para junto Dele muito cedo, sempre me incentivou e confiou em mim do início ao fim;

E a minha esposa, Catherine, por ter me ajudado a construir a personalidade do homem que sou hoje.

A todos não citados que contribuíram de alguma forma para mais uma etapa de vida, o meu muito obrigado!

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT .....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. O problema e sua importância .....	3
1.3. OBJETIVOS .....	6
1.3.1. Objetivo geral.....	6
1.3.2. Objetivos específicos .....	6
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	7
2.1. A Economia Ambiental na perspectiva neoclássica: uma breve leitura do modelo de crescimento econômico de Solow .....	7
2.2 A abordagem da função <i>Constant Elasticity of Substitution</i> (CES) e a elasticidade de substituição .....	11
2.2.1. A elasticidade de substituição na tecnologia Cobb-Douglas .....	13
2.2.2. A elasticidade de substituição na tecnologia Leontief .....	14
2.2.3. A elasticidade de substituição na tecnologia Linear .....	15
2.3. Elasticidade de substituição do capital, trabalho e recursos naturais: teoria e aplicação.....	15
2.4. Incorporando parâmetros de eficiência: o modelo empírico de EDENHOFER-BAUER-KRIEGLER (2005) .....	19
3 METODOLOGIA.....	20
3.1. Eficiência técnica dos fatores de produção.....	20



3.2.	Construção do indicador dos recursos naturais.....	22
3.3.	Estimação do crescimento econômico via modelos não lineares .....	24
3.4.	Variáveis e fonte de dados .....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1.	Análise dos fatores de produção ambiental, trabalho e capital.....	28
4.1.1.	Análise do ajustamento do fator de produção ambiental .....	28
4.1.2.	Análise do fator de produção trabalho .....	32
4.1.3.	Análise do fator de produção capital.....	33
4.2.	Os parâmetros de eficiência dos fatores ambiental, trabalho e capital .....	35
4.2.1.	Análise da eficiência do fator de produção ambiental .....	35
4.2.2.	Análise da eficiência do fator de produção trabalho.....	38
4.2.3.	Análise de eficiência do fator de produção capital .....	41
4.3.	O efeito dos insumos capital, trabalho e recursos naturais no crescimento econômico e a elasticidade de substituição geral.....	44
4.4.	As elasticidades de substituição parciais entre os insumos .....	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
	APÊNDICES .....	62
	Apêndice A: .....	62
	Apêndice B:.....	63
	Apêndice C:.....	64
	Apêndice D: .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis utilizadas.....	27
Tabela 2 – Ajustamento do modelo para a construção do fator ambiental .....	28
Tabela 3 – Cargas fatoriais e o grau de ajustamento do fator ambiental .....	29
Tabela 4 – Elasticidades e pesos relativos do fator ambiental .....	29
Tabela 5 – <i>Ranking</i> dos maiores usuários de energia do mundo, 2008 .....	30
Tabela 6 – <i>Ranking</i> da População Economicamente Ativa (PEA) dos países, 2008 ...	32
Tabela 7 – <i>Ranking</i> dos maiores formadores de capital do mundo, 2008.....	33
Tabela 8 – <i>Ranking</i> dos países segundo a eficiência do fator ambiental .....	36
Tabela 9 – <i>Ranking</i> dos países segundo a eficiência do fator trabalho .....	39
Tabela 10 – <i>Ranking</i> dos países segundo a eficiência do fator capital .....	43
Tabela 11 – Coeficientes estimados .....	46
Tabela 12 – Estimativas das elasticidades individuais dos insumos .....	48
Tabela 13 – Estimativas das elasticidades de substituição parciais .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo paramétrico (fronteira de eficiência) e modelo não paramétrico (reta de regressão) .....	22
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## RESUMO

SOARES, Thiago Costa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2012. **Existe substitutibilidade entre os insumos naturais e não naturais? Evidências a partir da função CES.** Orientadora: Elaine Aparecida Fernandes. Coorientadores: Silvia Harumi Toyoshima, Adriano Provezano Gomes e Carlos Henrique Osório Silva.

O objetivo desse estudo foi avaliar o grau de substituição entre os insumos capital, trabalho e energia para as 80 maiores economias do mundo em 2008. Buscou-se incorporar as eficiências individuais e estimar função de produção *Constant Elasticity of Substitution* (CES), que flexibiliza o parâmetro de substitutibilidade. O referencial teórico utilizado baseou-se nas pressuposições da economia ambiental, sobretudo no modelo de Solow (1986), Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) e Kemfert (1998). O procedimento metodológico adotado consistiu na estimação da função CES por Mínimos Quadrados Não Lineares (MQONL). Concomitantemente, utilizou-se a técnica estatística de análise fatorial para construir o indicador relativo ao insumo ambiental. E para o cálculo das eficiências individuais dos fatores de produção, utilizou-se a técnica *Data Envelopment Analysis* (DEA), que permitiu analisar os escores de eficiência das nações quanto à utilização dos insumos naturais e não naturais. Acerca dos principais resultados, cabe destacar que não se pode rejeitar estatisticamente a hipótese de que a função CES descreva o comportamento econômico mundial. Segundo o parâmetro de substituição estimado, a elasticidade de substituição entre os insumos naturais e não naturais é menor que a unidade. Dessa forma, pode-se dizer que as possibilidades de troca entre os insumos são limitadas. De outra forma, pelos parâmetros parciais de substituição estimados, pode-se afirmar que a elasticidade de substituição capital-energia está mais próxima da complementaridade

do que da substitutibilidade, já que o valor estimado está mais próximo de zero. Em relação aos resultados encontrados para o modelo capital-trabalho, as evidências são praticamente as mesmas quanto ao grau de substituição. Já para o modelo energia-trabalho, embora exista maior grau de substitutibilidade, não parece coerente supor um retrocesso tecnológico ao ponto de se trocar, por exemplo, gasolina por força animal. Portanto, o atual esquema de produção utilizado pode ser considerado insustentável, pois as possibilidades de troca entre os insumos são relativamente baixas e a utilização irracional dos recursos naturais neste contexto pode levar a uma contínua degradação do meio ambiente e à perda de bem estar das futuras gerações.

## ABSTRACT

SOARES, Thiago Costa. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2012. **There are substitutability between natural and unnatural inputs? Evidence from the CES function.** Adviser: Elaine Aparecida Fernandes. Co-Advisers: Silvia Harumi Toyoshima, Adriano Provezano Gomes and Carlos Henrique Osório Silva.

The aim of this study was to evaluate the degree of substitution between inputs capital, labor and energy for the 80 largest economies in 2008. We tried to incorporate the individual efficiencies and estimate the production function Constant Elasticity of Substitution (CES), which relaxes the parameter of substitutability. The theoretical framework used was based on assumptions of environmental economics, especially in the Solow model (1986), Edenhofer, Bauer and Kriegler (2005) and Kemfert (1998). The methodological procedure adopted consisted in the estimation of the CES function for Nonlinear Least Squares (MQONL). Concomitantly, we used the statistical technique of factor analysis to construct an indicator relating to natural resources. And for the calculation of the individual efficiencies of factors, we used the technique Data Envelopment Analysis (DEA), which allowed us to analyze the efficiency scores of nations on the use of natural and unnatural inputs. On the main results, it is worth noting that one can not reject the hypothesis that the CES function describing the world economic behavior. According to the substitute parameter estimated, the elasticity between natural and unnatural inputs is less than unity. Thus, we can say that the possibilities of exchange between the inputs are limited. Otherwise, the partial parameters estimated, it can be stated that the elasticity of substitution capital and energy is closer to the complementarily, since the value is closer to zero. Regarding the results for the model capital and labor, the evidence is practically the same. In

other hand, the model energy and labor, although there is greater substitutability, isn't seems coherent to suppose a technological step backwards to the point to exchange, for example, gasoline for animal power. Therefore, the current production scheme used can be considered unsustainable because the possibilities of exchange among the inputs are relatively low and the irrational use of natural resources in this context can lead to a continuous environmental degradation and loss of welfare for future generations.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações iniciais

Os problemas relacionados à escassez dos fatores econômicos de produção como capital, trabalho e terra sempre foram relevantes no estudo das ciências econômicas, pois a melhor gestão desses recursos garante a maximização do lucro por parte de uma firma ou o crescimento econômico por parte de um país. Porém, na visão neoclássica, o fator capital quase sempre desempenhou e ainda desempenha papel primordial nas análises econômicas.

Apesar da análise do comportamento temporal do capital ainda ser de suma importância para o sistema econômico, cresce a importância relativa do fator produtivo ligado ao meio ambiente, uma vez que o aumento contínuo da produção de bens e serviços pode levar ao esgotamento dos recursos naturais para as futuras gerações.

Existem estudos, como o do *World Bank* (2008), que mostram que nas últimas três décadas, o aumento da temperatura do planeta via emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE) deteriorou os indicadores da qualidade do meio ambiente. Dentre esses gases, a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por combustíveis fósseis tem sido responsável por aproximadamente 56,6% do total de emissões. Os setores que mais contribuíram para esse cenário, segundo o *World Bank* (2008), foram os relacionados à indústria e ao transporte.

Segundo o Instituto *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), atividades florestais e agrícolas também contribuíram de forma expressiva para o aumento das emissões via CO<sub>2</sub>, com participações de 17,4% e 13,5% no total,



respectivamente. Além das emissões por CO<sub>2</sub>, a emissão de Metano (CH<sub>4</sub>), com 14,3% das emissões totais, também foi expressiva nas últimas décadas (IPCC, 2010).

Em relação ao *ranking* de países emissores, os Estados Unidos ocupam o primeiro lugar com aproximadamente 30% das emissões mundiais no período compreendido entre 1960 e 2006. No mesmo período, China (13%), Japão (5,97%) e Reino Unido (3,69%), com participações relativas menores quando comparados aos Estados Unidos, mas com importante parcela em relação ao total, assumem o segundo, terceiro e quarto lugar respectivamente no *ranking* dos maiores poluidores. Os quatro maiores poluidores citados acima respondem por mais de 50% da poluição total. Quando considera-se os 10 maiores (além dos supracitados, Índia, Federação Russa, França, Canadá, Itália e Polônia), o valor aumenta para 70%. Em adição, tem-se que dos dez maiores poluidores do mundo, sete estão na lista de países com o maior Produto Interno Bruto (PIB) gerado, a saber: Estados Unidos, Japão, França, Reino Unido, Itália, China e Canadá (*WORLD BANK*, 2008).

Ao passo que o processo de degradação ambiental se intensifica, seja via emissões de GEE ou pelo uso intenso dos recursos naturais, ocorre o melhoramento do padrão econômico da maioria das nações (ROMER, 2006). Por isso, a visão do fator de produção ligado ao meio ambiente ganha destaque na literatura neoclássica com Solow (1974, 1986) e Stiglitz (1974), principalmente, através de modelos teóricos de crescimento econômico que acrescentam os recursos naturais como insumos no processo produtivo.

Nesses modelos, Solow (1986) e Stiglitz (1974) utilizam os pressupostos da função de produção Cobb-Douglas para explicar o crescimento econômico das nações através dos fatores de produção capital, trabalho e recursos naturais. A utilização dessa função de produção tem como consequência assumir que os insumos seguem propriedades específicas, como substitutibilidade imperfeita, retornos constantes à escala, elasticidade de substituição unitária, dentre outras.

Contudo, Klump e Grandville (2000) apontam que se duas economias apresentam taxas semelhantes de poupança, de crescimento populacional, de estoque de capital e de recursos naturais, então, a economia que obtiver a maior elasticidade de substituição entre os fatores produtivos tenderá a apresentar níveis mais altos de renda

*per capita*<sup>1</sup>. Porém, na função de produção Cobb-Douglas, utilizada por Solow (1986) e Stiglitz (1974), a elasticidade de substituição é sempre unitária, o que restringe as análises do comportamento do produto. Ademais, pela função Cobb-Douglas, não se pode sequer testar se existe ou não substitutibilidade entre os insumos naturais e não naturais, o que é pertinente em qualquer estudo econômico.

Uma possível alternativa frequentemente utilizada em estudos sobre o crescimento econômico é a função *Constant Elasticity of Substitution* (CES), que é, na verdade, uma formulação geral da função Cobb-Douglas em que o parâmetro de substituição pode ser flexibilizado. Por flexibilização, entende-se a possibilidade de mudança do parâmetro de substitutibilidade e, conseqüentemente, da própria elasticidade de substituição entre os insumos produtivos, que em Solow (1957, 1986) é zero e unitária, por pressuposição.

Nesse contexto, a análise da contribuição dos fatores produtivos no crescimento econômico e a relação entre eles se tornam de suma relevância ao entendimento teórico e empírico da melhor exploração dos insumos produtivos, especificamente os recursos naturais. Para reformas estruturais e políticas econômicas que têm por objetivo impactar sobre os níveis de estoque de capital, investimento financeiro e produtivo, infraestrutura básica, qualificação da mão de obra, melhoramento das condições de trabalho e de utilização dos recursos naturais, é importante o estudo genérico dos fatores que norteiam o crescimento econômico das nações.

## **1.2. O problema e sua importância**

A utilização eficiente dos insumos produtivos possui grande relevância na literatura econômica. Apesar da importância do capital, a alocação eficiente dos recursos naturais está na pauta das grandes discussões contemporâneas. Os problemas ambientais que originalmente eram locais adquiriram proporções ecossistêmicas globais, principalmente após a revolução industrial. A desertificação e a perda de

---

<sup>1</sup> Segundo Klump e Grandville (2000), se a elasticidade de substituição entre os fatores produtivos for superior à unidade, os impactos tecnológicos na estrutura produtiva são mais rapidamente absorvidos devido à maior substitutibilidade entre os insumos.

qualidade dos solos, o buraco na camada de ozônio, a degradação dos oceanos e da biodiversidade, e a mudança climática podem ser citados como exemplos. Por isso, os países estão sendo pressionados a refletirem e a tomarem medidas que consideram a capacidade da biosfera em absorver os efeitos das atividades humanas. Uma medida importante consistiu na criação do protocolo de Kyoto, que pode ser entendido como um conjunto de metas jurídicas de redução de emissões de poluentes (GUESNERIE, 2011).

A relação meio ambiente e crescimento econômico torna-se, então, um tema de grande importância, pois avaliar de que forma os insumos produtivos, inclusive os recursos naturais, estão relacionados ainda é um assunto bastante controverso em estudos especializados. Diante disso, o presente trabalho procura colaborar um pouco mais para a literatura atual, com o ajuste de uma função de produção cujo objetivo é relacionar o crescimento econômico com os fatores capital, trabalho e recursos naturais. Em adição, busca-se verificar qual é o grau de substitutibilidade, se é que ele existe, entre os insumos naturais e não naturais. Conhecer essa relação ajuda os agentes governamentais a tomarem decisões a respeito de como manter o crescimento econômico concomitantemente às questões ambientais. Possibilita também aos agentes privados repensarem a tecnologia a ser usada na sua produção. Para isso, utilizou-se uma variante do modelo de Kempfert (1998) e de Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) que faz a ligação teórica entre as três variáveis anteriormente citadas.

Existe uma discussão muito grande na literatura especializada a respeito de como deve ser a combinação ótima entre os insumos naturais e não naturais, qual a relação entre eles e qual função de produção utilizar. Para a versão da economia tradicional (Economia Ambiental), capital e trabalho podem substituir recursos naturais, e, portanto, os limites impostos pela indisponibilidade destes podem ser superados pelo progresso técnico (SOLOW, 1986; STIGLITZ, 1974; HARTWICK, 1990). De forma contrária, para os economistas ecológicos, as dimensões econômicas dependem dos limites ecossistêmicos. Segundo eles, existe uma relação complementar entre o ecossistema e a economia, revelando a necessidade de se estabelecer uma escala ótima de produção, que levaria a uma escala ótima de utilização dos recursos naturais. Assim, o progresso tecnológico é importante para aumentar a eficiência na

utilização dos recursos naturais, tanto os renováveis como os não renováveis, mas não suficiente para a existência de substituição entre capital, trabalho e recursos naturais sempre que necessário. Capital e recursos naturais são, na verdade, considerados como fatores complementares (usados conjuntamente) para essa corrente de pensamento (DALY; FARLEY, 2004; ANDRADE; ROMERO, 2011; SACHS, 2007).

A respeito dos aspectos ambientais na produção, Solow (1986) e Stiglitz (1974) mostraram, pela função Cobb-Douglas (pressupõe substitutibilidade entre os fatores produtivos), não haver indícios de que o crescimento econômico afete negativamente o meio ambiente ao ponto da sua escassez. Solow (1986) mostrou que se a taxa de crescimento do progresso tecnológico for superior à taxa de degradação ambiental, as economias convergiriam à trajetória de crescimento econômico equilibrado mesmo em baixos níveis de recursos naturais. Outra ferramenta que reduziria substancialmente o consumo dos recursos naturais, segundo Hotelling (1931), seria o mecanismo de preço, que aumentaria cada vez mais com o uso do fator ambiental.

É importante salientar que alguns estudos aplicados recentes como os de Grossman e Krueger (1995), Selden e Song (1994), Chintrakarn e Millimet (2005), Leimbach e Baumstark (2010) chegam à mesma conclusão dos trabalhos de Solow e Stiglitz. Os principais motivos citados para a redução do desgaste dos recursos naturais estão relacionados à mudança na legislação, ao comportamento dos consumidores e ao uso de tecnologias mais limpas.

Mas e se os recursos naturais e não naturais não forem substitutos como afirmam os economistas ambientais? Em resposta negativa, quais os efeitos econômicos, ambientais e sociais? Embora sejam perguntas cruciais para o bem estar social, ainda estão longe de uma resposta definitiva.

Neste contexto, este estudo procura identificar em que medida existe substitutibilidade entre os insumos produtivos. Para isso, utilizou-se um modelo onde as eficiências individuais dos insumos são incorporadas como parâmetros e os parâmetros de substitutibilidade são flexibilizados por meio da estimação de uma função de produção CES para as 80 maiores economias no mundo no ano de 2008. Essa é uma inovação importante, pois a estimação foi feita deixando os parâmetros livres para variarem e, assim, captar melhor o grau de substituição entre os insumos

selecionados. O mesmo não ocorre em modelos que utilizam função de produção do tipo Cobb-Douglas. Além disso, o presente trabalho incorporou ao modelo de Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) a eficiência do insumo capital como um parâmetro importante de análise.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo geral**

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o grau de substituição dos insumos capital, trabalho e energia para as 80 maiores economias do mundo no ano de 2008.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

Especificamente, pretendeu-se:

- (i) Construir um indicador de utilização do insumo energético;
- (ii) Estimar as eficiências individuais dos fatores de produção;
- (iii) Estimar as elasticidades de substituição geral e parcial dos insumos;
- (iv) Verificar se o modelo CES é mais adequado que o Cobb-Douglas para analisar o grau de substitutibilidade entre os insumos produtivos;
- (v) Estimar o impacto dos insumos sobre o Produto Interno Bruto (PIB);

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. A Economia Ambiental na perspectiva neoclássica: uma breve leitura do modelo de crescimento econômico de Solow

A ciência econômica sempre promoveu grandes debates que ficaram marcados ao longo do tempo. Do ponto de vista teórico, esses debates quase sempre aprofundam a questão da racionalidade como pressuposto básico para se levar à maximização do bem estar, seja ele individual ou em nível de nações. Uma discussão importante que surgiu no último século foi aquela que diz respeito à gestão ideal dos estoques de recursos naturais. Em outras palavras, o comportamento econômico, até então considerado racional, foi questionado devido a falhas na provisão de bens públicos, principalmente no que diz respeito ao meio ambiente.

Segundo Romer (2006), os recursos naturais, a poluição e outras considerações acerca do meio ambiente estiveram ausentes da maioria dos estudos em economia, embora a quantidade dos insumos naturais seja claramente fixa devido à limitação da extensão territorial. Isso implica que o aumento perpétuo do produto econômico dos países eventualmente acabaria por esgotar esses recursos. Do ponto de vista econômico, se a oferta de recursos naturais for realmente limitada, como no caso dos combustíveis fósseis, então, o consumo em demasia desses recursos provavelmente limitará a produção de bens e serviços das nações em algum instante no futuro.

Hotelling (1931) propôs, em meados da década de 1930, uma remuneração baseada na taxa de utilização dos recursos naturais. Essa taxa aumentaria em uma proporção exponencial com o uso dos recursos. Nessa ótica, o preço seria o

mecanismo mais eficiente para levar o consumo dos bens naturais a um patamar aceitável e ao equilíbrio econômico-sustentável de longo prazo.

O estudo de Hotelling (1931) embasou trabalhos futuros como Solow (1974, 1986), Stiglitz (1974) e Georgescu e Roegen (1986). Na linha da teoria neoclássica, Solow (1974) argumenta que o custo de oportunidade de utilização dos recursos naturais seria a taxa básica de juros de mercado. Dessa forma, a utilização dos recursos naturais se equilibraria quando o valor pago pela utilização dos mesmos atingisse o nível da taxa de juros.

Para estender a análise da utilização dos recursos naturais, Solow (1986) utilizou uma função desenvolvida primeiramente por Knut Wicksell (1901) no início do século XX, onde a remuneração dos fatores produtivos correspondia sistematicamente às suas respectivas produtividades marginais. Décadas depois, essa função foi aperfeiçoada por Cobb-Douglas (1928) e, em homenagem aos autores, denominada função de produção Cobb-Douglas (KLUMP; GRANDVILLE, 2000).

O modelo econômico de Solow (1957) centra-se nas propriedades da função mencionada anteriormente, e uma das mais relevantes é a propriedade de retornos constantes de escala. Para Solow (1986), a economia é grande o suficiente para que os ganhos de especialização dos fatores fossem exauridos. A formulação geral dessa função pode ser descrita de acordo com a expressão (1).

$$y(t) = K(t)^\alpha R(t)^\beta T(t)^\gamma [A(t)L(t)]^{1-\alpha-\beta-\gamma} \quad (1)$$

em que  $y(t)$  é o produto em função do tempo;  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ ,  $\gamma > 0$ ,  $\alpha + \beta + \gamma \leq 1$  são os parâmetros distribucionais, e  $K(t)$ ,  $R(t)$ ,  $T(t)$ ,  $A(t)L(t)$  são os estoques de capital, os recursos naturais, a quantidade disponível de terra e o trabalho em sua forma eficiente<sup>2</sup>, respectivamente, em função do tempo. A variação do capital no tempo pode ser descrita por  $\dot{K}(t) = sY(t) - \delta K(t)$ , em que  $sY(t)$  é a proporção da produção poupada e  $\delta K(t)$  a parcela depreciada do capital. A taxa de crescimento do

---

<sup>2</sup>O trabalho em sua forma eficiente (*Effectiveness of Labor*) é uma denominação proposta por Solow (1957) para justificar a multiplicação entre a variável referente ao trabalho e a variável referente ao fator tecnológico. Outras duas denominações propostas são a *Labor-Augmenting* e a *Harrod-Neutral* (ROMER, 2006).

trabalho e do avanço tecnológico são representadas por  $n$  e  $g$ , respectivamente. Nesse modelo, a quantidade do fator terra é fixa, por isso a sua taxa de crescimento é zero.

Como a tendência dos recursos naturais é de declinar com o seu uso, pode-se assumir que:

$$\dot{R}(t) = -bR(t) \quad (2)$$

em que  $\dot{R}(t)$  é a variação dos recursos naturais no tempo;  $b$ , o parâmetro que indica a velocidade do desgaste dos recursos naturais; e  $R(t)$ , que representa o estoque de recursos naturais. A presença dos fatores produtivos relacionados ao meio ambiente na função de produção faz com que a convergência do fator estoque de capital por unidade de trabalho efetivo não se realize por diferenciação direta. A estratégia utilizada por Solow (1986) foi logaritmizar a expressão (1) de ambos os lados e diferenciá-la no tempo, conforme as expressões (3a) e (3b).

$$\ln Y(t) = \alpha \ln K(t) + \beta \ln R(t) + \gamma \ln T(t) + (1 - \alpha - \beta - \gamma)[\ln A(t) + \ln L(t)] \quad (3a)$$

$$Gy(t) = \alpha Gk(t) + \beta Gr(t) + \gamma Gt(t) + (1 - \alpha - \beta - \gamma)[Ga(t) + Gl(t)] \quad (3b)$$

em que  $Gy(t)$  representa a taxa de crescimento do produto;  $Gk(t)$ , a taxa de crescimento do capital;  $Gr(t)$ , a taxa de crescimento dos recursos naturais (que é negativa);  $Gt(t)$ , a taxa de crescimento da terra (que é zero);  $Ga(t)$ , a taxa de crescimento do avanço tecnológico; e  $Gl(t)$ , a taxa de crescimento da força de trabalho. Após conhecidas as taxas de crescimento dos recursos naturais ( $-b$ ), da terra (zero), do progresso tecnológico ( $g$ ) e da mão de obra ( $n$ ), pode-se simplificar a expressão (3b) conforme expressão (4).

$$Gy(t) = \alpha Gk(t) - \beta b + (1 - \alpha - \beta - \gamma)(n + g) \quad (4)$$

Assumindo que as taxas de crescimento do capital ( $Gk(t)$ ) e do produto ( $Gy(t)$ ) sejam iguais quando a economia está em uma taxa de crescimento equilibrada e resolvendo a expressão (4) para  $Gy(t)$ , tem-se a expressão (5).



$$Gy(t) = \frac{(1 - \alpha - \beta - \gamma)(n + g) - \beta b}{1 - \alpha} \quad (5)$$

Então, se a taxa de crescimento do estoque de capital converge à sua taxa de crescimento equilibrado, a economia converge para o equilíbrio de longo prazo. A expressão (5) implica que o crescimento do produto por unidade de trabalho efetivo possa ser denotado por:

$$G_{Y/L} = G_Y - G_L \quad (6a)$$

$$G_{Y/L} = \frac{(1 - \alpha - \beta - \gamma)(n + g) - \beta b}{1 - \alpha} - n \quad (6b)$$

$$G_{Y/L} = \frac{(1 - \alpha - \beta - \gamma)g - \beta b - (\beta + \gamma)n}{1 - \alpha} \quad (6c)$$

Pode-se concluir, então, que o crescimento da renda *per capita* no equilíbrio do modelo de Solow (1986) pode ser tanto positivo quanto negativo. O que vai de fato determinar o equilíbrio é a taxa de consumo dos recursos naturais, juntamente com a taxa de utilização da terra. Entretanto, Solow (1986) afirma que o progresso tecnológico é um estímulo ao crescimento econômico. Assim, se o efeito do fator tecnológico for maior que a taxa de consumo dos fatores ligados ao meio ambiente, o crescimento econômico pode ser sustentável.

Contudo, mesmo que a tecnologia seja avançada o suficiente para superar a taxa de desgaste dos fatores ambientais, a limitação dos recursos naturais e da terra pode eventualmente se tornar um importante problema para o processo produtivo. A razão para esse fator não ser evidente em Solow (1986) é a utilização da função Cobb-Douglas, pois uma mudança percentual positiva no progresso técnico altera a produção independentemente do valor relativo das taxas de desgaste dos recursos naturais (ROMER, 2006). Como resultado, a tecnologia no modelo de Solow (1986) pode contrabalancear a degradação *per capita* dos fatores ambientais.

Segundo Romer (2006), se a elasticidade de substituição entre os insumos for diferente da unidade, os resultados de convergência podem ser diferentes dos citados no modelo de Solow (1986). Por exemplo, se a elasticidade de substituição for inferior

à unidade, então, no longo prazo, a oferta limitada de fatores ambientais fará com que os rendimentos das economias declinem significativamente. Entretanto, se a parte da produção destinada aos fatores ambientais estiver diminuindo ao longo do tempo, isso sugere que a elasticidade de substituição entre os insumos seja maior que a unidade.

Na maioria dos estudos econômicos, os teóricos aceitam os pressupostos da função Cobb-Douglas – inclusive o de substitutibilidade entre os insumos produtivos – pela sua simplificação matemática e analítica. Contudo, as ideias formadas a partir dessa função, embora atraentes, levam a conclusões restritas. As evidências empíricas sugerem diferentes graus de elasticidade de substituição entre os insumos. Na verdade, é quase improvável verificar empiricamente um grau estritamente unitário entre dois insumos de produção, quando esse existir plenamente (ARROW *et al.*, 1961).

Assim, uma forma alternativa ao modelo de Solow (1986) é a função *Constant Elasticity of Substitution* (CES), conforme apresenta-se adiante. Nesse modelo, a hipótese do grau de substitutibilidade entre os fatores produtivos, dentre outras hipóteses, pode ser averiguada.

## 2.2 A abordagem da função *Constant Elasticity of Substitution* (CES) e a elasticidade de substituição

Solow (1957) mostrou que pela função de produção Cobb-Douglas as economias possuiriam um comportamento de equilíbrio no longo prazo. No entanto, a função Cobb-Douglas nada mais é que uma forma específica da função de produção descrita pela expressão (7).

$$Y = [\alpha K^{-\rho} + (1 - \alpha)L^{-\rho}]^{-1/\rho} \quad (7)$$

em que  $Y$ ,  $K$  e  $L$  são o produto e os fatores de produção, capital e trabalho, respectivamente;  $\alpha$  e  $(1 - \alpha)$  são os parâmetros distribucionais; e  $\rho$  é o parâmetro de substituição. A expressão (7), conhecida como CES, descreve a forma geral da relação de dois fatores produtivos, em que a soma dos coeficientes  $\alpha$  e  $(1 - \alpha)$  no modelo de Solow (1957) indica, grosso modo, os retornos à escala. Entretanto, a grande diferença

entre as funções CES e Cobb-Douglas é que a primeira não supõe *a priori* que o comportamento dos fatores produtivos garanta que a elasticidade de substituição seja igual à unidade (MAS-COLLEL *et al.*, 1995).

A função CES pode assumir a forma de outras funções de produção dependendo dos valores do parâmetro  $\rho$ . Para definir o tipo de tecnologia no caso de dois insumos, a razão entre a derivada do produto em relação ao trabalho, e a derivada da produção em relação ao capital fornece a expressão (8).

$$\frac{(dY/dL)}{(dY/dK)} = \frac{\left(-\frac{1}{\rho}\right) [\alpha K^{-\rho} + (1-\alpha)L^{-\rho}]^{-\left(\frac{1}{\rho}\right)-1} (-\rho)(1-\alpha)L^{-\rho-1}}{\left(-\frac{1}{\rho}\right) [\alpha K^{-\rho} + (1-\alpha)L^{-\rho}]^{-\left(\frac{1}{\rho}\right)-1} (-\rho)(\alpha)K^{-\rho-1}} \quad (8)$$

(8) pode ser descrita como a Taxa Marginal de Substituição Técnica (TMST) entre os fatores  $L$  e  $K$ . Esta taxa pode ser simplificada e representada pela expressão (9).

$$TMST = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) \left(\frac{L}{K}\right)^{-\rho-1} \quad (9)$$

Ao se resolver a expressão (9) para a razão  $(K/L)$ , pode-se converter a relação inicial em estoque de capital ( $K$ ) por unidades de trabalho ( $L$ ), conforme a expressão (10).

$$\frac{K}{L} = \left[\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) (TMST)\right]^{\frac{1}{1+\rho}} \quad (10)$$

A expressão acima pode ser linearizada e representada pelas expressões (11a) e (11b).

$$\ln\left(\frac{K}{L}\right) = \ln\left\{\left[\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) (TMST)\right]^{\frac{1}{1+\rho}}\right\} \quad (11a)$$

$$\ln\left(\frac{K}{L}\right) = \frac{1}{1+\rho} \ln\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) + \frac{1}{1+\rho} \ln(TMST) \quad (11b)$$

Por fim, o logaritmo da razão entre os insumos na CES pode ser definido pela expressão (12a).

$$\ln\left(\frac{K}{L}\right) = \varphi + \frac{1}{1+\rho} \ln(TMST) \quad (12a)$$

em que  $\varphi = [1/(1+\rho)\ln(\alpha/1-\alpha)]$ . A derivada da função logarítmica da razão do capital por unidade de trabalho em relação ao logaritmo da TMST fornece a elasticidade de substituição dos fatores produtivos – capital e trabalho (expressão 12b).

$$\sigma = \frac{d\ln(K/L)}{d\ln(TMST)} = \frac{1}{1+\rho} \quad (12b)$$

em que  $\sigma$  é a elasticidade de substituição entre os insumos.

### 2.2.1. A elasticidade de substituição na tecnologia Cobb-Douglas

A função Cobb-Douglas é um caso específico da função CES utilizada para representar a quantidade produzida de um bem dada uma unidade de cada insumo envolvido no processo produtivo. A formulação geral da Cobb-Douglas é dada pela expressão (13):

$$Y = A[K^\alpha L^{1-\alpha}] \quad (13)$$

O  $Y$  representa o bem produzido;  $A$ , a escala de produção;  $K$ , os bens de capital;  $L$ , o trabalho; e  $\alpha$  e  $1-\alpha$  as proporções dos fatores de produção,  $K$  e  $L$ . A elasticidade de substituição pode ser calculada a partir da TMST entre  $L$  e  $K$ :

$$TMST = \frac{(dY/dL)}{(dY/dK)} = \frac{AK^\alpha(1-\alpha)L^{1-\alpha-1}}{A\alpha K^{\alpha-1}L^{1-\alpha}} \quad (14a)$$

$$TMST = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\frac{K}{L} \quad (14b)$$

$$TMST \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) = \frac{K}{L} \quad (14c)$$

Após a expressão (14c) ser linearizada de ambos os lados e reorganizada, temos a seguinte expressão:

$$\ln\left(\frac{K}{L}\right) = \varphi + \ln(TMST) \quad (15a)$$

onde  $\varphi = \ln(\alpha/1-\alpha)$ . Pela expressão (15b) a seguir, pode-se provar que a elasticidade de substituição entre os insumos na função Cobb-Douglas, que é a derivada do logaritmo da razão entre capital e trabalho em relação ao logaritmo da TMST, é unitária.

$$\sigma = \frac{d\ln(K/L)}{d\ln(TMST)} = 1 \quad (15b)$$

Portanto, se  $\rho \rightarrow 0$  na expressão (12b), a elasticidade de substituição tende para um, que representa a relação encontrada na função Cobb-Douglas. Nesse caso, os insumos são substitutos imperfeitos, pois embora exista substitutibilidade entre os fatores de produção, para produzir uma unidade de um bem, é necessário combinar quantidades positivas dos insumos. Não obstante, assume-se que a troca entre  $K$  e  $L$ , por exemplo, seja factível.

### 2.2.2. A elasticidade de substituição na tecnologia Leontief

A função Leontief, também conhecida como tecnologia de proporções fixas, é outro caso específico da função CES onde assume-se que a produção apenas varia se

ambos os insumos variarem na mesma proporção. A expressão (16) descreve a função Leontief:

$$Y = \min\{\alpha K, (1 - \alpha)L\} \quad (16)$$

Por serem insumos complementares no processo produtivo, assume-se a impossibilidade de haver trocas entre eles. Portanto, se  $\rho \rightarrow \infty$  em (12b), a elasticidade de substituição tende para zero e a função CES converge para uma Leontief, onde se relacionam proporções mínimas entre os fatores de produção.

### 2.2.3. A elasticidade de substituição na tecnologia Linear

A função linear, por sua vez, trata-se da representação teórica de uma função de produção onde os insumos são considerados substitutos perfeitos. Neste caso, se o parâmetro de substituição  $\rho$  tender para  $-1$  na expressão (7) a função CES converge para a expressão (17b):

$$\lim_{\rho \rightarrow -1}([\alpha K^{-\rho} + (1 - \alpha)L^{-\rho}]^{-1/\rho}) = [\alpha K^1 + (1 - \alpha)L^1]^{1/1} \quad (17a)$$

$$Y = \alpha K + (1 - \alpha)L \quad (17b)$$

Pela expressão (12b), a elasticidade de substituição da função linear tende para o infinito. Portanto, a função de produção linear admite a possibilidade de que haja perfeita mobilização entre os insumos no processo produtivo.

## 2.3. Elasticidade de substituição do capital, trabalho e recursos naturais: teoria e aplicação

A Taxa Marginal de Substituição Técnica (TMST) possui um importante papel na teoria microeconômica, pois, a partir dela, pode-se medir a inclinação de uma isoquanta e a combinação eficiente dos fatores de produção. A elasticidade de substituição, nesse contexto, mede a curvatura de uma isoquanta. Em linhas gerais, ela mensura a variação percentual da razão dos fatores sobre a mudança percentual na

TMST, com o produto total mantido constante. Se uma pequena mudança na curvatura provoca uma grande alteração na razão dos insumos, a isoquanta é relativamente plana e a elasticidade de substituição é relativamente alta (VARIAN, 1992).

Apesar de serem ferramentas típicas do ramo microeconômico, não é incomum estudos utilizarem esse ferramental em assuntos que abordam o crescimento econômico. Na realidade, os que não aceitam plenamente os pressupostos de substitutibilidade unitária, discutidos em Solow (1986), passam a investigar com mais veemência a relação entre os insumos produtivos por meio de funções que flexibilizam o grau de substitutibilidade, como a CES.

Arrow *et al.* (1961), por exemplo, mostram que as elasticidades de substituição entre os insumos, capital e trabalho, para diferentes tipos de indústrias, podem ser diferentes da unidade e até mesmo diferentes entre si. Especificamente para a amostra de países utilizados no estudo citado, a elasticidade de substituição entre capital e trabalho foi menor que a unidade. Muitos outros estudos utilizam abordagens semelhantes para averiguar o comportamento dos fatores produtivos (GROWIEC, 2011; AHAMED, 1980, RAO; SHANKAR, 2011). Mas ainda assim, são poucos os que reconhecem a importância dos recursos naturais como insumos do processo produtivo.

Nesse sentido, cabe ressaltar Rosenstein (1980), que utilizou uma função de custo *translog* para várias indústrias americanas. O objetivo central dessa análise foi explorar efetivamente o grau de substituição entre os fatores de produção, incluindo os recursos naturais. Segundo o autor, a atividade econômica altera a elasticidade de substituição entre os insumos, e esta última muda significativamente os parâmetros da função de custos.

Em um estudo mais recente, Kemfert (1998) demonstrou econometricamente as elasticidades parciais de substituição entre capital e energia, capital e trabalho, e trabalho e energia para a indústria alemã. Em suma, as elasticidades parciais mostram a relação dos próprios insumos dentro da estrutura de produção. Para dois insumos, a elasticidade parcial de substituição é a própria elasticidade de substituição. Já para três insumos, a elasticidade parcial mostra a relação de dois insumos, mantendo o insumo restante constante.

Os principais resultados encontrados por Kemfert (1998) mostram que todos os insumos são empiricamente substitutos para a indústria alemã, inclusive os fatores energia e capital. A relação mais forte de substitutibilidade encontrada foi entre o capital e o trabalho. No entanto, tanto a relação energia-capital quanto a relação energia-trabalho mostraram-se inferiores à unidade.

Diferentemente do estudo supracitado, para a indústria americana Berndt e Wood (1975) afirmam haver indícios de que os fatores de produção relacionados aos recursos naturais e ao capital sejam complementares, e não substitutos. Ou seja, a elasticidade de substituição entre energia e capital na indústria americana, segundo os autores, está próxima de zero.

Essa controvérsia leva a crer que adotar uma função restritiva como a Cobb-Douglas para descrever o comportamento econômico de uma nação seja uma atitude equivocada. Afirmar substitutibilidade unitária entre os insumos nem sempre – ou quase nunca – corresponde à realidade empírica observada, seja porque embora os insumos analisados sejam realmente substitutos, a elasticidade de substituição apresente valores menores que a unidade, ou porque simplesmente os insumos nem substitutos sejam em determinados contextos, como no caso de Berndt e Wood (1975).

Existem outros trabalhos que consideram os recursos naturais como parte fundamental do processo produtivo. Além disso, esses recursos são considerados também essenciais para quaisquer políticas que têm por objetivo o melhoramento do bem estar social. O Quadro 1 levanta os principais aspectos dos estudos mais relevantes sobre o crescimento econômico que utilizam, de alguma forma, a elasticidade de substituição como ferramenta de compreensão do relacionamento entre os fatores produtivos e incorporam, concomitantemente, o fator referente aos recursos naturais na produção.



Autor(es), ano	Contexto	Objetivos	Modelo utilizado /Proxy para recursos naturais	Resultados	Conclusão
<b>Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005)</b>	Modelo teórico de calibragem dos parâmetros.	Criar um modelo de investimento e desenvolvimento tecnológico (MIND).	Função de produção CES.  Combustíveis fósseis, energias renováveis, energia elétrica, alternativas e nucleares.	A mudança tecnológica reduz os custos de proteção do meio ambiente. É necessário criar um portfólio de investimentos baseados em combustíveis renováveis.	No longo prazo, os combustíveis fósseis terão de ser substituídos por fontes de energia renovável.
<b>Bretschger e Smulder (2003)</b>	Análise do setor de Pesquisa & Desenvolvimento.	Analisar o comportamento econômico de longo prazo considerando a escassez dos recursos naturais.	Modelo de crescimento endógeno.  Recursos naturais não renováveis.	O crescimento ilimitado pode ser sustentável mesmo se a elasticidade de substituição entre os recursos naturais e o capital for baixa.	No longo prazo, uma taxa de consumo positiva é factível se a substituição entre o setor de P&D e os demais setores normais for grande.
<b>Kemfert (1998)</b>	Sete setores da indústria alemã, 1960-1993.	Estimar a elasticidade de substituição entre capital, trabalho e recursos naturais.	Regressão não linear nos parâmetros.  Consumo de energia.	Todos os insumos de produção foram considerados substitutos pela abordagem, inclusive o capital e os recursos naturais.	Não existe relação de complementaridade entre os insumos, e sim de substitutibilidade.
<b>Solow (1986)</b>	Desenvolvimento teórico da função de produção incluindo recursos naturais.	Encontrar a trajetória de crescimento de longo prazo incorporando os recursos naturais como fator produtivo.	Modelo de crescimento neoclássico.  Recursos naturais e as terras disponíveis.	As taxas de utilização dos recursos naturais e da terra que definirão a convergência do produto no longo prazo.	Como a elasticidade de substituição é unitária, a taxa de crescimento da tecnologia pode contrabalancear o desgaste do meio ambiente.
<b>Rosenstein (1980)</b>	298 indústrias de manufatura nos Estados Unidos, 1972-1976.	Analisar os efeitos econômicos sobre a elasticidade de substituição entre os insumos produtivos.	Função <i>translog</i> de custo.  Preço da energia.	Ocorreu uma mudança significativa na função de custo entre os anos da pesquisa.	Essa mudança foi atribuída a uma tecnologia com alta elasticidade de substituição entre os insumos.
<b>Berndt e Wood (1975)</b>	Indústrias de manufatura dos Estados Unidos.	Estimar a elasticidade de substituição entre os insumos produtivos.	Função <i>translog</i> de custo.  Preço da energia.	Um aumento no preço da energia reduz a demanda por energia e por capital.	Energia e trabalho são substitutos, enquanto que energia e capital são complementares.

Quadro 1: Estudos teóricos e empíricos

Fonte: Elaboração própria

#### **2.4. Incorporando parâmetros de eficiência: o modelo empírico de EDENHOFER-BAUER-KRIEGLER (2005)**

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

A formulação teórica baseia-se no modelo de Investimento e de Desenvolvimento Tecnológico (MIND) que permite analisar a relação entre diferentes medidas de preservação do meio ambiente e os custos de utilização de políticas específicas para esse fim, principalmente aquelas voltadas para o cuidado com o clima. Embora o capital seja de suma importância para o avanço tecnológico dos fatores produtivos, segundo os autores, a maioria dos modelos econômicos, por simplicidade, não aborda efetivamente essa relação com o meio ambiente, como os de aplicação Cobb-Douglas.

Dessa forma, o modelo MIND, baseado na função CES, proporciona a avaliação da mudança tecnológica nos fatores produtivos ao incorporá-los em sua forma eficiente. A função de produção assume que a elasticidade de substituição entre os três fatores seja constante. Não obstante, segundo Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005), a função Cobb-Douglas não seria apropriada para analisar os aspectos macroeconômicos quando incorporado o fator ligado ao meio ambiente, uma vez que assume-se implicitamente substitutibilidade unitária entre o estoque de capital e os recursos naturais.

A oferta de energia, *proxy* do meio ambiente, é dividida em combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), energias renováveis (eólica, biomassa, solar e energia térmica) e energias não fósseis (energia nuclear, biomassa tradicional e energia hidroelétrica). Em geral, a oferta e a demanda por energia são *proxies* comumente utilizadas em estudos empíricos que abordam os recursos naturais, senão o próprio meio ambiente (FILIPPINI; HUNT, 2010; BERNDT; WOOD, 1975).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia desse estudo se divide em três seções principais. A primeira delas diz respeito à aplicação da análise de eficiência dos fatores produtivos, utilizando-se da Análise Envoltória de Dados. Em seguida, criou-se o indicador do fator ambiental pela análise fatorial. Por fim, analisou-se a contribuição dos insumos produtivos e as respectivas elasticidades de substituição pelo Modelo de Regressão Não Linear.

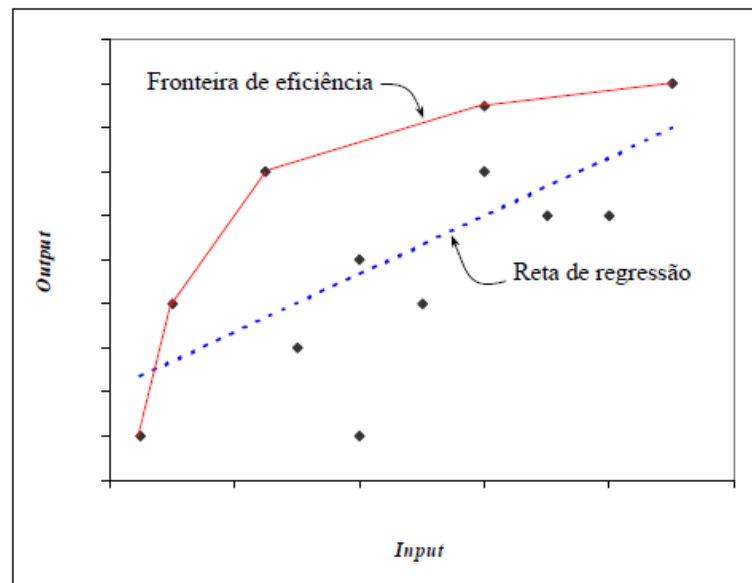
#### 3.1. Eficiência técnica dos fatores de produção

Um dos principais objetivos da teoria econômica, especificamente a teoria microeconômica, é gerir os recursos com eficiência. No caso das firmas como unidades de análise, a eficiência se dá pela fronteira de possibilidade de produção, em que é considerada eficiente a dotação dos insumos produtivos que a tangencia. Assim, uma forma de analisar a eficiência dos insumos produtivos é estimar essa fronteira (VARIAN, 1992).

A literatura econômica apresenta modelos que são paramétricos, do qual existe relação funcional entre os recursos e os produtos, e os não paramétricos, onde se otimiza uma fronteira de produção a partir do princípio de eficiência de Pareto<sup>3</sup> (MELLO *et al.*, 2005). A Figura 1 apresenta a visualização gráfica dos dois modelos.

---

<sup>3</sup> Contexto onde os insumos produtivos são alocados de maneira que nenhuma reordenação diferente possa melhorar a situação dos agentes envolvidos sem afetar negativamente outros agentes (SANDRONI, 2005).



Fonte: Mello *et al.* (2005)

Figura 1: Modelo paramétrico (fronteira de eficiência) e modelo não paramétrico (reta de regressão)

Neste estudo, o procedimento metodológico relacionado à eficiência técnica dos fatores produtivos consiste na criação de um escore de eficiência relativo entre os países, aqui denominados Unidades Tomadoras de Decisões (*Decision Making Units – DMU*), que mensura a eficiência técnica do capital, do trabalho e dos recursos naturais.

Para estimar os parâmetros de eficiência dos fatores produtivos, utiliza-se a técnica Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis – DEA*), que permite a construção de fronteiras de produção não estocásticas a partir de combinações lineares por determinadas funções matemáticas (VAZ; CAMANHO, 2011).

Utiliza-se as médias dos escores de eficiência com retornos variáveis de cada insumo como uma constante multiplicativa dos fatores de produção. Essa multiplicação permite criar novas variáveis a partir das variáveis originalmente observadas, considerando a eficiência individual da utilização do capital, do trabalho e dos recursos naturais.

As análises de eficiência podem ser feitas a partir de duas orientações principais: *input*, cujo objetivo é minimizar os insumos e manter o produto constante; ou *output*, cujo objetivo é maximizar o produto mantendo os insumos constantes.

Neste estudo, utiliza-se a orientação *input* para o fator ambiental<sup>4</sup> e para o capital<sup>5</sup>. Para o fator trabalho, utiliza-se a orientação *output*<sup>6</sup> (GOMES; BAPTISTA, 2004). O *software* utilizado foi o *DEA Frontier*, versão 2007.

### 3.2. Construção do indicador dos recursos naturais

Indicadores são frequentemente utilizados a fim de avaliar o desempenho das nações, uma vez que resumem um conjunto de dados relevantes acerca dos aspectos relativos ao sistema econômico. Tornam-se importantes para identificar variações, comportamentos, tendências, além de viabilizar o acesso às informações em escalas que podem ser comparáveis. (MINGOTI, 2007; SOARES *et al.*, 2011).

O procedimento metodológico utilizado neste estudo consiste em criar um indicador para o fator de produção ambiental que incorpore de maneira significativa as principais dimensões analíticas dos recursos naturais. A técnica utilizada neste estudo é a análise fatorial, que tem o objetivo de descrever o comportamento de um conjunto de dados através de um número reduzido de variáveis (fatores). Para estimar os fatores, utiliza-se o método de componentes principais, que visa explicar a variância e a covariância de um vetor aleatório através da combinação linear das variáveis originais.

Para testar a qualidade da análise fatorial, utiliza-se os testes de Kaiser-Meyer-Orkin (KMO), MSA (*Mensure of Sampling Adequacy*) e de Esfericidade de Bartlett, conforme Mingoti (2007). O primeiro trata-se de um indicador que varia entre os intervalos (0,1) e considera os coeficientes de correlação simples e parcial entre as variáveis. Se o valor observado for igual à unidade, os dados se adéquam perfeitamente à análise fatorial. Se for zero, a análise fatorial não pode ser considerada um bom método de agrupamento. Segundo Mingoti (2007), o limite mínimo de utilização da análise fatorial consiste em valores próximos a 0,5. O MSA é um índice

---

<sup>4</sup> Opta-se pela orientação *input* ao fator ambiental, pois o objetivo primordial nessa análise é minimizar o uso dos recursos ambientais, mantendo o produto econômico das nações constante.

<sup>5</sup> Opta-se pela orientação *input* ao fator capital, pois o objetivo central dessa análise é o gerenciamento eficiente dos recursos disponíveis.

<sup>6</sup> Opta-se pela orientação *output* ao fator relacionado ao trabalho, pois a mão de obra disponível das nações é relativamente mais rígida que o produto gerado.

semelhante ao KMO, no entanto, ele é utilizado para averiguar a adequabilidade individual da variável embutida no modelo. Já o teste de Esfericidade de Bartlett verifica com base na distribuição “qui-quadrado” se a matriz de correlações entre as variáveis é uma matriz identidade (hipótese nula), ou seja, se existe correlação entre as variáveis.

A escolha da quantidade de fatores é baseada no valor das raízes características e na variação explicada por elas. Se a raiz característica for maior que a unidade e/ou explicar mais de 70% da variação dos dados, escolhe-se esse fator na formação do indicador, conforme visto em Mingoti (2007). O indicador ambiental é formado pela raiz quadrada do somatório dos fatores ao quadrado, conforme a expressão (18a).

$$IND_n = \left( \sum_{i=1}^j F_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18a)$$

em que  $IND_n$  é o indicador ambiental para a n-ésima nação.  $F_i$  são os escores fatoriais estimados pelo método de componentes principais. Os pesos das variáveis incluídas no Índice do Fator Ambiental (expressão 18b) são dados pela importância relativa de cada variável no indicador ambiental (expressão 18a) (regressão por Mínimos Quadrados Ordinários – MQO – do indicador ambiental contra as variáveis padronizadas pela distribuição normal). É importante ressaltar que para adequar os resultados em um intervalo entre (0,1), aplica-se o procedimento descrito em (18b).

$$IFA_n = \frac{(X_i - M_{min})}{(M_{max} - M_{min})} \quad (18b)$$

em que  $IFA_n$  é o Índice do Fator Ambiental;  $X_i$ , o valor observado do indicador ambiental (IND) em (18a);  $M_{min}$ , o valor mínimo; e  $M_{max}$  o valor máximo. O software utilizado foi o *Data Analysis and Statistical Software* (Stata), versão 12.

### 3.3. Estimação do crescimento econômico via modelos não lineares

Conforme visto nas ideias expressas nas seções anteriores, descrever o comportamento do produto a partir da função de produção Cobb-Douglas pode ser uma atitude relativamente equivocada, uma vez que assumir substitutibilidade entre os insumos de produção nem sempre corresponde à realidade observada. E em se tratando da inclusão dos recursos naturais como insumos de produção, os resultados finais podem levar a interpretações ainda mais errôneas (e até dogmáticas, o que pode ser ainda pior).

O certo é que os pressupostos assumidos para os valores da elasticidade de substituição são de suma importância para o crescimento econômico e para o bem estar da sociedade. E, sendo isso verdade, tornam-se essenciais funções que flexibilizam o parâmetro da elasticidade de substituição (como a função CES descrita em Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005), Kemfert (1998), Bretschger e Smulder (2003) etc.).

Por isso, neste estudo ajustam-se quatro modelos que consideram as elasticidades de substituição parciais e geral entre o capital, o trabalho e os recursos naturais, além da eficiência individual dos insumos. A expressão (19) descreve a elasticidade de substituição geral entre os fatores de produção para uma amostra de 80 países.

$$Y_i = \Phi [\beta_K (\lambda_K K_i)^{-\rho} + \beta_L (\lambda_L L_i)^{-\rho} + (1 - \beta_K - \beta_L) (\lambda_E E_i)^{-\rho}]^{\frac{1}{-\rho}} + \varepsilon_i \quad (19)$$

em que  $Y_i$  é o Produto Interno Bruto (PIB) do país  $i$ ;  $\Phi$  é o parâmetro da Produtividade Total dos Fatores (PTF) para todos os países;  $\beta_K$ ,  $\beta_L$  e  $(1 - \beta_K - \beta_L)$  são as participações do capital, do trabalho e dos recursos naturais no produto;  $\lambda_K$ ,  $\lambda_L$  e  $\lambda_E$ , os parâmetros da eficiência do capital, do trabalho e dos recursos naturais, estimados pelo DEA, respectivamente;  $K$ ,  $L$  e  $E$  são as variáveis que representam o capital, o trabalho e a energia (*proxy* dos recursos naturais);  $\rho$  é o parâmetro de substituição geral entre os insumos; e  $\varepsilon_i$ , o termo que representa o erro aleatório.

Assume-se como pressuposto que os retornos de produção sejam constantes, conforme Kemfert (1998). A partir da expressão (19), derivam-se mais três importantes funções:

$$Y_{i_1} = \Phi_1 \left\{ \beta_1 [\alpha_1 (\lambda_K K_i)^{-\theta_1} + (1 - \alpha_1) (\lambda_E E_i)^{-\theta_1}]^{\frac{\rho_1}{\theta_1}} + (1 - \beta_1) (\lambda_L L_i)^{-\rho_1} \right\}^{\frac{1}{-\rho_1}} + \varepsilon_i \quad (20a)$$

em que  $\theta_1$  representa o parâmetro de substituição parcial entre o capital e os recursos naturais, mantendo o trabalho constante; e  $\rho_1$ , o parâmetro de substituição geral dos insumos ( $\rho$ ). Os parâmetros  $\Phi_1$ ,  $\beta_1$  e  $\alpha_1$  não possuem interpretação econômica relevante. Na expressão (20b)  $\rho_2$  representa o parâmetro de substituição geral dos insumos, que é igual a  $\rho_1$  e  $\rho$ .

$$Y_{i_2} = \Phi_2 \left\{ \beta_2 [\alpha_2 (\lambda_K K_i)^{-\theta_2} + (1 - \alpha_2) (\lambda_L L_i)^{-\theta_2}]^{\frac{\rho_2}{\theta_2}} + (1 - \beta_2) (\lambda_E E_i)^{-\rho_2} \right\}^{\frac{1}{-\rho_2}} + \varepsilon_i \quad (20b)$$

O parâmetro  $\theta_2$  representa o parâmetro de substituição parcial entre o capital e o trabalho, mantendo os recursos naturais constantes. Os demais parâmetros podem ser interpretados de maneira análoga à expressão (20a). Por fim, tem-se a expressão (20c).

$$Y_{i_3} = \Phi_3 \left\{ \beta_3 [\alpha_3 (\lambda_E E_i)^{-\theta_3} + (1 - \alpha_3) (\lambda_L L_i)^{-\theta_3}]^{\frac{\rho_3}{\theta_3}} + (1 - \beta_3) (\lambda_K K_i)^{-\rho_3} \right\}^{\frac{1}{-\rho_3}} + \varepsilon_i \quad (20c)$$

em que  $\theta_3$  representa o parâmetro de substituição parcial entre os recursos naturais e o trabalho, mantendo o capital constante.  $\rho_3$  é o parâmetro de substituição geral ( $\rho$ ). Os demais parâmetros também não possuem uma explicação econômica relevante.

As expressões (19), (20a), (20b) e (20c) descrevem o comportamento do produto  $Y_i$  como uma função não linear do capital, do trabalho e dos recursos naturais. O procedimento econométrico utilizado neste estudo para estimar os parâmetros consiste no método dos Mínimos Quadrados Ordinários Não Lineares (MQO Não Linear) por meio dos procedimentos iterativos de Gauss-Newton (SOUZA, 1998).

Segundo Gallant (1984), se não houver convergência dos parâmetros do modelo, uma maneira de verificar a solução numérica é atribuir distúrbios aos valores



iniciais. Neste estudo, a escolha dos valores iniciais dos parâmetros e das funções (19), (20a), (20b) e (20c) se baseia na teoria neoclássica descrita em Solow (1986), pois testa-se, *a priori*, se a função Cobb-Douglas é a solução numérica que descreve o comportamento das economias mundiais.

Para os intervalos de confiança dos parâmetros, supõe-se que a distribuição seja “t de Student” com  $n - p$  graus de liberdade. O teste estatístico de significância conjunta dos parâmetros é o teste de Wald e é análogo ao teste do modelo linear. Como em modelos lineares, no MQO Não linear a análise dos resíduos consiste em uma importante ferramenta para diagnosticar a qualidade do ajustamento do modelo. Para testar a violação de heterocedasticidade, a ferramenta utilizada foi o teste de Koenker-Bassett (GUJARATI, 2006). Já para detectar os possíveis *outliers*, o teste utilizado foi o teste de Grubbs (SOLAK, 2009). O software utilizado foi o *Data Analysis and Statistical Software* (Stata), versão 12. O arquivo *output* e os comandos do Stata estão apresentados no apêndice.

### 3.4. Variáveis e fonte de dados

As variáveis utilizadas para estimar os parâmetros das expressões (19), (20a), (20b) e (20c) foram obtidas no site do Banco Mundial e estão expostas na Tabela 1. As variáveis capital e recursos naturais foram baseadas em Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005). Já a escolha pela variável referente ao trabalho segue Simon e Michael (2012).

A variável ambiental, ou Índice do Fator Ambiental, foi construída a partir da quantidade utilizada de energias alternativas e nucleares, energias renováveis, energias de combustíveis fósseis e energia elétrica. A variável referente ao trabalho corresponde à população economicamente ativa, que é composta pelos indivíduos acima de 15 anos de idade que ofertam sua força de trabalho para a produção de bens e serviços (inclui tanto os empregados quanto os desempregados). A variável capital incorpora a Formação Bruta de Capital Fixo (FBCF), que inclui o investimento realizado anteriormente e os gastos para a adição dos ativos fixos, como o melhoramento da infraestrutura. O produto da economia é baseado no Produto Interno Bruto (PIB) em

dólares correntes dos Estados Unidos, a partir das taxas de câmbio oficiais (*WORLD BANK*, 2008). A Tabela 1 apresenta as variáveis utilizadas neste estudo e as unidades de medida.

Tabela 1 – Variáveis utilizadas

<b>FATOR DE PRODUÇÃO AMBIENTAL</b>		
<b>Sigla</b>	<b>Variável</b>	<b>Unidade de medida</b>
EAN	Energias Alternativas e Nucleares	Kt em unidades de petróleo
ERN	Energias Renováveis	Kt em unidades de petróleo
ECF	Energia de Combustíveis Fósseis	Kt em unidades de petróleo
EEL	Energia elétrica	Kt em unidades de petróleo
<b>FATOR DE PRODUÇÃO TRABALHO</b>		
<b>Sigla</b>	<b>Variável</b>	
PEA	População Economicamente Ativa	Por trabalhador
<b>FATOR DE PRODUÇÃO CAPITAL</b>		
<b>Sigla</b>	<b>Variável</b>	
FBCF	Formação Bruta de Capital	US\$
<b>PRODUÇÃO</b>		
<b>Sigla</b>	<b>Variável</b>	
PIB	Produto Interno Bruto	US\$

Fonte: Elaboração própria.

Os dados foram extraídos do acervo digital do Banco Mundial para o ano de 2008 no endereço eletrônico <http://data.worldbank.org/indicator>. O ano citado mostrou ser o mais recente da série de dados completos e disponíveis no sítio do Banco Mundial. No total, são analisadas as 80 maiores economias do mundo<sup>7</sup>, que, no total, representam cerca de 98% do PIB mundial para o respectivo ano<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> À exceção daquelas nações que possuem informações incompletas acerca das variáveis utilizadas neste estudo (Iran, Emirados Árabes, Nigéria, Iraque, Sérvia, Arábia Saudita, Hong Kong, Singapura, Israel, Kuwait, Catar, Líbia, Oman, Uzbequistão, Trinidad e Tobago, República do Yemen e Camarões).

<sup>8</sup> Essa proporção baseia-se nos dados disponíveis acerca do Produto Interno Bruto (PIB) das nações no ano de 2008.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção foram discutidos os principais resultados referentes à formação do fator de produção ambiental pela análise fatorial, bem como as análises de eficiência dos insumos pelo DEA. Em seguida, também foram analisados os parâmetros de substituição das funções (19), (20a), (20b) e (20c) estimados pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários Não Lineares e suas consequências econômicas, ambientais e sociais.

### 4.1. Análise dos fatores de produção ambiental, trabalho e capital

#### 4.1.1. Análise do ajustamento do fator de produção ambiental

Primeiramente, aplicou-se o método de análise fatorial com base nas variáveis padronizadas referentes ao fator ambiental. Pela análise da raiz característica, apenas um fator obteve valor maior que a unidade. Este mesmo fator explicou cerca de 82,03% da variação total dos dados. Conforme Mingoti (2007), essa evidência corrobora a utilização de apenas um fator na formação do indicador ambiental. Pelo teste de Bartlett, rejeitou-se a hipótese de que a matriz de correlação entre as variáveis seja uma matriz identidade. Logo, as variáveis foram conjuntamente significativas na formação do fator ambiental. A Tabela 2 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 2 – Ajustamento do fator de produção ambiental

Fator	Raiz Característica	Variância Explicada pelo Fator (%)	Variância Acumulada (%)
1	3,28139	82,03	82,03

Fonte: Adaptado do *output* do software

As correlações entre as variáveis utilizadas na formação do indicador e o fator ambiental foram todas positivas e maiores que 77,30%. As variáveis que apresentaram maior grau de correlação foram o uso de energia elétrica (98,66%) e de combustíveis fósseis (98,10%), respectivamente. Com relação à comunalidade, que é a parcela da variância explicada pelos fatores comuns, o maior coeficiente observado foi no uso de energia elétrica (0,9733), seguido do uso de combustíveis fósseis (0,9624), energia alternativa e nuclear (0,7482) e energias renováveis (0,5975), conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Cargas fatoriais e o grau de ajustamento do fator ambiental

Variável	Fator	MSA	Comunalidade
EAN	0,8650	0,6022	0,7482
ERN	0,7730	0,9103	0,5975
ECF	0,9810	0,6022	0,9624
EEL	0,9866	0,5842	0,9733

Fonte: Adaptado do *output* do software

O índice KMO geral, que é um indicador que varia de zero a um, foi de 0,6313, o que indica que os dados se adequam à análise fatorial. Individualmente, pelo indicador MSA, todas as variáveis foram maiores que 0,5842. O uso de energias renováveis, ERN, mostrou ser a variável que mais se ajusta ao modelo, segundo esse critério de análise, seguida do uso de combustíveis fósseis, ECF, do uso de energias alternativas e nucleares, EAN, e, por fim, do uso de energia elétrica, EEL. É fundamental destacar quais as variáveis que mais contribuíram para a formação do fator ambiental (Tabela 4).

Tabela 4 – Elasticidades e pesos relativos do fator ambiental

Sigla	Variáveis	Elasticidades
EAN	Energias alternativas e nucleares	0,2399
ERN	Energias renováveis	0,2144
ECF	Energia de combustíveis fósseis	<b>0,2721</b>
EEL	Energia Elétrica	<b>0,2736</b>

Fonte: Adaptado do *output* do software

Neste contexto, a Tabela 4 mostra os valores das elasticidades calculadas a partir da regressão por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) entre o escore da análise fatorial e as variáveis padronizadas utilizadas na construção do fator ambiental. A soma de todas as elasticidades resulta na unidade<sup>9</sup>. Pode-se, então, atribuir esses valores como pesos na formação do indicador ambiental, que é mais influenciado pelo uso pelo uso de energia elétrica (0,2736) e pelo uso de combustíveis fósseis (0,2721), conforme os valores ilustrados na Tabela 4. Na prática, pode-se dizer que uma variação positiva de 1% no uso de energia elétrica aumenta o fator ambiental, em média, em 0,2736%. As demais interpretações se dão de maneira análoga. Conforme os valores observados na Tabela 5, os Estados Unidos (EUA) lideram o *ranking* dos maiores usuários de energias do mundo, seguidos da China (0,782), Japão (0,247), Federação Russa (0,219) e Índia (0,155).

Tabela 5 – *Ranking* dos maiores usuários de energia do mundo, 2008

<b>País</b>	<b>Fator Ambiental</b>	<b>País</b>	<b>Fator Ambiental</b>
1 Estados Unidos	1,000	41 Portugal	0,012
2 China	0,782	42 Colômbia	0,010
3 Japão	0,247	43 Nova Zelândia	0,009
4 Federação Russa	0,219	44 Hungria	0,009
5 Índia	0,155	45 Dinamarca	0,008
6 Alemanha	0,141	46 Bulgária	0,008
7 Canadá	0,136	47 Bangladesh	0,007
8 França	0,118	48 Bielorrússia	0,007
9 Coreia	0,103	49 Argélia	0,007
10 Brasil	0,102	50 Síria	0,007
11 Reino Unido	0,089	51 Peru	0,006
12 Itália	0,081	52 Eslováquia	0,006
13 Espanha	0,068	53 Irlanda	0,006
14 Austrália	0,057	54 Marrocos	0,005
15 África do Sul	0,055	55 Azerbaijão	0,004
16 México	0,051	56 Croácia	0,003
17 Turquia	0,040	57 Equador	0,003
18 Ucrânia	0,039	58 Cuba	0,003
19 Polônia	0,033	59 Eslovênia	0,003
20 Tailândia	0,033	60 R. Dominicana	0,002

<sup>9</sup> Após a regressão entre o escore fatorial e as variáveis padronizadas, somou-se os coeficientes estimados e tomou-se a proporção dada entre a razão dos parâmetros pelo somatório final. Esse procedimento permitiu que a soma das elasticidades fechasse em um.

<b>País</b>	<b>Fator Ambiental</b>	<b>País</b>	<b>Fator Ambiental</b>
21 Suécia	0,032	61 Tunísia	0,002
22 Indonésia	0,032	62 Jordânia	0,002
23 Holanda	0,028	63 Lituânia	0,002
24 Noruega	0,028	64 Líbano	0,001
25 Egito	0,027	65 Estônia	0,001
26 Argentina	0,026	66 Costa Rica	0,001
27 Malásia	0,022	67 Sri Lanka	0,001
28 Bélgica	0,021	68 Uruguai	0,001
29 Finlândia	0,020	69 Luxemburgo	0,001
30 Venezuela, RB	0,020	70 Guatemala	0,001
31 Cazaquistão	0,017	71 Letônia	0,001
32 Paquistão	0,017	72 Gana	0,001
33 Vietnã	0,016	73 Quênia	0,001
34 Áustria	0,016	74 El Salvador	0,001
35 República Checa	0,015	75 Panamá	0,001
36 Grécia	0,015	76 Chipre	0,000
37 Suíça	0,014	77 Sudão	0,000
38 Chile	0,013	78 Costa do Marfim	0,000
39 Romênia	0,012	79 Etiópia	0,000
40 Filipinas	0,012	80 Angola	0,000

Fonte: Adaptado do *output* do software

Os primeiros países da Europa ocidental a aparecerem no *ranking* são Alemanha (6ª colocada), França (8ª colocada) e Reino Unido (11º colocado), com indicadores de 0,141, 0,118 e 0,089, respectivamente. O Brasil foi o primeiro país latino-americano a aparecer na classificação (10º colocado). Já a África do Sul (15ª colocada) foi a nação africana de posicionamento mais alto no indicador energético.

O fator ambiental médio foi de 0,051. Com relação ao uso de energia global pelo indicador ambiental, os cinco primeiros colocados no *ranking* representam cerca 57,89% do total da energia utilizada no mundo. Neste montante, apenas os Estados Unidos e a China correspondem a 42,89% do total mundial. Cerca de 97,5% dos países obtiveram valores menores que 0,250 no fator ambiental – um quarto da energia utilizada pelos Estados Unidos. Isso indica que o uso de energia está concentrado em poucos países, dentre eles EUA, China, Japão, Federação Russa e Índia.

#### 4.1.2. Análise do fator de produção trabalho

A *proxy* utilizada para representar o fator trabalho foi a População Economicamente Ativa por trabalhador, conforme Simon e Michael (2012). O *ranking* em relação a essa variável pode ser visualizado pela Tabela 6<sup>10</sup>.

Tabela 6 – *Ranking* da População Economicamente Ativa (PEA) dos países, 2008

País	Fator Trabalho	País	Fator Trabalho
1 China	1,000	41 Sri Lanka	0,010
2 Índia	0,580	42 Angola	0,010
3 Estados Unidos	0,204	43 Chile	0,010
4 Indonésia	0,149	44 Costa do Marfim	0,009
5 Brasil	0,128	45 Síria	0,008
6 Federação Russa	0,097	46 Equador	0,007
7 Bangladesh	0,089	47 Portugal	0,007
8 Japão	0,085	48 Guatemala	0,007
9 Paquistão	0,073	49 República Checa	0,006
10 México	0,061	50 Grécia	0,006
11 Vietnã	0,059	51 Cuba	0,006
12 Alemanha	0,054	52 Suécia	0,006
13 Tailândia	0,050	53 Bielorrússia	0,006
14 Etiópia	0,049	54 Bélgica	0,006
15 Filipinas	0,047	55 Suíça	0,005
16 Reino Unido	0,040	56 Azerbaijão	0,005
17 França	0,038	57 R. Dominicana	0,005
18 Egito	0,032	58 Áustria	0,005
19 Itália	0,032	59 Hungria	0,005
20 Turquia	0,031	60 Tunísia	0,005
21 Coreia	0,031	61 Bulgária	0,004
22 Ucrânia	0,029	62 Dinamarca	0,004
23 Espanha	0,029	63 Finlândia	0,003
24 Argentina	0,024	64 Eslováquia	0,003
25 África do Sul	0,024	65 Noruega	0,003
26 Canadá	0,024	66 El Salvador	0,003
27 Colômbia	0,024	67 Nova Zelândia	0,003
28 Quênia	0,023	68 Irlanda	0,003
29 Polônia	0,022	69 Costa Rica	0,002
30 Argélia	0,018	70 Croácia	0,002
31 Peru	0,017	71 Jordânia	0,002
32 Sudão	0,016	72 Uruguai	0,002
33 Venezuela	0,016	73 Lituânia	0,002

<sup>10</sup>Conforme descrito na seção metodológica, não se aplicou a análise fatorial ao fator trabalho. Para o *rankeamento* ilustrado na Tabela 6 normalizou-se a variável PEA a partir da Expressão (18b).

País	Fator Trabalho	País	Fator Trabalho
34 Malásia	0,015	74 Panamá	0,002
35 Marrocos	0,015	75 Líbano	0,002
36 Austrália	0,014	76 Letônia	0,001
37 Gana	0,013	77 Eslovênia	0,001
38 Romênia	0,013	78 Estônia	0,001
39 Holanda	0,011	79 Chipre	0,000
40 Cazaquistão	0,011	80 Luxemburgo	0,000

Fonte: Variável transformada pela expressão (18b) a partir dos dados do *World Bank* (2008)

A maior força de trabalho observada foi da China, seguida da Índia (0,580), Estados Unidos (0,204), Indonésia (0,149) e Brasil (0,128). Nenhum país da Europa ocidental está no *ranking* dos cinco primeiros. Apenas na 12ª colocação aparece a Alemanha (0,054). O Reino Unido (0,040) aparece na 16ª posição e a França (0,038), na 17ª. A Etiópia (0,049), que é a segunda nação mais populosa da África (atrás apenas da Nigéria) é o país africano de maior colocação nesse *ranking* (14ª colocação).

Os cinco primeiros países classificados detêm cerca de 60% da mão de obra mundial. Apenas a China e a Índia, os dois primeiros colocados, representam aproximadamente 45,3% do total, quase a metade do total da mão de obra disponível no mundo (*WORLD BANK*, 2008).

#### 4.1.3. Análise do fator de produção capital

Para representar o fator capital, utilizou-se a Formação Bruta de Capital Fixo (FBCF) dos países selecionados em dólares. Com base nos resultados obtidos, os Estados Unidos alcançaram a colocação mais alta no *ranking* do fator capital, seguidos da China (0,796), Japão (0,461), Alemanha (0,269) e França (0,0,251). O Brasil foi o primeiro país da América do Sul a fazer parte desse *ranking* (12ª colocação). Já entre os países africanos, a África do Sul obteve a colocação mais alta neste fator (31ª colocação). A Tabela 7 apresenta o *ranking* do fator capital.

Tabela 7 – *Ranking* dos maiores formadores de capital do mundo, 2008

País	Fator Capital	País	Fator Capital
1 Estados Unidos	1,000	41 Cazaquistão	0,015



<b>País</b>	<b>Fator Capital</b>	<b>País</b>	<b>Fator Capital</b>
2 China	0,796	42 Egito	0,015
3 Japão	0,461	43 Paquistão	0,014
4 Alemanha	0,269	44 Vietnã	0,014
5 França	0,251	45 Hungria	0,014
6 Itália	0,193	46 Peru	0,014
7 Espanha	0,185	47 Marrocos	0,014
8 Reino Unido	0,177	48 Filipinas	0,013
9 Federação Russa	0,169	49 Eslováquia	0,011
10 Índia	0,167	50 Nova Zelândia	0,010
11 Canadá	0,139	51 Bielorrússia	0,009
12 Brasil	0,137	52 Croácia	0,009
13 México	0,118	53 Bulgária	0,008
14 Coreia	0,116	54 Bangladesh	0,008
15 Austrália	0,114	55 Eslovênia	0,007
16 Holanda	0,073	56 Equador	0,006
17 Turquia	0,064	57 Sudão	0,006
18 Indonésia	0,057	58 Angola	0,005
19 Polônia	0,050	59 Lituânia	0,005
20 Bélgica	0,049	60 Luxemburgo	0,005
21 Suíça	0,042	61 Sri Lanka	0,004
22 Suécia	0,040	62 Costa Rica	0,004
23 Noruega	0,039	63 Tunísia	0,004
24 Áustria	0,038	64 Letônia	0,004
25 Tailândia	0,032	65 Azerbaijão	0,004
26 Venezuela	0,031	66 Líbano	0,004
27 Argentina	0,030	67 R. Dominicana	0,003
28 Dinamarca	0,030	68 Síria	0,003
29 Grécia	0,029	69 Uruguai	0,003
30 Romênia	0,025	70 Estônia	0,003
31 África do Sul	0,024	71 Cuba	0,003
32 Finlândia	0,024	72 Guatemala	0,003
33 Irlanda	0,023	73 Gana	0,002
34 Portugal	0,023	74 Quênia	0,002
35 Argélia	0,023	75 Chipre	0,002
36 Colômbia	0,022	76 Jordânia	0,002
37 República Checa	0,022	77 Panamá	0,002
38 Ucrânia	0,018	78 Etiópia	0,002
39 Chile	0,017	79 El Salvador	0,001
40 Malásia	0,017	80 Costa do Marfim	0,001

Fonte: Variável transformada pela expressão (18b) a partir dos dados do *World Bank* (2008)

Os cinco primeiros colocados no *ranking* representaram aproximadamente 49,62% dos investimentos mundiais. Se levados em consideração apenas os dois

primeiros, Estados Unidos e China, o montante é de mais de 30% (*WORLD BANK*, 2008).

## **4.2. Os parâmetros de eficiência dos fatores ambiental, trabalho e capital**

### **4.2.1. Análise da eficiência do fator de produção ambiental**

Para estimar o parâmetro de eficiência energética, segundo o modelo DEA, o fator ambiental e o PIB foram considerados o insumo e produto no processo produtivo. A orientação aplicada foi a *input*, conforme descrição na seção metodológica. Esta orientação visa minimizar a utilização dos recursos naturais, mantendo o produto das nações constantes.

Primeiramente, a análise foi feita utilizando retornos constantes à escala. A média de eficiência do fator ambiental foi de aproximadamente 17,87%, valor muito aquém das expectativas quanto à utilização eficiente dos recursos ambientais. Apenas Angola (100%) foi puramente eficiente<sup>11</sup>. O Sudão (59%), a Dinamarca (39%), a Irlanda (38,3%) e a Suíça (32,1%) finalizam a lista dos cinco primeiros países mais eficientes na utilização do fator energético (Tabela 8).

Sobre Angola, cabe ressaltar que a eficiência energética mostrada pelo DEA provavelmente não pode ser atribuída à capacidade de gestão do setor privado, tampouco à do governo angolano. Na realidade, com as sucessivas guerras civis que o país conviveu recentemente, o consumo de energia elétrica estagnou, sobretudo na indústria. E esse fato contribuiu para que Angola obtivesse o menor consumo registrado de energia elétrica entre os países do estudo (variável de maior peso no fator ambiental – 27,36%). Como a maior parte do PIB nacional é mantida por atividades menos intensivas em energia elétrica, como as atividades agrícolas e a indústria de extração, o fato do consumo de energia ter sido relativamente pequeno em Angola pouco se refletiu sobre os níveis gerais de renda (*GONZÁLES*, 2006).

---

<sup>11</sup> A pura eficiência é uma situação teórica em que a DMU apresenta-se eficiente tanto no modelo de retornos constantes quanto no modelo de retornos variáveis (*FERREIRA*, 2009).

Os piores países no *ranking* foram a Ucrânia (4,5%), África do Sul (4,8%), Vietnã (5,3%), China (5,6%) e Egito (5,7%). Os Estados Unidos (13,9%), maior potência econômica do mundo, obtiveram um coeficiente abaixo da média observada.

Em relação à eficiência com retornos variáveis, que é uma flexibilização quanto à escala de produção do modelo de retornos constantes, cinco nações foram consideradas eficientes: Alemanha, Angola, Dinamarca, Estados Unidos e Reino Unido. Esses países foram eficientes tecnicamente, mas, apresentaram retornos decrescentes de escala, com exceção de Angola (Tabela 8). Assim, observa-se que, na prática, a ineficiência desses países não é técnica, mas sim de escala de produção. Este tipo de ineficiência diz que se esses países aumentarem o insumo energético em uma proporção qualquer, o produto tende a aumentar menos que proporcionalmente. Nesse caso, o problema de ineficiência de escala seria resolvido se esses países diminuíssem, ao longo do tempo, o uso dos recursos naturais.

A Tabela 8 apresenta o *ranking* de eficiência técnica com retornos variáveis (ERV), a eficiência de escala (EES) e o tipo de retorno de produção (R). Para os países que operam na escala de retornos decrescentes, a coluna (R) foi preenchida com a letra (D). Para aqueles que operam com retornos crescentes, letra (C). Já para aqueles que produzem com retornos constantes, como Angola, o campo foi ocupado por um traço.

Tabela 8 – *Ranking* dos países segundo a eficiência do fator ambiental

	<b>País</b>	<b>ERV</b>	<b>EES</b>	<b>R</b>		<b>País</b>	<b>VER</b>	<b>EES</b>	<b>R</b>
1	Alemanha	1,000	0,251	D	41	Estônia	0,401	0,279	C
1	Angola	1,000	1,000	-	42	Venezuela	0,369	0,398	D
1	Dinamarca	1,000	0,390	D	43	Líbano	0,359	0,357	C
1	Estados Unidos	1,000	0,139	D	44	Canadá	0,359	0,298	D
1	Reino Unido	1,000	0,289	D	45	Romênia	0,334	0,454	D
6	Etiópia	0,998	0,316	C	46	Hungria	0,307	0,512	D
7	Japão	0,974	0,197	D	47	Finlândia	0,307	0,412	D
8	Holanda	0,949	0,314	D	48	Argentina	0,303	0,394	D
9	Itália	0,944	0,291	D	49	R, Checa	0,295	0,441	D
10	Suíça	0,927	0,346	D	50	Peru	0,293	0,589	D
11	Irlanda	0,925	0,414	D	51	Lituânia	0,286	0,561	C
12	C. Marfim	0,889	0,278	C	52	Coréia	0,282	0,311	D
13	Sudão	0,856	0,689	C	53	Jordânia	0,281	0,270	C
14	França	0,831	0,280	D	54	Filipinas	0,274	0,483	D
15	Espanha	0,756	0,297	D	55	China	0,272	0,207	D

	<b>País</b>	<b>ERV</b>	<b>EES</b>	<b>R</b>		<b>País</b>	<b>VER</b>	<b>EES</b>	<b>R</b>
16	Chipre	0,693	0,301	C	56	Chile	0,255	0,487	D
17	México	0,676	0,306	D	57	Tunísia	0,255	0,485	C
18	Áustria	0,673	0,364	D	58	Índia	0,252	0,303	D
19	Bélgica	0,650	0,345	D	59	R. Domin.	0,249	0,541	C
20	Panamá	0,610	0,273	C	60	F, Russa	0,249	0,296	D
21	El Salvador	0,584	0,263	C	61	Eslovênia	0,244	0,649	C
22	Austrália	0,570	0,308	D	62	Cuba	0,229	0,745	C
23	Quênia	0,567	0,357	C	63	Equador	0,222	0,644	C
24	Grécia	0,564	0,388	D	64	Malásia	0,218	0,437	D
25	Gana	0,546	0,339	C	65	Croácia	0,198	0,831	C
26	Turquia	0,539	0,322	D	66	Tailândia	0,192	0,411	D
27	Colômbia	0,534	0,423	D	67	N, Zelândia	0,188	0,628	D
28	Brasil	0,528	0,296	D	68	Paquistão	0,184	0,498	D
29	Letônia	0,488	0,400	C	69	Eslováquia	0,182	0,769	D
30	Portugal	0,475	0,420	D	70	Marrocos	0,172	0,901	D
31	Guatemala	0,459	0,465	C	71	Azerbaijão	0,170	0,550	C
32	Indonésia	0,447	0,345	D	72	Cazaquistão	0,130	0,566	D
33	Polônia	0,441	0,342	D	73	África do Sul	0,117	0,410	D
34	Luxemburgo	0,439	0,690	C	74	Egito	0,114	0,499	D
35	Argélia	0,433	0,487	D	75	Síria	0,109	0,625	C
36	Noruega	0,428	0,357	D	76	Bielorrússia	0,103	0,722	C
37	Uruguai	0,428	0,370	C	77	Bangladesh	0,103	0,945	C
38	Sri Lanka	0,414	0,484	C	78	Bulgária	0,097	0,616	C
39	Suécia	0,412	0,349	D	79	Ucrânia	0,094	0,475	D
40	Costa Rica	0,405	0,352	C	80	Vietnã	0,061	0,877	D

Fonte: Adaptado do *output* do software

A média da eficiência com retornos variáveis do fator ambiental foi de 45,2%. Isso implica que o modelo de retornos variáveis apresenta uma eficiência média 153% superior ao modelo de retornos constantes. Isso porque mais quatro países, além de Angola, foram considerados eficientes tecnicamente, como já mencionado.

Em suma, a ineficiência das nações quanto à utilização do insumo energético pode ser dividida em: (i) ineficiência de escala e (ii) ineficiência técnica. A primeira pressupõe teoricamente que os países possam ser eficientes se alterarem a escala de produção. Ou seja, apenas escolhendo a quantidade ótima de insumos que maximize o produto. A segunda, por sua vez, pode ser influenciada por fatores intrínsecos, como os investimentos em infraestrutura, logística etc., e até extrínsecos, como a estabilidade política, a variabilidade do clima etc.

Não obstante, existem países que podem ser tanto ineficientes tecnicamente quanto no uso da escala produtiva. E essa é a realidade de aproximadamente 94% dos países, conforme apontam os resultados do estudo. Além de Angola, mais quatro países não foram ineficientes tecnicamente (Alemanha, Dinamarca, Estados Unidos e Reino Unido), mas foram quanto ao uso da escala correta de utilização dos insumos. O que é um problema relativamente mais fácil de resolver do ponto de vista estrutural.

#### 4.2.2. Análise da eficiência do fator de produção trabalho

O insumo utilizado para estimar o coeficiente de eficiência do fator trabalho foi a força de trabalho disponível. Novamente, o PIB foi considerado o produto, não obstante, a orientação utilizada foi a *output*. Devido à rigidez da força de trabalho, a maximização do produto se torna uma ação mais coerente do que a minimização do número de trabalhadores disponíveis.

No modelo de retornos constantes, apenas Luxemburgo foi eficiente na utilização da força de trabalho. Segundo os dados do *World Bank* (2008), o país também obteve o maior PIB por trabalhador do mundo em 2008. Lawson (2010) atribui esses fatos ao crescimento observado do setor financeiro nacional nas últimas décadas, que foi responsável pelo aumento da demanda por trabalhadores, sobretudo os mais qualificados e que provavelmente recebem salários relativamente maiores. Por esse motivo, Luxemburgo foi considerado *benchmark* desse fator. Logo em seguida, vêm Noruega (64,1%), Irlanda (45,2%), Dinamarca (43,7%) e Suíça (43,5%) complementando a lista dos cinco primeiros países mais eficientes no *ranking*.

Segundo os resultados encontrados, a média de eficiência do fator trabalho foi de 14,9%. Os piores países em termos de eficiência posicionados no *ranking* foram Etiópia (0,264%), Bangladesh (0,435%), Quênia (0,629%), Vietnã (0,744%) e Índia (1,01%). Por sua vez, os Estados Unidos (34,1%) obtiveram eficiência acima da média, que foi de 14,9%.

Ao se utilizar retornos variáveis, além de Luxemburgo, mais três países podem ser considerados eficientes, a saber: Estados Unidos, França e Noruega. Portanto, esses países podem ser eficientes através do uso correto da escala de produção, pois a ineficiência enfrentada por eles não é técnica (Tabela 9). Mas, na prática, não há como

reduzir a quantidade do fator trabalho no curto/médio prazo, pois esse fator é menos flexível que o insumo natural, por exemplo. Dessa forma, deve-se procurar aumentar o PIB a partir da mão de obra preexistente, o que não é tarefa fácil. Pelo lado do produto, políticas públicas de incentivo ao investimento empresarial podem ser benéficas para a melhoria do coeficiente da escala do fator trabalho. Já pelo lado do insumo, o controle mais rígido da migração, por exemplo, também pode desempenhar um papel importante para esse indicador.

Entre os 80 países, aproximadamente 95% possuem problemas de eficiência técnica e de escala, segundo os resultados do DEA. Nos países em que o principal problema foi a ineficiência técnica, e isso se verifica em 74% do total, os investimentos em educação e as políticas de controle de natalidade são extremamente importantes. Porém, essas são medidas de médio/longo prazo e que, por tanto, necessitam de um planejamento público mais rigoroso. Já para aqueles onde o principal problema foi a ineficiência de escala (25%), as medidas acerca do controle migratório e do incentivo empresarial, como mencionado anteriormente, podem ajudar na amenização do problema.

A Tabela 9 apresenta o *ranking* de eficiência técnica com retornos variáveis, a eficiência de escala e o tipo de retorno que operam os países.

Tabela 9 – *Ranking* dos países segundo a eficiência do fator trabalho

	<b>País</b>	<b>ERV</b>	<b>EES</b>	<b>R</b>		<b>País</b>	<b>ERV</b>	<b>EES</b>	<b>R</b>
1	Estados Unidos	1,000	0,341	D	41	Argentina	0,172	0,379	D
1	França	1,000	0,364	D	42	Lituânia	0,168	0,662	D
1	Luxemburgo	1,000	1,000	-	43	Letônia	0,155	0,680	D
1	Noruega	1,000	0,641	D	44	África do Sul	0,147	0,380	D
5	Itália	0,936	0,369	D	45	Cazaquistão	0,139	0,432	D
6	Alemanha	0,915	0,356	D	46	Colômbia	0,132	0,380	D
7	Reino Unido	0,883	0,362	D	47	Líbano	0,122	0,671	D
8	Holanda	0,870	0,427	D	48	Argélia	0,114	0,392	D
9	Austrália	0,853	0,408	D	49	Uruguai	0,109	0,661	D
10	Suíça	0,836	0,520	D	50	Bulgária	0,096	0,556	D
11	Canadá	0,802	0,380	D	51	Cuba	0,094	0,494	D
12	Japão	0,795	0,349	D	52	Bielorrússia	0,094	0,502	D
13	Bélgica	0,794	0,505	D	53	Angola	0,094	0,441	D
14	Suécia	0,741	0,498	D	54	Peru	0,092	0,398	D
15	Dinamarca	0,719	0,608	D	55	Índia	0,085	0,120	D

	<b>País</b>	<b>ERV</b>	<b>EES</b>	<b>R</b>		<b>País</b>	<b>ERV</b>	<b>EES</b>	<b>R</b>
16	Espanha	0,714	0,372	D	56	Panamá	0,082	0,663	D
17	Áustria	0,699	0,524	D	57	Costa Rica	0,082	0,649	D
18	Irlanda	0,698	0,648	D	58	Ucrânia	0,080	0,372	D
19	Finlândia	0,597	0,633	D	59	Azerbaijão	0,077	0,522	D
20	Grécia	0,516	0,492	D	60	R. Domin.	0,077	0,524	D
21	Coréia	0,392	0,370	D	61	Tunísia	0,075	0,550	D
22	Portugal	0,354	0,480	D	62	Tailândia	0,074	0,357	D
23	R. Checa	0,319	0,491	D	63	Jordânia	0,073	0,657	D
24	China	0,316	0,070	D	64	Equador	0,073	0,471	D
25	Turquia	0,303	0,369	D	65	Marrocos	0,071	0,406	D
26	Nova Zelândia	0,300	0,646	D	66	Síria	0,069	0,467	D
27	Polônia	0,298	0,382	D	67	Egito	0,066	0,369	D
28	Eslovênia	0,290	0,692	D	68	Guatemala	0,057	0,489	D
29	Hungria	0,263	0,525	D	69	El Salvador	0,053	0,644	D
30	México	0,245	0,353	D	70	Filipinas	0,050	0,359	D
31	F,Russa	0,239	0,347	D	71	Indonésia	0,049	0,343	D
32	Venezuela	0,232	0,400	D	72	Sudão	0,043	0,399	D
33	Chipre	0,230	0,767	D	73	Sri Lanka	0,043	0,433	D
34	Eslováquia	0,218	0,634	D	74	Paquistão	0,031	0,351	D
35	Croácia	0,204	0,652	D	75	C. Marfim	0,027	0,445	D
36	Chile	0,191	0,442	D	76	Gana	0,025	0,413	D
37	Romênia	0,182	0,418	D	77	Vietnã	0,021	0,354	D
38	Brasil	0,182	0,344	D	78	Quênia	0,016	0,381	D
39	Malásia	0,177	0,405	D	79	Bangladesh	0,013	0,348	D
40	Estônia	0,174	0,732	D	80	Etiópia	0,007	0,358	D

Fonte: Adaptado do *output* do software

A média da eficiência do trabalho, com retornos variáveis, foi de 30,8%. Novamente, o modelo de retornos variáveis apresentou uma eficiência média maior que o modelo de retornos constantes (superior em 106%). De maneira análoga, a ineficiência de escala alterou negativamente o coeficiente de eficiência com retornos constantes, mantendo-o em níveis mais baixos que o modelo de retornos variáveis.

Apenas Luxemburgo foi puramente eficiente (eficiente considerando tanto retornos constantes quanto variáveis). A média da eficiência de escala foi de 47,20%. Os países menos eficientes neste contexto foram a China (6,96%), Índia (12%), Estados Unidos (34, 1%), Indonésia (34,3%) e Brasil (34,4%). Já os países que apresentaram menores problemas de escala foram Chipre (76,6%), Estônia (73,2%), Eslovênia (69,2%) e Letônia (68%).

Se considerado o uso adequado da escala, a eficiência desse conjunto de países na dotação do fator trabalho aumenta, no mínimo, em 30%. Para os países menos eficientes em escala, como é o caso da China, Índia, Estados Unidos, Indonésia e Brasil, o incremento em relação à eficiência aumenta, em média, 529%. Mas é claro que para a maioria desses países o uso correto da escala produtiva seria apenas o primeiro passo para o melhoramento da eficiência do fator trabalho.

#### 4.2.3. Análise de eficiência do fator de produção capital

A variável utilizada para estimar o coeficiente de eficiência do fator capital, com orientação *input*, foi a Formação Bruta de Capital Fixo (FBCF). Esse indicador foi considerado insumo e o PIB, mais uma vez, produto. Em essência, a atenção desse estudo se volta ao gerenciamento eficiente do capital disponível das nações.

No modelo de retornos constantes, apenas Costa do Marfim foi tecnicamente eficiente no uso do capital disponível. Por isso, foi considerada *benchmark* do fator capital. Cuba (93,1%), Síria (70,9%), El Salvador (68%) e Angola (63,4%) completam a lista dos cinco primeiros colocados nesse *ranking*.

Não obstante, é mais fácil pressupor que a eficiência técnica encontrada na Costa do Marfim seja mais uma questão da influência da gestão dos outros insumos de produção sobre o PIB (recursos naturais e trabalho) do que da própria gestão do fator capital, propriamente dita. Na realidade, se analisada apenas a variável referente à formação bruta de capital fixo, Costa do Marfim está entre as últimas nações, o que, de certa forma, corrobora as expectativas sobre o país, que tem o 4º menor PIB dos países da amostra (WORLD BANK, 2008).

Em relação a todos os países, a média da eficiência do fator capital foi de aproximadamente 44,1%. Os piores países colocados no *ranking* foram China (23%), Vietnã (25,5%), Marrocos (26,6%), Bielorrússia (26,9%) e Bulgária (27%). Os Estados Unidos (57,9%) apresentaram, como esperado, eficiência acima da média. Mas devido aos problemas na escala de produção os mesmos não foram puramente eficientes. No caso chinês, embora a economia do país tenha sido a 3ª maior economia do mundo em 2008, pelo montante disponível de investimentos, a razão *PIB/FBCF* observada foi a mais baixa entre todos os países da amostra. Pela ótica da eficiência técnica, o produto



chinês poderia ser ainda maior dada a quantidade disponível de capital que o país teve em 2008 (*WORLD BANK*, 2008). Contudo, outros fatores, como o impacto ambiental de um maior crescimento econômico, também devem ser considerados para canalizar ações que promovam maiores taxas de crescimento econômico.

Ao flexibilizar o tipo de retorno (estimação com retornos variáveis), mais três países aparecem como eficientes, além da Costa do Marfim: Cuba, Estados Unidos e Reino Unido (Tabela 10). Todos eles apresentaram retornos decrescentes de escala. Isso indica que se o capital variar em uma proporção  $\kappa$ , o montante de variação do produto seria de  $\Omega$ , sendo  $\Omega < \kappa$ .

Mas no caso cubano, certamente não se pode atribuir todo o crédito à capacidade de gestão dos investimentos, tampouco à política voltada para a formação bruta de capital do país. É mais provável que o PIB nacional esteja sendo influenciado pelos outros fatores produtivos, como a terra, recursos naturais ou o trabalho. Ademais, a exploração das terras existentes, baseada principalmente no cultivo do cacau, tem sido um importante fator na formação da riqueza desse país (*AUDIBERT; BRUN*, 2009).

Com relação a todos os países que se tornaram eficientes com retornos variáveis, a solução para a ineficiência de escala seria reduzir o montante já existente de capital, mantendo o produto constante, ou procurar aumentar o produto, mantendo os insumos constantes. Obviamente, essas ações não são tão simples de se fazer quanto parecem. É de se esperar que a opção de reduzir os insumos de capital e manter o PIB inalterado esteja fora de cogitação, com exceção de Cuba. Dessa forma, a única solução que parece plausível seria aumentar o PIB mantendo os insumos inalterados. E uma forma seria pelo rateio eficiente do capital existente entre os setores mais produtivos da economia, que são geralmente os setores tecnológicos ou industriais.

A Tabela 10 apresenta o *ranking* de eficiência técnica com retornos variáveis, a eficiência de escala e o tipo de retorno que operam os países.

Tabela 10 – *Ranking* dos países segundo a eficiência do fator capital

	<b>País</b>	<b>ERV</b>	<b>EES</b>	<b>R</b>		<b>País</b>	<b>ERV</b>	<b>EES</b>	<b>R</b>
1	C. do Marfim	1,000	1,000	-	41	R. Checa	0,597	0,671	D
1	Cuba	1,000	0,931	D	42	R. Domin.	0,586	0,946	D
1	Reino Unido	1,000	0,608	D	43	Ucrânia	0,585	0,687	D
1	Estados Unidos	1,000	0,579	D	44	Chile	0,584	0,692	D
5	Alemanha	0,917	0,598	D	45	Indonésia	0,579	0,630	D
6	Brasil	0,803	0,611	D	46	Espanha	0,571	0,611	D
7	Itália	0,791	0,608	D	47	Luxemburgo	0,535	0,934	D
8	Malásia	0,785	0,669	D	48	Azerbaijão	0,531	0,945	D
9	Holanda	0,785	0,618	D	49	Tailândia	0,531	0,656	D
10	Suécia	0,785	0,631	D	50	Coréia	0,526	0,617	D
11	Angola	0,776	0,817	D	51	Peru	0,520	0,730	D
12	Suíça	0,762	0,630	D	52	Etiópia	0,518	0,986	D
13	Filipinas	0,761	0,691	D	53	Quênia	0,512	0,975	D
14	Grécia	0,761	0,644	D	54	Cazaquistão	0,510	0,722	D
15	Síria	0,755	0,938	D	55	Bangladesh	0,502	0,834	D
16	França	0,754	0,605	D	56	Gana	0,483	0,979	D
17	Turquia	0,749	0,621	D	57	Índia	0,479	0,614	D
18	Japão	0,725	0,591	D	58	Romênia	0,477	0,677	D
19	Noruega	0,725	0,634	D	59	Uruguai	0,460	0,971	D
20	El Salvador	0,721	0,944	C	60	Eslováquia	0,453	0,777	D
21	Dinamarca	0,720	0,644	D	61	Panamá	0,443	0,982	C
22	Canadá	0,717	0,612	D	62	Argélia	0,439	0,692	D
23	África do Sul	0,702	0,655	D	63	Jordânia	0,436	0,969	C
24	Irlanda	0,692	0,658	D	64	Chipre	0,429	0,991	D
25	Finlândia	0,692	0,656	D	65	Sudão	0,418	0,934	D
26	Áustria	0,687	0,636	D	66	Lituânia	0,402	0,943	D
27	Polônia	0,681	0,629	D	67	Tunísia	0,400	0,952	D
28	Colômbia	0,675	0,662	D	68	China	0,388	0,593	D
29	Argentina	0,674	0,646	D	69	Sri Lanka	0,387	0,952	D
30	Bélgica	0,670	0,630	D	70	Equador	0,380	0,937	D
31	Portugal	0,664	0,661	D	71	Croácia	0,378	0,881	D
32	Paquistão	0,660	0,697	D	72	Estônia	0,343	0,999	D
33	Hungria	0,660	0,702	D	73	Líbano	0,342	0,974	D
34	Russa	0,651	0,611	D	74	Eslovênia	0,338	0,936	D
35	Egito	0,650	0,697	D	75	Letônia	0,337	0,965	D
36	Guatemala	0,649	0,954	D	76	Marrocos	0,332	0,802	D
37	Venezuela	0,632	0,649	D	77	Vietnã	0,320	0,798	D
38	Nova Zelândia	0,619	0,742	D	78	Bielorrússia	0,289	0,932	D
39	México	0,612	0,615	D	79	Bulgária	0,288	0,939	D
40	Austrália	0,599	0,616	D	80	Costa Rica	0,282	0,976	D

Fonte: Adaptado do *output* do software

A média do coeficiente de eficiência com retornos variáveis foi de 59,5%, 34,92% maior que a eficiência média com retornos constantes. Do total de países incorporados na amostra, cerca de 95% obtiveram tanto ineficiência técnica quanto de escala.

Aos que obtiveram a ineficiência técnica como o principal fator gerador de ineficiência (64% dos países), cabe salientar que são importantes medidas de caráter estruturalista, como a construção de estradas, portos, aeroportos etc. Em suma, melhores condições de escoamento da produção certamente seriam cruciais ao melhoramento do fator capital. Mas essas medidas fazem parte de um planejamento sistemático de desenvolvimento de médio/longo prazo.

Para aqueles que obtiveram a ineficiência de escala como o fator mais importante da ineficiência (35%), a diminuição dos impostos sobre o capital, a captação de recursos do exterior, a diminuição da dívida externa etc. são fatores importantes para a redução da ineficiência. Mas, como nos outros insumos produtivos, é necessária a junção de todas essas medidas para que os países que são considerados ineficientes sejam projetados junto à fronteira de eficiência.

#### **4.3. O efeito dos insumos capital, trabalho e recursos naturais no crescimento econômico e a elasticidade de substituição geral**

A análise do crescimento econômico desse estudo consiste no ajuste dos modelos das expressões (19), (20a), (20b) e (20c). Antes de estimar os parâmetros, necessita-se observar se existe algum problema que possa levar a um comportamento espúrio dos dados selecionados. Nesse sentido, as variáveis selecionadas foram submetidas ao teste de *outliers* de Grubbs, que rejeitou a 1% de probabilidade a hipótese de que o conjunto de dados não contenha valores extremos. Para as variáveis referentes ao PIB, capital e energia, os Estados Unidos aparecem como *outliers*. A China, por sua vez, aparece como um *outlier* para a variável referente a trabalho. No entanto, retirar esses dois países da análise certamente não seria adequado, pois ambos são extremamente importantes por gerar efeitos econômicos, sociais e ambientais

relevantes nos cenários nacionais e internacionais, por isso, optou-se por mantê-los no estudo.

Para estimar a CES pelos procedimentos iterativos de Gauss-Newton, os valores iniciais atribuídos aos parâmetros  $\beta_K$ ,  $\beta_L$ ,  $\rho$  e  $\Phi$  foram 0,4, 0,3, 0 e 1, respectivamente (SOLOW, 1957). Portanto, testa-se *a priori* a representatividade da função de produção Cobb-Douglas. A suposição de que as participações do capital (0,4), do trabalho (0,3) e da energia (0,3) sejam próximas é uma afirmativa razoável do ponto de vista teórico. No entanto, para o conjunto dos dados originais, o algoritmo de Gauss-Newton não encontrou soluções ótimas que fizessem com que os parâmetros do modelo convergissem. Como forma de contornar esse problema utilizou-se os dados padronizados pela média, que permite diminuir a escala original e reduzir os problemas ligados à estimação dos parâmetros (AFONSO *et. al.*, 2003)<sup>12</sup>.

Depois de ajustado o modelo, aplicou-se o teste de Koenker-Bassett sobre os resíduos a fim de se verificar a presença de heterocedasticidade, a qual não foi rejeitada a 1% de significância. Para corrigir a violação do pressuposto de homocedasticidade, estimou-se novamente o modelo pela correção robusta dos erros padrão HC2 de MacKinnon e White (1985), sugerida por Long e Ervin (1998). Em suma, o modelo robusto HC2 é uma alternativa ao modelo HC1 de Huber e White (Erros Padrão Robustos), em que a motivação teórica se baseia na influência específica de uma observação sobre o conjunto de dados. Portanto, devido à influência dos EUA e da China nesse contexto, essa metodologia seria mais adequada que o modelo HC1 (LONG; ERVIN, 1998).

No total, foram necessárias 20 iterações do processo de Gauss-Newton para estimar os parâmetros por MQONL. De maneira geral, rejeita-se a 1% a hipótese de que os coeficientes sejam simultaneamente iguais a zero. Portanto, os insumos produtivos são conjuntamente significativos para explicar o PIB das nações. Pelo coeficiente de determinação ajustado, observa-se que 96,90% da variação do PIB dos países inclusos neste estudo pode ser explicada pelas variáveis capital, trabalho e energia. Os valores dos parâmetros estimados podem ser visualizados pela Tabela 11.

---

<sup>12</sup> A padronização pela média é aplicada a partir da divisão entre o dado observado e a média da variável ( $x_i/\bar{x}$ , em que  $x_i$  é a observação e  $\bar{x}$  a média). Essa padronização impede que países abaixo da média tenham insumos negativos (AFONSO, *et. al.*, 2003).

Tabela 11 – Coeficientes estimados<sup>13</sup>

Parâmetro	Coeficiente	Erro padrão	Valor-P
$\Phi_A$	0,5949	0,1236	0,000
$\beta_K$	0,9041	0,1013	0,000
$\beta_L$	-0,1767	0,0475	0,000
$\lambda_K$	0,595	(DEA)	(DEA)
$\lambda_L$	0,308	(DEA)	(DEA)
$\lambda_E$	0,452	(DEA)	(DEA)
$\rho$	1,0666	0,1189	0,000

R<sup>2</sup>: 97,05  
R<sup>2</sup> ajustado: 96,90  
Número de observações: 80

Fonte: Adaptado do *output* do software

Todos os valores dos parâmetros estimados foram significativos do ponto de vista estatístico. Os valores de participação do capital e do trabalho foram iguais a 0,9041 e -0,1767, respectivamente. A participação do insumo energético ( $1 - \beta_K - \beta_L$ ) neste contexto foi de 0,2726. O parâmetro da PTF apresentou um valor de 0,5949. Em relação ao parâmetro de substituição,  $\rho$ , tem-se um valor muito próximo da unidade (1,0666).

A partir dos resultados encontrados, cabe destacar três importantes aspectos. O primeiro deles diz respeito a não se poder rejeitar a hipótese de que a função CES descreva o comportamento econômico mundial. A significância estatística do parâmetro de substituição indica que a utilização da função Cobb-Douglas pode ser equivocada. Quando o parâmetro de substituição tende para zero, a elasticidade de substituição entre os insumos tende para a unidade e, dessa forma, a economia percorre uma trajetória de crescimento equilibrado no longo prazo admitindo substitutibilidade imperfeita entre os fatores de produção (SOLOW, 1957). Mas quando a elasticidade de substituição se difere da unidade, sendo inferior ou superior a 1, surgem outras possibilidades, como o declínio do crescimento econômico ou sua expansão ilimitada, respectivamente<sup>14</sup>.

<sup>13</sup> Os coeficientes estimados foram: (i)  $\Phi_A$  = PTF; (ii)  $\beta_K$  = coeficiente de participação do capital; (iii)  $\beta_L$  = coeficiente de participação do trabalho; (iv)  $\lambda_K$  = coeficiente médio de eficiência do capital pelo DEA; (v)  $\lambda_L$  = coeficiente médio de eficiência do trabalho pelo DEA; (vi)  $\lambda_E$  = coeficiente médio de eficiência do fator energético pelo DEA; (v)  $\rho$  = parâmetro de substituição.

<sup>14</sup> Para mais detalhes, ver Chirinko e Mallick (2010).

Uma vez que o parâmetro de substituição foi estatisticamente diferente de zero, a hipótese de que  $\rho \rightarrow 0$  e  $\sigma \rightarrow 1$  é automaticamente descartada, e esse é o segundo aspecto importante a ser considerado. Os resultados do estudo mostram que a elasticidade de substituição geral,  $\sigma$ , está próxima a 0,4863 – um valor bem menor que a unidade.

São vastas as implicações econômicas desses resultados, cabe aqui salientiar as mais importantes. Em primeiro lugar, com a elasticidade de substituição inferior à unidade, as possibilidades de troca entre capital, trabalho e recursos naturais são limitadas. Em outras palavras, se houver grande escassez de algum desses insumos no futuro o produto tenderia a diminuir, dadas as limitações de troca dos mesmos.

Segundo, como os valores de  $\sigma$  estão possivelmente associados à renda *per capita*, o bem estar de longo prazo das nações estaria seriamente comprometido. Isso porque se a elasticidade de substituição for relativamente baixa, choques exógenos na economia causados por mudanças tecnológicas que *a priori* seriam positivas para o aumento da renda *per capita*, na prática, teriam pouco efeito sobre a eficiência dos insumos, uma vez que a estrutura produtiva seria mais rígida e a mobilização dos recursos para o aproveitamento dessas mudanças menos flexível. De outro modo, a própria tendência de esgotamento dos recursos naturais faria com que o produto das economias declinasse dadas as menores possibilidades de troca (KARAGIANNIS; PALIVOS; PAPAGEORGIU, 2004).

E por fim, o último aspecto a ser considerado é aquele que diz respeito às participações dos insumos na formação do PIB das nações. Os parâmetros estimados de participação do capital e dos recursos naturais foram positivos e significativos. No entanto, os resultados mostram que o fator trabalho, em nível mundial, afeta o produto de maneira negativa (Tabela 12).

Tabela 12 – Estimativas das elasticidades individuais dos insumos<sup>15</sup>

<b>Variáveis</b>	<b>Elasticidades</b>
Capital	0,887
Trabalho	-0,090
Energia	0,204

Fonte: Adaptado do *output* do software

Conforme mostra a Tabela 12, a elasticidade individual do capital, considerando a eficiência técnica dos insumos, foi de 0,887. Na prática, isso indica que se o capital expandir em 1% o efeito médio sobre o PIB mundial tende a ser de aproximadamente 0,887%. Já a elasticidade individual da energia tende a ter um impacto menos expressivo sobre o produto (0,204%), mais ainda assim positivo. De forma contrária, um aumento de mesma magnitude no trabalho causaria um efeito negativo sobre a renda mundial, mesmo sendo pequeno esse valor (-0,09%).

Esse último resultado, apesar de não esperado, pode ser consequência do aumento da população em um cenário de maior rigidez dos recursos econômicos, pois a expansão da oferta global de mão de obra induz à queda da renda *per capita* devido ao despreparo da estrutura produtiva para atender esse excedente de trabalho. (CHIRINKO; MALLICK, 2010). Outro fator que deve ser levado em consideração são as políticas de controle à natalidade, que nos países mais pobres são menos efetivas que nos países ricos. Como as taxas de natalidade do passado afetam sistematicamente a mão de obra disponível atualmente, é de se esperar que a renda *per capita* nos países mais pobres seja relativamente menor e que exista, assim, uma relação negativa entre a quantidade disponível de trabalhadores e a renda do país (SIMON, 1970).

#### **4.4. As elasticidades de substituição parciais entre os insumos**

A fim de verificar se os insumos naturais e não naturais são ou não substitutos, estimou-se as elasticidades parciais de substituição entre eles. A primeira abordagem apresenta a elasticidade de substituição parcial entre capital e energia, a segunda apresenta a elasticidade de substituição parcial entre capital e trabalho e a terceira

<sup>15</sup> A elasticidade individual do insumo é calculada a partir da expressão  $(dy/dx)(x/y)$  para todo insumo  $x$  e produto  $y$  (VARIAN, 1992).

apresenta a elasticidade de substituição parcial entre energia e trabalho. Em todos os modelos estimados, fez-se o uso das estimativas robustas HC2. A Tabela 13 apresenta os principais resultados.

Tabela 13 – Estimativas das elasticidades de substituição parciais <sup>16</sup>

<b>Elasticidade parcial entre capital e energia</b>			
Parâmetro	Coefficiente	Erro padrão	P-valor
$\Phi_1$	0,5667	0,2075	0,008
$\theta_1$	1,0919	0,0743	0,000
R <sup>2</sup> : 97,00			
R <sup>2</sup> ajustado: 96,84			
<b>Elasticidade parcial entre capital e trabalho</b>			
Parâmetro	Coefficiente	Erro padrão	P-valor
$\Phi_2$	0,8885	0,1208	0,000
$\theta_2$	0,9203	0,1251	0,000
R <sup>2</sup> : 94,71			
R <sup>2</sup> ajustado: 94,43			
<b>Elasticidade parcial entre energia e trabalho</b>			
Parâmetro	Coefficiente	Erro padrão	P-valor
$\Phi_3$	0,8755	0,1426	0,000
$\theta_3$	0,9457	0,4892	0,057
R <sup>2</sup> : 91,79			
R <sup>2</sup> ajustado: 91,35			

Fonte: Adaptado do *output* do software

Em todas as três estimações, os coeficientes foram individualmente significativos a 5,7%. Pelo coeficiente de determinação simples e ajustado, os modelos estão bem ajustados, pois todos foram superiores a 91%, indicando que pelo menos esse percentual da variação do produto pode ser explicado pelos fatores capital, trabalho e energia.

Em relação ao parâmetro de substituição parcial entre capital e energia,  $\theta_1$ , novamente, tem-se um valor diferente de zero (1,0919). Portanto, pode-se rejeitar a

<sup>16</sup> Cabe ressaltar o significado de três parâmetros: (i)  $\theta_1$ = parâmetro de substituição parcial entre capital e energia; (ii)  $\theta_2$ = parâmetro de substituição parcial entre capital e trabalho; e (iii)  $\theta_3$ = parâmetro de substituição parcial entre energia e trabalho; Os demais parâmetros estimados a partir das expressões (20a, 20b e 20c) não possuem significado econômico relevante neste contexto (KEMFERT, 1998).



hipótese de que  $\theta_1 \rightarrow 0$  e  $\sigma_{K/E} \rightarrow 1$ . Pelo valor estimado do parâmetro de substituição, os resultados deste estudo mostraram que a elasticidade de substituição entre capital e energia foi igual a 0,4780.

A consequência disso para as futuras políticas econômicas e ambientais são notórias. Em primeiro lugar, não se pode afirmar que o capital seja efetivamente substituto dos recursos naturais. Embora a elasticidade de substituição seja positiva, o que indica certo grau de substitutibilidade, a relação entre o capital e recursos naturais está mais próxima da complementaridade do que da substitutibilidade, já que o valor encontrado está mais próximo de zero<sup>17</sup>. Assim, a possibilidade de troca entre esses insumos é baixa e, em um eventual esgotamento dos recursos naturais, os resultados econômicos, ambientais e sociais em termos de produção e de bem estar podem ser bastante adversos.

Do ponto de vista econômico, o consumo demasiado dos recursos naturais e uma elasticidade de substituição baixa entre capital e energia provavelmente limitaria a produção de bens e serviços em algum momento no futuro. Do ponto de vista social, o esgotamento dos recursos naturais e a consequente limitação da produção de bens e serviços levaria a uma piora considerável da qualidade de vida da população.

De fato, o uso desordenado dos recursos naturais certamente levaria à sua extinção. E essa é uma suposição aceitável, inclusive no modelo de Solow (1986). Entretanto, Solow (1986) afirma que se a taxa de variação do fator tecnológico for superior à taxa de desgaste dos recursos naturais, o crescimento econômico pode ser sustentável. Em outras palavras, o avanço tecnológico poderia contrabalancear a degradação do meio ambiente.

Porém, uma das suposições mais importantes do modelo de Solow – ou talvez a mais importante – é o valor unitário atribuído à elasticidade de substituição, o que não se confirmou nesse estudo. Logo, mesmo se a taxa do avanço tecnológico for superior à taxa de desgaste dos recursos naturais, não há como garantir que o estoque de bens ambientais se mantenha preservado e que a economia mundial se equilibre no longo prazo. Portanto, são necessárias medidas de controle da degradação ambiental e de

---

<sup>17</sup> Quanto mais próxima a zero, maior a complementaridade dos insumos produtivos. E quanto mais próxima do infinito, maior a substitutibilidade (KEMFERT, 1998).

preservação do meio ambiente para que o crescimento econômico seja equilibrado e sustentável.

Devido a essa crescente preocupação social, algumas políticas isoladas têm sido adotadas. E uma delas diz respeito à utilização do turismo em áreas legalmente protegidas. Sims (2010), em seu estudo sobre a Tailândia, mostra que os benefícios do turismo nessas áreas têm sido grandes o suficiente para compensar os custos das restrições de utilização das terras. Embora essa medida não seja aplicável a todos os casos, parece ser intuitivamente relevante o desenvolvimento da ideia de se utilizar as terras protegidas de maneira sustentável.

Outra forma de preservar o meio ambiente é através da aplicação de sanções e/ou restrições econômicas em nível mundial. Segundo Leimbach e Baumstark (2010), quando as exigências por produtos/serviços ambientalmente sustentáveis aumentam, cresce o incentivo para a adoção de políticas de proteção dos recursos naturais. Para os defensores da CAK<sup>18</sup>, essa tem sido uma tendência do atual modelo de desenvolvimento econômico mundial (GROSSMAN; KRUEGER, 1995; PANAYOTOU, 2003; SELDEN; SONG, 1993).

Pela perspectiva de mercado, se os bens ambientais puderem ser considerados ativos, como sugere Hotelling (1931), a precificação consistente do uso da terra – e das consequências ambientais das atividades econômicas – torna-se uma importante ferramenta de proteção ambiental, pois o custo de oportunidade far-se-á com que os investimentos econômicos incorporem, de fato, as externalidades ambientais geradas pela atividade econômica. Portanto, o preço seria um mecanismo para conciliar o crescimento econômico e a preservação do meio ambiente. Embora esta solução pareça ser atraente, não há como garantir, de fato, que o próprio mercado se autorregule. Como os agentes econômicos, sobretudo as empresas, visam minimizar os custos, o desgaste do fator ambiental tende a crescer sem a intervenção estatal. Em suma, os mercados não são capazes de alocar eficientemente os bens públicos, como é o caso dos recursos naturais (DALY; FARLEY, 2004).

---

<sup>18</sup> A CAK (Curva Ambiental de Kuznets) define que a relação entre o crescimento econômico e a degradação ambiental seja positivamente relacionada no curto prazo. No entanto, devido à mudança de consciência dos agentes econômicos, somada à adoção de tecnologias mais limpas e à legislação ambiental, a degradação dos recursos naturais tende a cair no longo prazo (GROSSMAN; KRUEGER, 1994; PANAYOTOU, 2003; SELDEN; SONG, 1993).

A medida mais óbvia então é substituir os recursos não renováveis, como os combustíveis fósseis ou a energia elétrica, por recursos que não são fisicamente limitados, como a luz solar ou a energia eólica, por exemplo. Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) são categóricos quanto à participação da mudança tecnológica nesse processo. Segundo os autores, as mudanças tecnológicas em diferentes setores reduzem os custos de realocação dos investimentos em recursos renováveis. Portanto, no longo prazo, a eficiência energética, e conseqüentemente o bem estar social, dependerá substancialmente da capacidade das nações em substituir a atual estrutura energética por uma menos onerosa do ponto de vista ambiental.

Em relação ao parâmetro de substituição parcial entre capital e trabalho,  $\theta_2$ , tem-se, de maneira análoga, um valor diferente de zero (0,9203). Os resultados encontrados sugerem que a elasticidade de substituição entre capital e trabalho seja 0,5207.

Neste caso, quando a elasticidade de substituição é unitária – e o parâmetro de substituição tende a zero, como na Cobb-Douglas – a taxa capital/trabalho converge para um valor finito e positivo e as condições de Inada<sup>19</sup> são satisfeitas. Ao se incorporar os recursos naturais na função de produção, essa convergência depende substancialmente da taxa de progresso técnico.

Mas quando a elasticidade de substituição é menor que 1 (um), como ilustra a Tabela 13, a relação  $K/L$  declina independentemente da mudança tecnológica. Assim, o aumento individual do capital causaria pouco impacto sobre a sua produtividade marginal, e o principal determinante desse declínio é a rigidez do sistema produtivo (KLUMP; GRANDVILLE, 2000; CHIRINKO; MALLICK, 2010).

Existem relações institucionais que podem afetar a elasticidade de substituição entre capital e trabalho. Dentre todas, cinco podem ser destacadas (KLUMP; PREISSLER, 2000). A primeira é a formação de sindicatos. Existem fortes evidências de que quanto maior o poder do sindicato na economia, menor a elasticidade de substituição. Em suma, não é de particular interesse dos sindicatos ter grandes

---

<sup>19</sup> Solow (1957) mostra que se a elasticidade de substituição for igual à unidade, o produto marginal do capital tende a zero, dadas as condições de Inada  $\lim_{k \rightarrow \infty} f'k = 0$ ; e  $\lim_{k \rightarrow 0} f'k = \infty$ .

mudanças setoriais, pois quanto maior for a variabilidade do número de integrantes do sindicato, menor o seu poder sobre as negociações das condições de trabalho.

O segundo fator diz respeito aos níveis gerais de escolaridade. Se uma sociedade possui uma baixa proporção de capital humano especializado, mantendo os demais fatores constantes, a elasticidade de substituição tende a ser relativamente menor. Se o sistema econômico em questão receber um choque tecnológico positivo, por exemplo, a escassez de mão de obra especializada pode ser um importante entrave ao desenvolvimento devido à baixa flexibilidade entre a mão de obra especializada e a não especializada.

Mas essa segunda obviamente dependerá das relações contratuais existentes (terceira relação institucional). Quanto maior o tempo de contrato assumido pelos agentes econômicos, menor tende a ser a elasticidade de substituição, porque se houverem mudanças estruturais, sistêmicas ou tecnológicas em uma sociedade específica, a legislação local pode impedir que os recursos, de capital ou humano, possam ser alocados nos setores que mais se beneficiam desses impactos, e esse fator torna a elasticidade de substituição baixa.

Outro importante fator é a diversificação dos setores econômicos. Quanto maior a diversificação desses setores, maior a demanda por diferentes tipos de investimentos de capital e humano, e essa maior diversificação dos investimentos faz com que os recursos sejam mais flexíveis dentro do sistema econômico.

E por fim, o grau de abertura comercial. Este último induz positivamente a diversificação dos setores econômicos, que por sua vez afeta positivamente os níveis gerais de escolaridade. Se a economia é relativamente mais aberta, existe maior incentivo para a diversificação dos setores econômicos, e essa maior diversificação demanda maiores investimentos de capital e de mão de obra especializada.

Em relação ao parâmetro de substituição parcial entre energia e trabalho,  $\theta_3$ , tem-se um valor significativo e diferente de zero (0,9457). A elasticidade de substituição neste caso foi de 0,5139. Esses resultados novamente indicam que a função CES é mais adequada para explicar a relação entre energia e trabalho do que a função Cobb-Douglas, contudo, é relevante destacar que as possibilidades de troca

entre energia e trabalho são maiores do que a relação capital-energia, uma vez que a elasticidade de substituição no terceiro modelo foi superior à do primeiro.

Não obstante, a história econômica mostra que a tendência do sistema produtivo é automatizar-se e eventuais trocas de energia por trabalho certamente estariam indo contra aos fatos históricos. Não seria plausível, por exemplo, trocar motores movidos por energia elétrica por motores de manuseio humano; ou gasolina por força animal. Essas trocas, sem dúvida, representam uma possibilitada teórica, mas são pouco prováveis em termos práticos, pois não é comum de se supor um retrocesso tecnológico de tamanha magnitude (HEILBRONER, 1992).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grande problema de qualquer agente econômico é alocar os seus recursos escassos de maneira eficiente. Na visão macroeconômica, o bem estar social está intimamente ligado à capacidade que a nação possui de gerir os fatores capital, trabalho e recursos naturais. No entanto, ainda hoje, a atenção dada ao fator capital é predominante.

Embora o capital seja indispensável ao desenvolvimento econômico, deve-se dar atenção também ao fator trabalho e, sobretudo, ao fator ambiental, devido, dentre outras coisas, à sua propriedade intrinsecamente limitada. Mas o fato de assumir substitutibilidade entre os recursos naturais e não naturais impede que a sociedade compreenda a real relação entre os insumos produtivos.

Portanto, a contribuição deste estudo foi avaliar o grau de substituição entre os insumos capital, trabalho e energia para as 80 maiores economias do mundo em 2008. A inovação aqui está no fato de considerar a eficiência individual de todos os insumos no processo de produção, de estimar os parâmetros por Mínimos Quadrados Ordinários Não Lineares (MQONL) e de utilizar uma função de produção que flexibiliza o grau de substitutibilidade entre os fatores para a economia mundial em 2008.

Nessa ótica, o atual esquema de produção pode ser considerado insustentável, uma vez que as possibilidades de troca entre os insumos naturais e não naturais se mostraram relativamente baixas. Em relação ao consumo dos insumos produtivos, fica evidente que a utilização irracional dos recursos naturais pode levar a uma contínua degradação do meio ambiente, o qual é fundamental para a vida humana. A sociedade

é então desafiada a repensar sobre as formas de produção e consumo que mantenham as questões econômicas concomitantemente às questões ambientais.

Não obstante, as características que tornam os recursos naturais um bem público impedem que esses bens sejam tratados como ativos, como sugere a economia neoclássica. Por isso, os custos da degradação, como a poluição dos rios, o desgaste da camada de ozônio, a mudança no clima, a perda da biodiversidade, dentre outros desastres ecológicos, não são corretamente avaliados – se é que eles são sequer levados em consideração. Certamente, em um cenário de exaustão dos recursos naturais o menor dos problemas das futuras gerações seria a tendência de queda da renda, pois chega a ser inimaginável, por exemplo, a escassez de água para o próprio consumo. Por isso, deve-se colocar na atual estrutura de produção e na própria consciência da sociedade a importância dos recursos naturais para a sobrevivência humana e os limites ecológicos do ecossistema.

O fator ambiental, portanto, é, muitas vezes, insubstituível e extremamente vulnerável às ações humanas, o que indica a urgência de se adotarem ações que promovam, além do crescimento econômico, a preservação do meio ambiente e de todas as suas pluralidades. Neste contexto, o papel do avanço tecnológico é imprescindível. Não a tecnologia citada no modelo da economia ambiental que pode contrabalancear a degradação dos recursos naturais através da substituição entre capital e energia, mas sim a tecnologia que pode promover a substituição dos recursos naturais limitados, como é o caso dos combustíveis fósseis, por recursos renováveis, como a energia eólica ou qualquer outra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, A.; SCHUKNECHT, L.; TANZI, V. **Public Sector Efficiency: an International Comparison**. European Central Bank. Working Paper no. 242. Jul. 2003.

AHAMED, M. M. M. **Capital – Labor substitution possibilities in the Sudanese manufacturing sector**. Utafiti. Vol. 5. No. 2. 1980.

ANDRADE, D.C.; ROMERO, A.R. **Degradação Ambiental e Teoria Econômica: Algumas Reflexões sobre a “Economia dos Ecossistemas**. Revista EconomiA, v. 12. N.1. p-3-26. Jan/abr. 2011.

ARROW, H. B. CHENERY, B. S. MINHAS, R. SOLOW, R. **Capital-Labor Substitution en Economic Efficiency**. The Review of Economics and Statistics. Vol. 43. No. 3. Pp. 225-250. 1961.

AUDIBERT; M.; BRUN, J.F. **Effets économiques du paludisme sur les cultures de rente : l'exemple du café et du cacao en Côte d'Ivoire**. Revue d'économie du développement. Vol 23. Pp. 145-166. 2009.

BERNDT, E. R. WOOD, D. O. **Technology, prices and the derived demand of energy**. Rev. Econ. Statist. 57: 259-68. No. 21. 1975.

BRASIL, Receita Federal. **O Investimento Direto Estrangeiro no Brasil e na Irlanda**. Disponível em <[www.receita.fazenda.gov.br/Aduana/IDE/IDEBrasilIrlanda/ideBraIrl.htm](http://www.receita.fazenda.gov.br/Aduana/IDE/IDEBrasilIrlanda/ideBraIrl.htm)>. Acesso em abril de 2012.

BRETSCHGER, L. SMULDERS, S. **Sustainability and Substitution of Exhaustible Natural Resources. How resource prices affect long-term R&D investments**. NOTA DI LAVORO 87. 2003.

CHARNES, A.; COOPER, W.W.; RODHES, E.; **Measuring efficiency of decision making units**. European Journal of Operational Reseach 2. 1978.



CHINTRAKARN, P.; MILLIMET, D. **The Environmental Consequences of trade: Evidence from Subnational Trade Flows**. Departmental Working Paper 0501. Southern Methodist University. 2005.

CHIRINKO, R. S.; MALLICK, D. **The substitution elasticity, growth theory, and the low-pass filter panel model**. Disponível em: 11<sup>th</sup> International Conference on Panel Data. 2010.

DALY, H. E.; FARLEY, J. **Ecological Economics: principles and applications**. ISBN 1-5555963-312-3. Island Press. London. 2004.

EDENHOFER, O.; BAUER, N.; KRIEGLER, E.; **The impact of technological change on climate protection and welfare: Insights from the model MIND**. Ecological Economics. 277-292. 2005.

FERREIRA, C.M.C., GOMES, A.P. **Introdução à análise envoltória de dados: teoria, modelos e aplicações**. Ed. 1. Editora UFV. Viçosa, 2009.

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

FILIPPINI, M. HUNT, L. **Energy demand and energy efficiency in the OECD countries: a stochastic demand frontier approach**. CEPE Working Paper No. 68. 2009.

GALLANT, A.R.; **Nonlinear Statistical Models**. Chapter 6: Multivariate Nonlinear Regression. 1984.

GEORGESCU, M.; ROEGEN. **The Entropy Law and the Economic Process in Retrospect**. Eastern Economic Journal, Volume XII, No1, Jan/Mar. 1986.

GOMES, A. P.; BAPTISTA, A J. S. **Análise envoltória de dados: Conceitos e modelos básicos**. In. SANTOS, Maurinho L. dos; VIEIRA, Wilson C. (ed.) Métodos quantitativos em economia. Viçosa, UFV, p.121-160, 2004.

GONZÁLES, A. **Recursos Naturales y Humanos de Angola: Un abordaje introductorio**. Centro Argentino de Estudios Internacionales. Programa África Subsahariana. UNDP Human Development Report. 2006.

GREENE, W. H. **Econometric Analysis**. 5<sup>a</sup> Edição. Prentice-Hall. 2003. 1083p.

GROSSMAN, G. M., KRUEGER, A. B. **Economic growth and the environment**. National Bureau of economic research. Massachusetts Avenue. Cambridge, MA 02138. Fev. 1995.

GROWIEC, J. **A microfoundation for normalized CES production functions with factor-augmenting technical change**. National Bank of Poland. Working Paper No. 98. 2011.

GUESNERIE, R. **A future for Kyoto?**. Paris-Jourdan Sciences Economiques. Working Paper. N.8. Maio. 2011.

GUJARATI, D.N. **Econometria Básica**. Ilsevier. Rio de Janeiro, 2006.

HARTWICK, J. M. **Natural Resources, National Accounting and Economic Depreciation**. Journal of Public Economics. No. 43. Pp. 291-304. 1990.

HEILBRONER, R. L. **A história do pensamento econômico**. Editora Nova Cultura Ltda. Tradução: Simon e Schuster. São Paulo. 1992.

HOTELLING, H. **The economics of exhaustible resources**. The Journal of Political Economy. Vol. 39. No. 2. pp. 137-175. 1931.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Disponível em: <[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)>. Acesso em: 20 de dezembro de 2011. 2010.

KARAGIANNIS, G. PALIVOS, T. PAPAGEORGIU, C. **Variable Elasticity of Substitution and Economic Growth: Theory and Evidence**. Program. PYTHAGORAS. 2004.

KEMFERT, C.; **Estimated Substitution elasticities of nested CES production function approach for Germany**. Energy Economics. 249-264. 1998.

KLUMP, R.; GRANDVILLE, O. **Economic growth and the elasticity of substitution: two theorems and some suggestions**. The American Economic Review, Vol. 90, No. 1. Pp. 282-291. Mar, 2000.

\_\_\_\_\_, R.; PREISLER, H. **CES production function and economic growth**. Scand. J. of Economics 102(1), 41-56. 2000.

KOESLER, S. SCHYMURA, M. **Substitution elasticities in a CES production framework: An empirical analysis on the basis of non-linear least squares estimations**. Zew Discussion Papers. 12-007. Center for European Economic Research. 2012.

LAWSON, J. **Making the Luxembourg Labor Market Work Better**. OECD Economics Department. Working Paper no. 778. 2010.

LEIMBACH, M.; BAUMSTARK, L. **The impact of capital trade and technological spillovers on climate policies**. Ecological Economics. Ecolec-03710. 15 pp. 2010.

LONG, F. S.; ERVIN, L. H.; **“Correcting for Heteroscedasticity with Heteroscedasticity Consistent Standard Errors in the Linear Regression Model: Small Sample Considerations”**. Indiana University. Bloomington, IN 47405. 1998.

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

MELLO, J. C. C. B. S., *et al.* **Curso de análise de envoltória de dados**. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Gramado, RS, 2005.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. 1ª Ed. Editora UFMG. Belo Horizonte. 2007. 295 p.

PANAYOTOU, T. **Economic Growth and the Environmental**. Economic Survey of Europe. No. 2. 2003.

RAO, B.B. SHANKAR, S. **Estimates of the long-run growth rate of Singapore with a CES production function**. MPRA Paper No. 31601. 2011.

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

ROSENSTEIN, M. **Substitution among Labor, Capital and Energy for United States Manufacturers**. Senior Thesis. The Ohio State University. 31p. 1980.

SACHS, J. D. **Institutions don't Rule: Direct Effects of Geography on per capita income**. Working Paper. 9490. National Bureau of Economic Research. 2003.

SANDRONI, P. **Dicionário de economia do século XXI**. Ed. 1. Rio de Janeiro. Editora Record. 903 pp. 2005.

SELDEN, T. M., SONG, D. **Environmental quality and development: Is there a Kutznets curve for air pollutions emissions?** Journal of environmental economics and management 27, 147-162. 1994.

SIMON, J. L. **The per-capita-income criterion and natality policies in poor countries**. Demography. Vol. 7, No. 3. pp. 369-378. 1970.

SIMS, K. R. R. **Conservation and development: Evidence from Thai protected areas**. Journal of Environmental Economics and Management. Pp. 94-114. 2010.

SOARES, T.C.; ZABOT, U.C.; RIBEIRO, G.M. **Índice geral de criminalidade: uma abordagem a partir da análise envoltória de dados para os municípios catarinenses**. Leituras de Economia Política, Unicamp. (19): 18-109, dez. 2011.

SOLAK, M. K. **Detection of multiple outliers in univariate data sets**. Schering-Plough Research Institute Paper SP06. 2009.

SOLOW, R. M. **Technical Change and the Aggregate Production Function**. The Review of Economics and Statistics, Vol. 39, No. 3. pp. 312-320. Aug. 1957.

\_\_\_\_\_. **On the Intergenerational Allocation of Natural Resources**. The Scandinavian Journal of Economics, Vol. 88, No. 1. pp. 141-149. Mar. 1986

\_\_\_\_\_. **Intergenerational Equity and Exhaustible Resources**. The Review of Economic Studies. Vol. 41. Symposium on the Economics of Exhaustible Resources. P.25-45. 1974.

SOUZA, G.S.; **Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear**. Editora Embrapa. 489 pp. 1998.

STIGLITZ, J. **Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths**. The Review of Economic Studies, Vol. 41, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources. pp. 123-137. 1974.

VARIAN, H.R. **Microeconomic Analysis**. 3ª Edição. Nova Iorque, EUA. Norton e Company. 563 pp. 1992

VAZ, C.; CAMANHO, A.; **Evolução do desempenho de lojas de retalho ao longo do tempo utilizando o índice de Malmquist**. 15º Congresso da Associação Portuguesa de Investimento operacional. 2011

WORLD BANK. Disponível em: <[www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)>. Acesso em: 20 de maio. 2011. 2008.

## APÊNDICES

```
. nl (pib = {tec=1}*({pk=0.4}*cap^-{rho=0.001} + {pl = 0.3}*trab^-{rho} + (1 - {pk} - {pl})*ener^-{rho})^-1/{rho}), vce(hc2)
(obs = 80)
```

```
Iteration 0: residual SS = 2.15e+07
Iteration 1: residual SS = 5361600
Iteration 2: residual SS = 1336812
Iteration 3: residual SS = 332501.4
Iteration 4: residual SS = 82359.88
Iteration 5: residual SS = 20290.45
Iteration 6: residual SS = 5000.715
Iteration 7: residual SS = 1277.437
Iteration 8: residual SS = 360.4565
Iteration 9: residual SS = 104.413
Iteration 10: residual SS = 33.98984
Iteration 11: residual SS = 23.2959
Iteration 12: residual SS = 17.39864
Iteration 13: residual SS = 17.25244
Iteration 14: residual SS = 17.21558
Iteration 15: residual SS = 17.2151
Iteration 16: residual SS = 17.21509
Iteration 17: residual SS = 17.21508
Iteration 18: residual SS = 17.21508
Iteration 19: residual SS = 17.21508
Iteration 20: residual SS = 17.21508
```

Nonlinear regression

```
Number of obs =      80
R-squared      =    0.9705
Adj R-squared  =    0.9690
Root MSE      =    .4759351
Res. dev.     =   104.1309
```

pib	Robust HC2				
	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
/tec	.5949646	.1236964	4.81	0.000	.3486019 .8413273
/pk	.9041125	.101246	8.93	0.000	.7024637 1.105761
/rho	1.066592	.118866	8.97	0.000	.8298503 1.303334
/pl	-.1767477	.0475545	-3.72	0.000	-.2714608 -.0820346

### Apêndice A: Estimativa da elasticidade de substituição geral entre os insumos

Fonte: *Output* do Stata

```
. nl (pib = {tec=1}*({beta=0.5}*({alpha=0.5}*cap^{teta=1} + (1 - {alpha})*ener^{teta})^{-1/(teta)}^{-1.06 + (1 - {beta})*trab^{-1.06}^{-1}
> /1.06), hc2
```

```
Iteration 0: residual SS = 76.95778
Iteration 1: residual SS = 44.93785
Iteration 2: residual SS = 20.27993
Iteration 3: residual SS = 17.80485
Iteration 4: residual SS = 17.56999
Iteration 5: residual SS = 17.53757
Iteration 6: residual SS = 17.52102
Iteration 7: residual SS = 17.51986
Iteration 8: residual SS = 17.51946
Iteration 9: residual SS = 17.51938
Iteration 10: residual SS = 17.51936
Iteration 11: residual SS = 17.51935
Iteration 12: residual SS = 17.51935
```

Nonlinear regression

```
Number of obs =      80
R-squared      =    0.9700
Adj R-squared  =    0.9684
Root MSE      =    .4801227
Res. dev.     =   105.5325
```

pib	Robust HC2		t	P> t	[95% Conf. Interval]	
	Coef.	Std. Err.				
/tec	.566702	.207479	2.73	0.008	.1534718	.9799322
/beta	1.137413	.0301249	37.76	0.000	1.077414	1.197412
/alpha	.9816868	.1049432	9.35	0.000	.7726742	1.190699
/teta	1.091943	.0743053	14.70	0.000	.9439514	1.239935

## Apêndice B: Estimativa da elasticidade de substituição parcial entre capital e energia

Fonte: *Output* do Stata

```
. nl (pib = {tec=1}*({beta=0.5}*({alpha=0.5}*cap^{teta=1} + (1 - {alpha})*trab^{teta})^{-1/{teta}}^{-1.06} + (1 - {beta})*ener^{-1.06})^{-1}
> /1.06), hc2
```

```
Iteration 0: residual SS = 95.86604
Iteration 1: residual SS = 54.35228
Iteration 2: residual SS = 33.93374
Iteration 3: residual SS = 31.089
Iteration 4: residual SS = 30.93121
Iteration 5: residual SS = 30.91162
Iteration 6: residual SS = 30.90184
Iteration 7: residual SS = 30.89695
Iteration 8: residual SS = 30.89451
Iteration 9: residual SS = 30.8939
Iteration 10: residual SS = 30.89359
```

Nonlinear regression

```
Number of obs =      80
R-squared      =    0.9471
Adj R-squared  =    0.9443
Root MSE      =    .6375693
Res. dev.     =   150.9119
```

pib	Robust HC2		t	P> t	[95% Conf. Interval]	
	Coef.	Std. Err.				
/tec	.8884545	.1208171	7.35	0.000	.6478263	1.129083
/beta	.7058896	.1573673	4.49	0.000	.3924655	1.019314
/alpha	1.126597	.137504	8.19	0.000	.8527338	1.40046
/teta	.9203095	.1250763	7.36	0.000	.6711986	1.16942

## Apêndice C: Estimativa da elasticidade de substituição parcial entre capital e trabalho

Fonte: *Output* do Stata

```
. nl (pib = {tec=1}*({beta=0.5}*({alpha=0.5}*ener^{-(teta=1) + (1 - {alpha})*trab^{-(teta)}^-1/{teta})^-1.06 + (1 - {beta})*cap^-1.06)^-1
> /1.06), hc2
```

```
Iteration 0: residual SS = 61.57064
Iteration 1: residual SS = 54.80913
Iteration 2: residual SS = 50.95008
Iteration 3: residual SS = 48.31649
Iteration 4: residual SS = 48.01641
Iteration 5: residual SS = 47.97929
Iteration 6: residual SS = 47.96075
Iteration 7: residual SS = 47.95843
Iteration 8: residual SS = 47.95728
Iteration 9: residual SS = 47.9567
Iteration 10: residual SS = 47.95655
Iteration 11: residual SS = 47.95648
Iteration 12: residual SS = 47.95646
Iteration 13: residual SS = 47.95645
Iteration 14: residual SS = 47.95645
Iteration 15: residual SS = 47.95645
```

Nonlinear regression

```
Number of obs =      80
R-squared      =    0.9179
Adj R-squared  =    0.9135
Root MSE      =    .7943588
Res. dev.     =    186.0915
```

pib	Robust HC2				
	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
/tec	.8755024	.142647	6.14	0.000	.5913962 1.159609
/beta	-.0271013	.1666114	-0.16	0.871	-.3589367 .3047341
/alpha	-.0180312	5.982911	-0.00	0.998	-11.93403 11.89797
/teta	.9457859	.4892332	1.93	0.057	-.0286065 1.920178

Apêndice D: Estimativa da elasticidade de substituição parcial entre energia e trabalho  
 Fonte: *Output* do Stata