

A elasticidade de substituição entre capital-energia para países desenvolvidos e em desenvolvimento

Daiane Leal Santos¹

Thiago Costa Soares²

Recebido em: 04/11/2022

Aprovado em: 22/11/2022

Resumo: O objetivo deste trabalho é analisar o grau de substituição entre capital e energia para países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e países em desenvolvimento no período de 1990 a 2014. Para este fim, a função de produção CES (*Constant Elasticity of Substitution*) para dois fatores foi estimada por meio do método generalizado dos momentos (GMM - *Generalized Method of Moments*). Os principais resultados apontam elasticidade de substituição igual a 1,451 e 2,934 para os países da OCDE e das nações em desenvolvimento, respectivamente. Desse modo, capital e energia podem ser considerados substitutos imperfeitos, isto é, há possibilidades de trocas entre os fatores, porém, não é possível se especializar em apenas um deles. Diante desses achados, pode-se concluir que os custos de mitigação das emissões são possivelmente menores nas economias em desenvolvimento, visto que há maior oportunidade de substituição entre fatores.

¹ Graduada em Ciências Econômicas. Universidade Federal de Juiz de Fora, campus Governador Valadares. E-mail: leald07@hotmail.com.

² Professor Adjunto, Departamento de Economia, Universidade Federal de Juiz de Fora, campus Governador Valadares. E-mail: thiago.costa@ufff.br

Palavras-chave: Capital. Energia. Elasticidade de substituição. Função CES.

La elasticidad de sustitución entre capital-energía para países en desarrollo y en desarrollo

Resumen: El objetivo de este trabajo es analizar el grado de sustitución entre capital y energía para países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y países en vías de desarrollo en el período de 1990 a 2014. Para ello se utilizó la función de producción CES (Constant La elasticidad de sustitución) para dos factores se estimó utilizando el método generalizado de momentos (GMM). Los principales resultados apuntan a una elasticidad de sustitución igual a 1,451 y 2,934 para los países de la OCDE y los países en desarrollo, respectivamente. De esta forma, el capital y la energía pueden ser considerados sustitutos imperfectos, es decir, existen posibilidades de intercambio entre los factores, sin embargo, no es posible especializarse en uno solo de ellos. Dados estos hallazgos, se puede concluir que los costos de mitigar las emisiones son posiblemente más bajos en las economías en desarrollo, ya que existe una mayor oportunidad de sustitución entre factores.

Palabras clave: Capital. Energía. Elasticidad de reemplazo. Función ESC.

The Capital-Energy Substitution Elasticity for Developed and Developing Countries

Abstract: This paper aims to analyze the capital-energy substitution by considering Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) members and development countries between 1990 and 2014. For this purpose, two-factors Constant Elasticity of Substitution (CES) production function was estimated by using Generalized Method of Moments (GMM). The results indicate that substitution elasticities are 1.4506 and 2.934 for OECD countries and development nations, respectively. Therefore, capital and energy can be considered imperfect substitutes, i.e., there exist degree of substitution, however, it is not possible to specialize in only one of them. We concluded that emissions

mitigation costs are lower in developing economies, since there is a greater possibility of reallocate inputs into the production process.

Keywords: Capital. Energy. Elasticity of substitution. CES function.

1 Introdução

O consumo de energias fósseis e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) cresceram substancialmente nas últimas décadas. Segundo dados do Banco Mundial (2018), as taxas de crescimento dessas variáveis foram de 2,10% e 1,55%, respectivamente, entre 1990 e 2014. Os relatórios do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2013) mostram que esses indicadores possuem relação estreita com o aquecimento global e suas consequências.

Com o intuito de mitigar os problemas ambientais, a comunidade internacional, por meio da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (*United Nations Framework Convention on Climate Change*- UNFCCC), ratificou protocolos que estabelecem metas de redução para as emissões de GEE a nível mundial. Um dos caminhos apontados é a conservação energética, principalmente em economias com rápido crescimento econômico e demográfico (ADETUTU, 2014).

Particularmente, a redução do consumo de energias primárias depende da rigidez da matriz energética de cada país, dentre outros fatores. Por exemplo, nações com matrizes intensivas em combustíveis fósseis naturalmente irão demandar mais energias com potencial para emitir GEE (IPCC, 2013). Desse modo, é possível dizer que a pluralidade da oferta de energia tem associação direta com a capacidade de abatimento das emissões de poluentes.

A flexibilidade da matriz pode ser medida pelas possibilidades de troca entre os fatores do processo produtivo. Concretamente, se os insumos de produção forem altamente dependentes (capital e energia

fóssil), pode-se afirmar que o investimento é intensivo em energias primárias. Neste caso, políticas de mitigação seriam custosas em termos econômicos (KEMFERT, 1998).

Por outro lado, se a economia demonstra capacidade para substituir energias fósseis por capital (por exemplo, expandindo o uso de energias renováveis para manter o investimento), certamente as nações poderiam atingir as metas ambientais propostas nos acordos internacionais com maior facilidade. De fato, o grau de substituição entre capital e energia fóssil tem revelada importância para as políticas econômicas e ambientais.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é analisar o grau de substituição entre capital e energias primárias em uma amostra composta por 109 países desenvolvidos e em desenvolvimento, no período de 1990 a 2014. Investigar a substituição entre os fatores pode ser importante para a condução de políticas de mitigação das emissões, especialmente as ações orientadas ao consumo energético.

Desde a década de 1970, pesquisas foram conduzidas a fim de entender a alocação da energia na produção. As principais evidências apontam que as possibilidades de trocas dependem do contexto analisado. Com dados de indústrias de países desenvolvidos, Griffin e Gregory (1976), Pindyck (1979) e Kemfert (1998) verificaram que existe viabilidade na troca dos insumos na produção. Por outro lado, com dados da indústria canadense, Fuss (1977) chegou à conclusão de que capital e energia são complementares (não há possibilidades de substituição). Adetutu (2014) também encontrou divergências entre os insumos serem complementares ou substitutos em uma amostra de países produtores de petróleo.

Em termos estruturais, é relevante ressaltar que países desenvolvidos e em desenvolvimento possuem diferenças substanciais nos processos produtivos. Com efeito, a análise do grau de substituição deve levar em consideração essa distinção. Nesse sentido, este estudo

procura avançar ao realizar análises para países desenvolvidos (membros da OCDE) e em desenvolvimento, separadamente.

A pesquisa está dividida em outras cinco seções, além desta introdução. A seção 2 apresenta a literatura sobre a elasticidade de substituição entre capital e energia. A seção 3 descreve os modelos, teórico e empírico, utilizados para estimar e analisar a relação entre capital e energia. A seção 4 reporta a metodologia adotada e a fonte de dados utilizada. Os resultados e discussões são apresentados na seção 5. Finalmente, a seção 6 conduz as considerações finais da pesquisa.

2 Revisão da literatura empírica

Estudos empíricos sobre a relação entre capital e energia na produção são encontrados na literatura econômica desde a década de 1970. Um dos trabalhos pioneiros foi o estudo de Griffin e Gregory (1976), que estimaram uma função de custo translog para o setor de produção de energia de nove países industrializados entre 1955 e 1969. Os autores encontraram possibilidades de substituição entre os fatores. Posteriormente, Pindyck (1979) encontrou resultados semelhantes com dados de séries temporais para amostras de indústrias de dez países. Ao contrário desses achados, Fuss (1977) fez uma análise da demanda de energia na indústria canadense e observou relações de complementaridade entre capital-energia.

Diante das divergências encontradas na época, Griffin e Gregory (1976) argumentaram que estimativas com dados de corte transversal representam relacionamentos de longo prazo entre as variáveis, com isso capital e energia tendem a ser substitutos. Em contrapartida, as estimativas com dados de séries temporais refletem com maior êxito o curto prazo, situação na qual a relação entre fatores inclina-se para a complementariedade. Assim, pode-se dizer que parte da discordância entre os trabalhos é atribuída à conjuntura do estudo realizado.

A partir do final da década de 1990, outros estudos foram realizados com o intuito de obter respostas mais conclusivas da relação capital-energia. Utilizando dados de séries temporais para a indústria alemã de forma agregada e desagregada, Kemfert (1998) estimou as elasticidades de substituição capital-energia por meio da função de produção CES e concluiu que os parâmetros estão situados entre zero e um (substitutos imperfeitos). Resultados similares foram encontrados por Kemfert e Welsch (2000) com dados da economia deste país.

Na mesma linha de pesquisa, Zha e Ding (2014) estimam uma função de custo translog cujos coeficientes foram usados para observar o grau de substituição capital e energia para a indústria energética chinesa. Os resultados mostraram que há possibilidades de substituição entre capital e energia.

Arnberg Bjørner (2007) utilizaram um painel de empresas do setor manufatureiro da Dinamarca a fim de analisar a substituição capital-energia e encontraram relações de complementaridade entre eles. Os autores concluíram que é necessário reduzir o uso de ambos os fatores (capital e energia) para diminuir as emissões de CO₂ neste país.

Adetutu (2014) estimou uma função de custo translog para analisar as possibilidades de substituição entre capital e energia em economias selecionadas. De acordo com os resultados do estudo, a elasticidade de substituição dos fatores sugere que energia e capital são substitutos para Argélia e Arábia Saudita, mas encontrou-se complementaridade para o Irã e a Venezuela. Nesse sentido, o autor concluiu que políticas energéticas destinadas a reduzir o consumo ou à conservação energética terão maior custo no Irã e na Venezuela, uma vez que a energia não poderia ser substituída pelo capital com facilidade.

Costantini e Paglialunga (2014) investigaram a elasticidade de substituição entre energia e capital em dez setores de fabricação para 21 países da OCDE, de 1970 a 2008. As autoras encontraram que os valores das elasticidades para setores de produção específicos são altamente heterogêneos em relação ao valor de elasticidade no agregado.

Neste contexto, esta pesquisa busca se inserir na literatura, fornecendo evidências da relação capital-energia ao considerar uma amostra temporal e individual mais ampla. Neste caso, busca-se investigar o grau de flexibilidade produtiva analisando, especificamente, amostras de países desenvolvidos e em desenvolvimento.

3 Interpretação teórica e modelo empírico

A elasticidade de substituição entre capital e energia é questão relevante no debate ambiental, uma vez que a flexibilidade da estrutura produtiva pode indicar o caminho que as economias deverão percorrer para reduzir os impactos ambientais do crescimento econômico (KOETSE; GROOT; FLORAX, 2008).

De acordo com Varian (1992), elasticidade de substituição é um conceito microeconômico aplicado para medir o grau de variação percentual entre dois insumos quando a taxa marginal de substituição técnica (TMST) entre os fatores varia, em percentual. A TMST revela a inclinação de uma isoquanta que, por sua vez, expressa a combinação de fatores (neste caso, capital e energia) que resulta na mesma quantidade produzida. Formalmente, a TMST é dada por:

$$TMST = -\frac{\Delta k}{\Delta e}. \quad (1)$$

Assim, se os preços relativos dentro do sistema econômico se alteram, a reação pode ser percebida por meio desse indicador. Desse modo, a possibilidade de substituição entre os fatores pode ser representada pela elasticidade de substituição.

No contexto desta pesquisa, quando uma economia apresenta elasticidade de substituição baixa e há um aumento no preço dos combustíveis fósseis, a taxa de crescimento do capital tende a declinar.

Por outro lado, se uma política é adotada em um ambiente onde a elasticidade de substituição é alta, a taxa de crescimento do capital poderá ser mantida caso os agentes invistam em setores menos intensivos em combustíveis fósseis (BERNDT; WOOD, 1979). Assim, o grau da elasticidade entre capital-energia é importante no que se refere à condução de políticas ambientais, pois a relação entre os fatores pode influenciar os custos de mitigação das emissões de poluentes.

Diversos modelos econométricos utilizam a função CES para obter estimativas do indicador de elasticidade de substituição capital-energia. Kemfert (1998) e Kemfert e Welsch (2000) adotaram os modelos aninhados da função CES para capital, trabalho e energia para o setor industrial. Porém, a estimação da função é complexa e dificulta a interpretação dos resultados encontrados. Diante disso, Arnberg e Bjorner (2007) e Adetutu (2014) optaram por estimar uma função translog para obter estimativas da elasticidade de substituição, mas, nesse caso, são requeridas informações sobre os preços dos fatores, o que não é trivial quando a variável energia se encontra em amostras agregadas.

Neste trabalho, a função CES para dois fatores - capital e energia - assume a seguinte especificação:

$$y_{i,t} = A \left[\alpha k_{i,t}^{-\rho} + (1-\alpha) e_{i,t}^{-\rho} \right]^{-\nu/\rho}, \quad (2)$$

em que A é o parâmetro de tecnologia e deve ser maior que zero; k representa o capital (por trabalhador); e representa a energia (por trabalhador); y é o produto (por trabalhador) do i -ésimo país, no tempo $t = 1, 2, \dots, T$; α , ν e ρ são parâmetros. O parâmetro α representa a parcela do capital no sistema produtivo e deve estar situado entre $0 < \alpha < 1$, enquanto ν é equivalente à escala produtiva e deve ser maior que zero, já o parâmetro ρ caracteriza a relação entre os fatores e deve estar situado entre $-1 \leq \rho \leq \infty$.

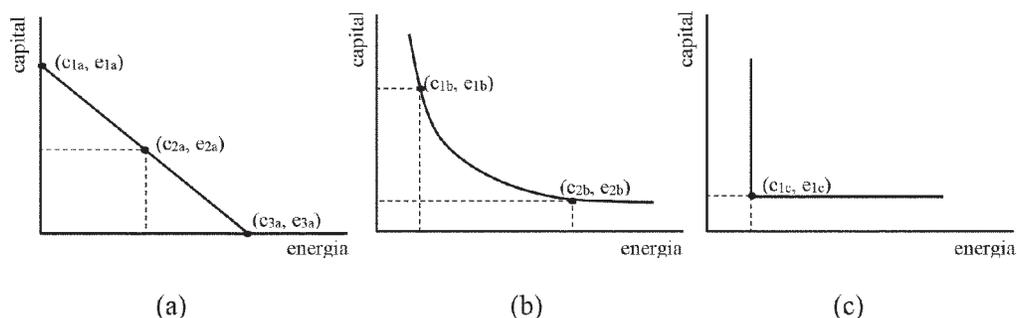
Os insumos da função CES foram ponderados pelo fator trabalho. Assim, a interpretação do modelo se dá em termos produtivos. Ou seja, os parâmetros capturam as variações que ocorrem na razão capital por trabalho/energia por trabalho para dada alteração nos preços relativos.

Da teoria da produção são conhecidas principalmente as funções lineares, Cobb-Douglas e Leontief. As curvaturas de cada uma das isoquantas dessas funções podem ser definidas segundo a convergência do parâmetro ρ . Para Hicks (1970) a elasticidade de substituição (σ) capital-energia pode ser alcançada da seguinte forma:

$$\sigma = \frac{1}{1 + \rho}. \quad (3)$$

Desse modo, se ρ tender para menos um, a elasticidade de substituição tenderá ao infinito e a função CES convergirá para uma função linear. Se ρ tender para zero, a elasticidade de substituição será igual a um e a CES se transformará em uma Cobb-Douglas. Por fim, se ρ tender para o infinito, a elasticidade de substituição será igual a zero e a função seguirá o tipo Leontief. A Figura 1 apresenta graficamente essas notações.

Figura 1: Funções de produção Linear (a), Cobb-Douglas (b) e Leontief (c)



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 1 (a), capital e energia são substitutos perfeitos e indicam a possibilidade de especialização em apenas um fator. Na Figura 1 (b), os fatores de produção capital-energia são substitutos imperfeitos, ou seja, não é possível a especialização em apenas um fator, porém, tem-se certo grau de substituição entre eles. Já na Figura 1 (c), capital e energia são complementares perfeitos; nesse caso, têm-se proporções mínimas estabelecidas para utilização desses fatores na economia e não há possibilidade de redução da quantidade de apenas um dos fatores.

Para fins de estimação, Kmenta (1967) apresentou uma especificação linearizada da função CES baseada na expansão de Taylor na primeira ordem em torno do ponto $\rho = 0$:

$$\log(y_{i,t}) = \log(A_i) + \alpha v \log(k_{i,t}) + (1 - \alpha) \alpha_1 v \log(e_{i,t}) - \frac{1}{2} \rho v \alpha (1 - \alpha) [\log(k_{i,t}) - \log(e_{i,t})]^2 + u_{i,t}. \quad (4)$$

A equação (4) é a forma empírica linearizada da função (2); $u_{i,t}$ é o erro aleatório independente e identicamente distribuído com média zero e variância σ_u^2 .

4 Metodologia

4.1 Método de Estimação

Para estimar os parâmetros da equação (4) optou-se por técnicas de dados em painel. Os dados em painel são um tipo especial de dados que combinam unidades de corte transversal e dados temporais. A estrutura em painel melhora as propriedades estatísticas do modelo, pois há maior variabilidade de informações e graus de liberdade. Além

disso, é possível controlar características não observáveis das unidades que são constantes no tempo, como a estrutura tecnológica, política e cultural dos países, entre outras (WOOLDRIDGE, 2015).

Os métodos *pooled*, de efeitos fixos (EF) e de efeitos aleatórios (EA) são os estimadores mais utilizados. No *pooled*, características específicas não observáveis de cada país são desconsideradas. Desse modo, caso essas especificidades existam, o método *pooled* poderá apresentar erro de especificação, viés e inconsistência.

Os métodos de EA e EF podem estimar as características individuais, não observáveis e constantes no tempo de cada país. No primeiro, essa estimação é realizada através do termo de erro. Contudo, se houver relação entre esses fatores e qualquer regressor (capital e energia), o modelo poderá apresentar viés e inconsistência. O estimador EF, por seu turno, estima a heterogeneidade não observável por meio de *dummies* ou transformações feitas nos dados. Esse estimador é consistente, porém, possui variância maior que o estimador EA quando as especificidades não observáveis são independentes dos regressores. Para verificar a especificação mais adequada aos dados, estimaram-se os testes de Chow (*pooled* contra EF), Breusch-Pagan (*pooled* contra EA) e Hausman (EA contra EF)³.

Além da questão da especificação, é importante ressaltar que problemas de viés e inconsistência dos estimadores podem ocorrer na estimação de funções de produção em virtude da possível endogeneidade dos regressores. Olley e Pakes (1996) argumentam que a decisão sobre a quantidade empregada de insumos depende da expectativa da produtividade do processo. Assim, a endogeneidade surge da correlação entre a produtividade e a demanda por fatores.

Diante disso, optou-se por estimar os parâmetros da CES pelo método generalizado dos momentos (GMM). O método GMM é baseado em funções de momentos que dependem de parâmetros desconhecidos

³ Mais detalhes dos testes podem ser vistos em Gujarati (2011).

e variáveis instrumentais. A condição de momento é definida como:

$$E\left[g(w_{i,t}, \theta)\right] = 0, \quad (5)$$

em que $w_{i,t}$ é o vetor de variáveis instrumentais; θ é o vetor de parâmetros desconhecidos e g representa a função de momentos. A função de momentos estimada foi:

$$E\left[W'_{i,t}(Y_{i,t} - X_{i,t}\beta)\right] = 0 \quad (6)$$

Nesse caso, $Y_{i,t}$ representa o vetor da variável dependente e $X_{i,t}$, representa a matriz com as variáveis independentes.

Testaram-se instrumentos baseados nas variáveis explicativas defasadas, em nível e na primeira diferença. A validade dos instrumentos foi averiguada pelo procedimento de Sargan, que possui como hipótese nula a adequação do modelo instrumentalizado.

4.2 Fonte de dados

Para representar a produção, considerou-se o produto interno bruto (PIB) em dólares americanos. Para o capital, empregou-se a variável formação bruta de capital em dólares. Considerou-se como capital investimentos em adições e melhorias de terras, compras de plantas, máquinas, equipamentos, construção de estradas, ferrovias, escolas hospitais e outras. Os dados do PIB e da formação bruta de capital foram deflacionados em dólares norte-americanos pelo Índice de Preços ao Consumidor (IPC) e considerados pela Paridade do Poder de Compra (PPC). Em relação à energia, considerou-se a produção e as importações de energias primárias, como o carvão, o petróleo e o gás

natural, entre outros. Esta variável foi construída e disponibilizada pelo Banco Mundial⁴.

O conjunto de dados foi constituído de um painel composto por 32 países da OCDE e 77 países em desenvolvimento⁵ no período de 1990 a 2014, totalizando 2.725 observações. Os dados foram coletados do Banco Mundial. A amostra foi selecionada de acordo com a disponibilidade das informações.

5 Resultados e discussões

Inicia-se realizando uma análise em toda a amostra. Como há possibilidades de capital e energia terem sido afetados por processos de tendência estocástica ao longo do tempo, foram realizados testes de raiz unitária para verificar se as séries são estacionárias na média e na covariância. Os resultados apontaram a rejeição da hipótese de raiz unitária (ver Apêndice 1A).

Os testes de Chow, Breusch-Pagan e Hausman também foram

⁴ O modelo teórico pressupõe que o capital é do tipo “estoque” e homogênea entre as unidades. Por outro lado, a adoção dessa variável torna-se inviável neste contexto em razão da diversidade produtiva e tecnológica dos países. Como alternativa, adotou-se a “formação bruta de capital fixo”, a qual pode ser considerada um fluxo que se deriva do próprio estoque de capital (SHASHÚA; MELNIK; GOLDSCHMIDT, 1974).

⁵ Albânia, Alemanha, Angola, Arábia Saudita, Argélia, Argentina, Armênia, Austrália, Áustria, Azerbaijão, Bahrain, Bangladesh, Belarus, Bélgica, Benin, Bolívia, Botsuana, Brasil, Brunei, Darussalam, Bulgária, Camarões, Canadá, Cazaquistão, Chile, China, Chipre, Cingapura, Colômbia, Congo, Dem. Rep., Congo, Rep., Coreia, Rep., Costa do Marfim, Cuba, Dinamarca, Egito, Rep. Árabe, El Salvador, Equador, Espanha, Estados Unidos, Federação Russa, Filipinas, Finlândia, França, Gabão, Gana, Geórgia, Grécia, Guatemala, Honduras, Hong Kong SAR, China, Hungria, Iêmen, Rep., Índia, Indonésia, Irã, Rep. Islâmica, Irlanda, Islândia, Israel, Itália, Japão, Jordânia, Líbano, Luxemburgo, Macedônia, ARJ., Malásia, Malta, Marrocos, Maurício, México, Moçambique, Mongólia, Namíbia, Nepal, Nicarágua, Nigéria, Noruega, Nova Zelândia, Omã, Países Baixos, Panamá, Paquistão, Paraguai, Peru, Polónia, Portugal, Quênia, Reino Unido, República Checa, República do Quirguizistão, República Dominicana, República Eslovaca, România, Senegal, Sri Lanka, Sudão, Suécia, Suíça, Tailândia, Tajiquistão, Tanzânia, Trinidad e Tobago, Tunísia, Turcomenistão, Ucrânia, Uruguai, Uzbequistão, Venezuela, RB., Vietnã e Zimbábue.

adotados para averiguar qual a especificação mais adequada para estimar o modelo (efeitos fixos ou aleatórios). Esses procedimentos são importantes para apurar se as características não observáveis, fixas no tempo, existem e se há correlação entre elas e os fatores. Os testes mostraram que o método de efeitos fixos foi o mais adequado para estimar a função de produção (ver nota abaixo da Tabela 1). Todos os modelos estimados apresentaram estatística de Sargan não significativa, indicando a validade dos instrumentos adotados e a adequação do modelo empírico. As estimativas do modelo empírico utilizando o método de EF e GMM para a amostra completa são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados das estimativas da função CES para a amostra completa

Coeficientes	EF	GMM
	(1)	(2)
α	0,6250*** (0,1840)	0,6840*** (0,0242)
ν	0,6303*** (0,0227)	0,6583*** (0,0203)
ρ	-0,7692*** (0,0878)	-0,6987*** (0,1286)
Constante	4,7566*** (0,1840)	4,5133*** (0,1633)
σ	4,3334	3,3197
J - Sargan	-	0,2658 ^{NS} (0,6061)
R ²	0,985	0,987

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: *** Significativo a 1%; NS: Não significativo; Entre parênteses estão os desvios-padrão; EF: Estimador de efeitos fixos (não considera a endogeneidade dos fatores); GMM: Estimador obtido pelo método generalizado dos momentos com efeitos fixos (considera a endogeneidade dos fatores). Teste de Hausman: Chi-sq = 10,03 (valor-p: 0,006).

Pode-se observar que os modelos estão bem ajustados (coeficientes de determinação elevados) e que os parâmetros estimados são significativos. Para o método de efeitos fixos, o capital apresenta participação de 0,6250 e a energia de 0,375. Pelo método GMM, para o capital o valor da participação é de 0,6840 e o da energia é de 0,316. Portanto, por ambos os métodos, a produção reage mais ao capital do que à energia.

As estimativas realizadas revelam elasticidades de substituição entre os fatores superiores a um, assim, capital e energia podem ser considerados substitutos imperfeitos. O parâmetro σ representa a elasticidade de substituição entre os fatores. Seu valor mostra que, ao elevar a TMST em torno de 10%, os países aumentariam em 33,19%, em média, a razão capital-energia, considerando os resultados do método GMM. Nesse caso, quando a TMST se eleva os agentes se adaptam a fim de aprimorar a maneira como capital e energia estão sendo utilizados.

Caso alguma política, por exemplo, de tarifação sobre a energia primária, seja implementada em uma economia com diversidade de bens e serviços e capitais intensivos/não intensivos em energia, a distribuição dos investimentos voltados para o capital menos intensivo pode sofrer alteração.

Na perspectiva do exemplo citado (elevação da tarifa sobre os combustíveis fósseis), há três formas de se alterar a relação capital-energia. A primeira delas é manter o nível de energia constante e expandir a quantidade de capital não intensivo; com isso os recursos disponíveis seriam destinados a investimentos mais limpos. A segunda forma é manter o capital constante e reduzir a demanda por combustíveis fósseis. Nesse caso, os agentes poderiam optar por utilizar energias renováveis. Por fim, a terceira forma seria expandir o uso do capital menos intensivo e substituir a energia primária por energia renovável. Portanto, esse tipo de política poderia impulsionar o uso de energias renováveis e reduzir a dependência de combustíveis fósseis do capital na economia.

Ao longo do tempo, a magnitude do parâmetro da elasticidade de

substituição pode ser impactada pelo avanço tecnológico. Com o propósito de entender a evolução temporal do parâmetro, foram estimados modelos em três subamostras: a primeira compreende aos anos de 1990 a 1997; a segunda, de 1998 a 2005; e a terceira, de 2006 a 2014. Os resultados dos parâmetros estimados pelo método GMM podem ser verificados na Tabela 2.

A parte (a) da Tabela 2 apresenta os parâmetros do modelo, enquanto a parte (b) expõe as taxas de crescimento da produção, do capital e da energia. Em relação à elasticidade de substituição (σ) capital-energia, observa-se que a variável apresentou trajetória crescente (de 1,1961 entre 1990 a 1997, para 3,2384 no período de 2006 a 2014).

Tabela 2: Resultados das estimativas da função CES em subamostras e as taxas de crescimento das variáveis

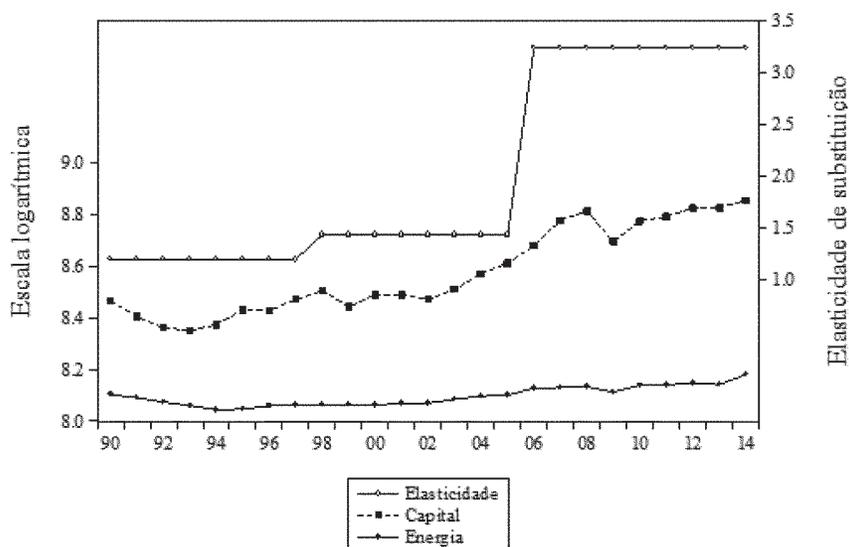
<i>Parte (a): Estimativas da função CES</i>			
Coefficientes	1990 1997	1998 2005	2006 2014
α	0,3233*** (0,0837)	0,4215*** (0,0428)	0,4228*** (0,0487)
ν	0,6369*** (0,1711)	0,6699*** (0,0482)	0,5348*** (0,0380)
ρ	-0,1639 ^{NS} (0,5697)	-0,3285*** (0,0959)	-0,6912*** (0,1202)
σ	1,1961	1,4292	3,2384
R ²	0,9972	0,9970	0,9970
J-Sargan	1,0737 ^{NS} (0,300)	0,9126 ^{NS} (0,3394)	0,7356 ^{NS} (0,3910)
<i>Parte (b): Taxas de crescimento</i>			
Variáveis	1990 1997	1998 2005	2006 2014
Capital	0,47%	1,68%	1,52%
Energia	-0,59%	0,56%	0,28%
Produção	0,01%	1,96%	1,58%

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: A constante foi suprimida por economia de espaço. *** Significativo a 1%; NS: Não significativo. Entre parênteses estão os desvios-padrão.

Esse resultado aponta que os fatores estão se tornando mais elásticos ao longo do tempo. Quanto às taxas de crescimento, pode-se perceber que o capital cresceu mais rapidamente que a energia nas três subamostras (ver Figura 2).

Figura 2: Trajetória temporal do capital, da energia e da elasticidade de substituição, 1990-2014



Fonte: Resultados da pesquisa.

Na Figura 2, o eixo vertical esquerdo refere-se aos valores do capital e da energia em logaritmo. O eixo vertical direito representa os valores da elasticidade de substituição entre os fatores. Como pode-se perceber, a distância entre as trajetórias do capital e a energia vem se tornando maior ao longo do tempo. Isto indica que a elasticidade de substituição aumentou e que os investimentos dependem cada vez menos da energia. Traçando um paralelo com a questão ambiental, os resultados apontam que os custos de mitigação das emissões estão diminuindo.

Para tecer análises mais específicas para países desenvolvidos e

em desenvolvimento, estimou-se o modelo empírico pelo método GMM em amostras compostas pelos membros da OCDE (desenvolvidos) e pelos países em desenvolvimento. A Tabela 3 apresenta as estimativas.

Tabela 3: Resultados das estimativas da função CES para países desenvolvidos e em desenvolvimento

Coefficientes	OCDE (a)	Países em Desenvolvimento (b)
Constante	3,8341*** (0,3963)	3,9726*** (0,1738)
α	0,7115*** (0,0423)	0,6477*** (0,0251)
ν	0,7680*** (0,0437)	0,7045*** (0,0229)
ρ	-0,3107 ^{NS} (0,2841)	-0,6599*** (0,1269)
σ	1,4506	2,9399
J-statistic	1,2889 ^{NS}	2,3623 ^{NS}
R ²	0,9456	0,9774

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: *** Significativo a 1%; NS: Não significativo; Entre parênteses estão os desvios-padrão.

Os modelos mostraram-se bem ajustados, visto que o coeficiente de determinação foi elevado. A participação do capital no produto foi de 0,7115 e 0,6477 para os países da OCDE e os em desenvolvimento, respectivamente. Ou seja, a importância do capital é maior nos países desenvolvidos.

No que diz respeito à elasticidade de substituição, as estimativas, tanto para países da OCDE (1,4506) quanto para países em desenvolvimento (2,9399), mostram que os fatores são substitutos imperfeitos. Deve-se destacar ainda que a grandeza numérica do parâmetro aponta que há maior possibilidade de troca entre os fatores na amostra de países em desenvolvimento.

Este resultado pode ser parcialmente explicado pela heterogeneidade tecnológica das nações. Chiu *et al.* (2012) argumentam que países desenvolvidos normalmente adotam tecnologias mais avançadas. Assim, a intensidade energética dos investimentos poderia ser mais rígida nesses países, visto que seria necessário um novo salto tecnológico para observar reduções expressivas da variável.

Por outro lado, os países em desenvolvimento aproveitam-se da tecnologia já disponível e passam a incorporá-la gradualmente em seu processo produtivo. Com isso, haverá mais oportunidades para substituir capitais intensivos por investimentos mais limpos. Dados do Bando Mundial (2018) confirmam que, de fato, a intensidade energética dos países em desenvolvimento (-3,15%) decresceu mais rapidamente que a dos membros da OCDE (-1,96%).

6 Conclusões

Este trabalho buscou se inserir na literatura ao analisar as possibilidades de troca entre capital e energia em uma amostra de 109 países (desenvolvidos e em desenvolvimento) entre os anos de 1990 a 2014. Os principais resultados revelaram que os fatores são substitutos imperfeitos com elasticidade acima da unidade.

A substituição entre capital e energia tem implicações importantes para a condução de políticas específicas, por exemplo, a tarifação sobre energias fósseis. Concretamente, elevações de preços nos combustíveis fósseis em um ambiente com possibilidades de substituição elevaria a proporção de energias renováveis nos processos produtivos. Ademais, espera-se que os investimentos em tecnologias poupadoras de energia aumentem, visto que os agentes buscarão reduzir os custos de produção. A dificuldade para estabelecer políticas como a citada está em alinhar objetivos econômicos e ambientais mundialmente.

Outro ponto importante foi a magnitude dos parâmetros estimados. Observou-se que o grau de substituição das nações em desenvolvimento foi maior que o das nações membros da OCDE. Como foi argumentado, países desenvolvidos estão mais propensos a adotarem tecnologias mais avançadas no processo de produção. Com efeito, seria necessário que a fronteira tecnológica se deslocasse para melhorar a combinação dos fatores, *ceteris paribus*. Em contrapartida, as nações menos desenvolvidas ainda estão distantes tecnologicamente da fronteira. Por essa razão, abre-se possibilidades de trocas enquanto as tecnologias existentes estão sendo gradativamente integradas.

Na perspectiva dos problemas ambientais, conclui-se que os custos de mitigação das emissões são menores nas economias em desenvolvimento, visto que há maior possibilidade de substituir processos intensivos em arranjos produtivos mais limpos. Internalizar tecnologias limpas seria o caminho natural que esses países deveriam percorrer.

Por outro lado, deve-se destacar que os países desenvolvidos continuam tendo papel principal no quadro ambiental por ao menos duas razões. Primeiro, significativa parcela dos problemas ambientais atuais está relacionada com a trajetória passada de crescimento pela qual atravessaram os países ricos, uma vez que, no período de amadurecimento econômico, não houve restrições ambientais para essas nações. Segundo, os principais emissores de poluentes a nível mundial continuam sendo os países desenvolvidos. Portanto, cabe a esses países a responsabilidade de elevar as possibilidades de substituição entre fatores por meio do progresso técnico.

Referências

ADETUTU, M. O. Energy efficiency and capital-energy substitutability: Evidence from four OPEC countries. *Applied Energy*, n. 119, p. 363-370, 2014.

ARNBERG, Søren; BJØRNER, Thomas Bue. Substitution between energy, capital and labour within industrial companies: A micro panel data analysis. *Resource and Energy Economics*, v. 29, n. 2, p. 122-136, 2007.

BANCO MUNDIAL. World Bank Group, 2015. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/>>. Acesso em: maio 2018.

BERNDT, Ernst R.; WOOD, David O. Engineering and econometric interpretations of energy-capital complementarity. *The American Economic Review*, v. 69, n. 3, p. 342-354, 1979.

CHIU, Sung Nok et al. *Stochastic geometry and its applications*. John Wiley & Sons, 2013.

COSTANTINI, V.; PAGLIALUNGA, E. Elasticity of substitution in capital-energy relationships: how central is a sector-based panel estimation approach? *SEEDS WP*, v.13, 2014.

FUSS, Melvyn A. The demand for energy in Canadian manufacturing: An example of the estimation of production structures with many inputs. *Journal of econometrics*, v. 5, n. 1, p. 89-116, 1977.

GRIFFIN, J.M.; GREGORY, P.R. An intercountry translog model of energy substitution responses. *The American Economic Review*, v. 66, n. 5, p. 845-857, 1976.

GUJARATI, Damodar N; PORTER, Dawn C. *Econometria basica*. 5. ed. Rio de Janeiro: AMGH, 2011.

HICKS, John. Elasticity of substitution again: substitutes and complements. *Oxford economic papers*, v. 22, n. 3, p. 289-296, 1970.

IPCC (2013) INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. et al. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

KEMFERT, Claudia. Estimated substitution elasticities of a nested CES production function approach for Germany. *Energy Economics*, v. 20, n. 3, p. 249-264, 1998.

KEMFERT, Claudia; WELSCH, Heinz. Energy-capital-labor substitution and the economic effects of CO₂ abatement: evidence for Germany. *Journal of Policy Modeling*, v. 22, n. 6, p. 641-660, 2000

KMENTA, J. On estimation of the CES production function. *International Economic Review*, v. 8, n. 2, p. 180-189, 1967.

KOETSE, Mark J.; DE GROOT, Henri LF; FLORAX, Raymond JGM. Capital-energy substitution and shifts in factor demand: A meta-analysis. *Energy Economics*, v. 30, n. 5, p. 2236-2251, 2008.

OLLEY, G. S.; PAKES, A. The dynamics of productivity in the telecommunications equipment industry. *Econometrica*, v. 64, n. 6, p. 1263-1297, 1996.

PINDYCK, Robert S. Interfuel substitution and the industrial demand for energy: an international comparison. *The Review of Economics and Statistics*, p. 169-179, 1979.

SHASHUA, L.; MELNIK, A.; GOLDSCHMIDT, Y. A note on stock and flow capital inputs in the production function of multi-product firms. *Applied Economics*, v. 6, n. 3, p. 229-233, 1974.

VARIAN, H. R. *Microeconomic Analysis*, WW Norton & Company. Inc, New York, New York, 1992.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. *Introductory econometrics: A modern approach*. Cengage learning, 2015.

ZHA, Donglan; DING, Ning. Elasticities of substitution between energy and non-energy inputs in China power sector. *Economic Modelling*, v. 38, p. 564-571, 2014.

Apêndice

Tabela A1: Testes de raiz unitária, séries em nível

Teste/Variável	lnPIBpc	lnCAPpc	lnENEpc
Levin, Li e Chu	-9,48***	-2,86***	-5,58***
Im, Pesaran e Shin	-1,75**	-3,34***	-0,49 ^{NS}
ADF-Fisher	344,65***	303,08***	282,82***
PP-Fisher	344,32***	312,21***	373,71***

Fonte: Resultados da pesquisa.

Notas: *** significância de 1%; ** significância de 5%; NS: não significativo a 10%; TC = Teste realizado com constante e tendência determinística.

