

A elasticidade de substituição capital-energia: uma análise internacional

Thiago Costa Soares*

Elaine Aparecida Fernandes**

Resumo: O objetivo deste estudo foi estimar e analisar a elasticidade de substituição entre capital e energia (fóssil) para uma amostra de 111 países, entre 1990 e 2014. Para tanto, estimou-se a aproximação da função de produção *Constant Elasticity of Substitution* (CES), proposta por Kmenta (1967), por meio do método dos momentos generalizados (*generalized method of moments* – GMM). Os principais resultados revelam que capital e energia são substitutos imperfeitos e, por isso, sempre serão usados em quantidades positivas na produção. Além disso, observou-se que a elasticidade capital-energia vem aumentando ao longo do tempo, o que indica possíveis reduções nos custos de mitigação associados ao uso dos recursos esgotáveis. Conclui-se que políticas de tarifação sobre energias primárias poderiam alterar a dotação dos insumos na economia em favor dos investimentos menos intensivos.

Palavras-chave: elasticidade de substituição, capital, energia, função CES

Abstract: This paper aims to estimate and analyze the elasticity of substitution between capital and non-renewable energies in a sample composed by 111 countries. For this, a production function “constant elasticity of substitution (CES)” was estimated by using the generalized method of moments (GMM). The CES linear approach proposed by Kmenta (1967) was used. The main results show that capital and energy are imperfect substitutes and, therefore, there exist substitution possibilities. In addition, it has been observed that the elasticity’s path has increased over time, which indicates reductions in mitigation costs associated with fossil resources. The findings highlight that tax policies on non-renewable resources might change factor allocation in favor of less intensive investments.

Keywords: elasticity of substitution; capital; energy; CES function

* Professor do Departamento de Economia, Universidade Federal de Juiz de Fora, *campus* Governador Valadares (UFJF-GV), Governador Valadares, Minas Gerais, Brasil. E-mail: thiago.costa@ufjf.edu.br.

** Professora do Departamento de Economia, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brasil. E-mail: eafernandes@ufv.br.

1. Introdução

Os problemas ambientais provenientes do crescimento da atividade econômica mundial ganharam grande notoriedade nas discussões internacionais. Entre as questões mais debatidas estão a diminuição da biodiversidade e as mudanças dos parâmetros climáticos, cuja ocorrência possui estreita relação com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, 2013).

Tratando-se de emissões antrópicas de poluentes, dados mostram que o uso de energias primárias não renováveis (combustíveis fósseis) se apresenta como importante motor das emissões de GEE. De acordo com o 5º relatório do IPCC (2013), a participação relativa desse recurso nas emissões totais gira em torno de 60%. Por essa razão, a conservação energética é vista como importante pilar para reduzir as pressões sobre o meio ambiente (HENRIKSSON, SÖDERHOLM e WÄRELL, 2012).

Nesse contexto, estudos dessa temática procuram, principalmente, entender o papel dos recursos energéticos na produção, sua relação com as emissões de poluentes, bem como as possibilidades de melhorar a forma na qual são empregados. Nessa última vertente, destacam-se investigações sobre a interação entre energia e capital na produção. Com implicações sobre o crescimento econômico e a conservação ambiental, o foco está em verificar se esses recursos são complementares ou substitutos. Diante do exposto, e observando a importância dos insumos energia e capital para a produção de qualquer nação, o presente estudo buscou analisar a relação existente entre esses dois insumos, em termos da substituição, para economias selecionadas.

O grau de substituição entre insumos produtivos possui importante espaço na teoria da produção. Na relação capital-energia, a existência de substituição permite que economias se especializem no insumo de menor preço relativo. Em contrapartida, expandir a produção quando os recursos são complementares requer que ambos sejam ampliados em proporção (VARIAN, 1992). Consequentemente, estratégias direcionadas ao

enfrentamento da questão ambiental, seja em âmbito local ou global, devem ser pensadas sob a ótica da inter-relação entre capital e energia.

Nesse sentido, diversos estudos buscam compreender a relação capital-energia no processo produtivo. Ao utilizar dados temporais de indústrias dos Estados Unidos, Berndt e Jorgenson (1973) e Berndt e Wood (1979) analisaram a associação capital-energia e concluíram que esses recursos são complementares. Resultados similares foram encontrados para indústrias holandesas (MAGNUS, 1974), alemãs (SWAIM; FRIEDE, 1976) e canadenses (FUSS, 1977). Por outro lado, Griffin e Gregory (1976) e Pindyck (1979) observaram relações de substituição. Nesses últimos, utilizaram-se plantas industriais localizadas em diversos países pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE).

De uma maneira ampla, os resultados aparentemente conflitantes da época sugerem que a substituição entre capital e energia depende do contexto no qual o estudo é realizado. Griffin e Gregory (1976) justificam que estimativas com dados *cross-section* refletem ajustamentos de longo prazo e que, por essa razão, capital e energia tendem a ser substitutos em amostras desse tipo. Por outro lado, os autores explicam que relações de complementariedade prevalecem quando os dados são temporais, uma vez que essa estrutura reproduz melhor relações de curto prazo.

Diante disso, as pesquisas mais recentes verificam diferentes métodos e dados a fim de obter resultados mais conclusivos. Kemfert (1998) estimou a elasticidade de substituição capital-energia para setores industriais da Alemanha por meio de métodos de regressão não lineares. A autora concluiu que capital e energia são substitutos, porém o grau de substituição variou com a atividade econômica. Com metodologia semelhante, Kemfert e Welsch (2000) analisaram as elasticidades de substituição de inúmeros setores da Alemanha, como a indústria química, ferro, papel, alimentos e outros. Os resultados encontrados confirmaram que capital e energia são substitutos, com elasticidades próximas à unidade. Zha e Ding (2014) utilizaram funções de custo *translog* para verificar o grau de substituição na indústria energética da China, encontrando sinais de que os recursos apresentam possibilidades de

trocas. Para os autores, investimentos em capital são necessários para reduzir a intensidade energética na China.

Em relação à literatura supracitada, dois pontos podem ser destacados. O primeiro deles é que os trabalhos consultados basicamente se preocuparam com o grau de substituição capital-energia para firmas ou setores individuais. Apesar da importância dessa escala para a concretização de políticas setoriais, estudos que incluem nações são necessários para entender como capital e energia se relacionam no agregado. Ademais, no contexto dos problemas globais, tal abordagem pode ser mais apropriada para a condução de políticas ambientais, como o estabelecimento de metas para emissões (proposta do acordo de Paris). Segundo, fazer opção por dados temporais ou seccionais restringe o horizonte da pesquisa. Por um lado, estudos de seção (seccionais) não capturam a dinâmica temporal das variáveis e, por outro lado, modelos de séries temporais podem não ser adequados para comparar firmas, setores ou países. É nesse sentido que o presente estudo inova ao trabalhar de forma mais agregada, com 111 países, e utilizar uma combinação de dados de seção cruzada com série temporal (painel) para tratar o assunto.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi estimar e analisar, para 111 países selecionados, a elasticidade de substituição entre capital e energia no período compreendido entre 1990 a 2014. A amostra inclui países desenvolvidos e em desenvolvimento, que foram escolhidos com base na disponibilidade comum dos dados.

Este estudo divide-se em mais quatro seções, além desta introdução. Na seção 2, apresentam-se os modelos teóricos e empíricos que descrevem as possibilidades de relacionamento entre capital e energia na produção. Na seção 3, descrevem-se os procedimentos metodológicos e a base de dados. Resultados e discussões são reportados na seção 4. Por fim, na quinta seção são tecidas as conclusões finais do estudo.

2. A elasticidade de substituição capital-energia: interpretação teórica e modelo empírico

A redução do uso de energia fóssil (para simplificar, será retratada somente por “energia” a partir daqui) é passo necessário para mitigar as

emissões antrópicas de poluentes. Por seu turno, a diminuição do consumo energético depende da forma na qual capital e energia se relacionam. Por exemplo, em países com estruturas produtivas intensivas em energias não renováveis, o crescimento do capital pode se associar mais fortemente com o da energia, pois mudanças na matriz energética não são frequentes no curto/médio prazo. Já em outras regiões, o grau de dependência capital-energia pode decair se os fatores apresentarem algum grau de substituição (KOETSE, GROOT e FLORAX, 2008). Dessa forma, políticas ambientais que buscam estabelecer metas de redução de emissões devem considerar as possibilidades de substituição entre os fatores.

A possibilidade de haver trocas pode ser representada pela elasticidade de substituição (ES), um conceito microeconômico aplicado para medir o grau de variação percentual que ocorre na razão capital-energia quando a taxa marginal de substituição técnica (TMST) varia, em percentual. De modo intuitivo, trata-se de um indicador que mostra a reação de um sistema econômico quando os preços relativos se alteram (VARIAN, 1992).

Para ilustrar, se uma economia apresenta baixa ES capital-energia e os gestores públicos elevam o preço dos combustíveis fósseis, certamente a taxa de crescimento do capital irá declinar. Por outro lado, se uma política semelhante fosse adotada em um ambiente com elevada ES, os agentes poderiam optar por investir em setores menos intensivos em combustíveis fósseis, de modo a manter a taxa de crescimento do capital (BERNDT; WOOD, 1979). Percebe-se, assim, que o grau de elasticidade capital-energia possui papel fundamental na condução de políticas ambientais, uma vez que a dependência dos fatores pode definir os custos de mitigação das emissões.

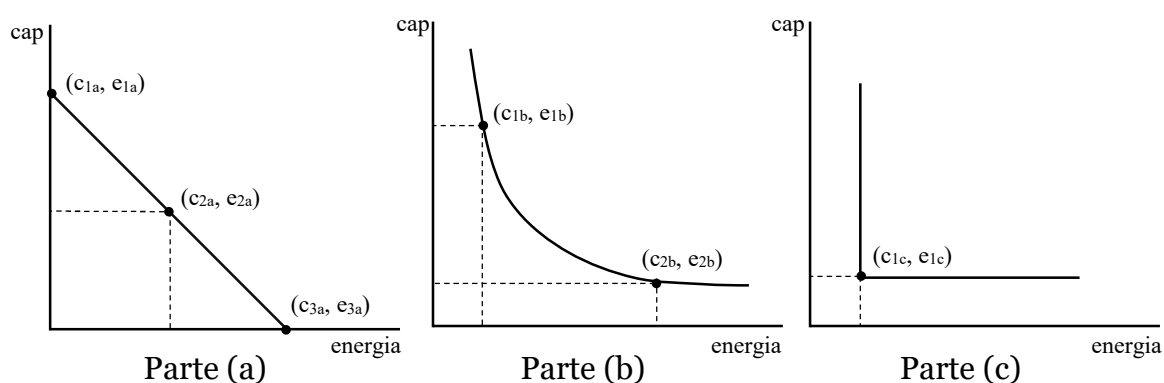
O indicador ES capital-energia pode ser obtido por meio da estimação da função de elasticidade de substituição constante (ou no inglês, *constant elasticity of substitution* – CES). Com esse objetivo, os modelos aninhados da função CES para três insumos (capital, energia e trabalho) foram utilizados nos estudos de Kemfert (1998) e Kemfert e Welsch (2000). No entanto, o procedimento esbarra na complexidade da estimação e interpretação dos coeficientes. Arnberg e Bjorner (2007) e Adetutu (2014) escolheram a função *translog* a fim de obter estimativas da ES. Apesar de atraente, a função requer

informações sobre os preços dos fatores, o que não é trivial no caso da variável energia em amostras agregadas.

Nesta pesquisa, a estratégia consistiu em simplificar a CES para dois fatores. Formalmente, descreve-se $y_{i,t} = [\alpha k_{i,t}^{-\rho} + (1-\alpha)e_{i,t}^{-\rho}]^{-\nu/\rho}$, em que k representa o capital (por trabalhador) e a energia (por trabalhador), ambos empregados para produzir y (por trabalhador) no i -ésimo país, no tempo $t = 1, 2, \dots, T$; α , ν e ρ são parâmetros. O primeiro representa a parcela de participação do capital na produção; ν é a escala produtiva; e ρ descreve a forma de relacionamento entre os fatores.

Como se vê, as variáveis na CES de dois insumos foram ponderadas pelo fator trabalho. A interpretação, nesse caso, dá-se em termos produtivos, ou seja, o parâmetro da elasticidade mede a variação que ocorre na razão capital (por trabalhador) e energia (por trabalhador) quando os preços relativos se alteram. Assim, a transformação nos dados, além de permitir o uso de métodos convencionais de estimação, possui interpretação clara da elasticidade. Para melhor expor o conceito, apresenta-se a Figura 1.

Figura 1 – Isoquantas de fatores substitutos perfeito (a), imperfeitos (b) e complementares (c)



Fonte: elaboração própria.

Na parte (a), capital e energia são substitutos perfeitos, pois é possível especializar-se somente em um fator. Isso ocorreria se determinada política ambiental estabelecesse um imposto para cada unidade produzida de algum bem intensivo em energia, tornando-o menos produtivo que outras

alternativas mais limpas. Assim, os agentes alocariam os recursos da economia em atividades não intensivas em energia.

Em (b), os fatores são substitutos imperfeitos, isto é, apresentam certo grau de substituição, porém, não é possível especializar-se somente em um deles. Os agentes respondem a choques no preço da energia alterando a estrutura dos recursos na economia, mantendo determinado nível de investimentos em setores intensivos. A curvatura da isoquanta determinará as possibilidades de realocação dos recursos e os custos de mitigação associados.

Já na parte (c), a isoquanta da relação capital-energia estabelece limites mínimos de uso dos fatores. Os recursos nesse contexto são complementares, pois não é possível reduzir a quantidade empregada de um fator sem diminuir o outro. Nesse ambiente, políticas que buscam mitigar as emissões por meio da redução do uso de energia são relativamente custosas, visto que é necessário reduzir a produção para atingir metas ambientais.

Os casos apresentados na Figura 1 são funções conhecidas na teoria da produção e a convergência do parâmetro ρ define a curvatura das isoquantas. Segundo Hicks (1970), pode-se obter a ES (σ) da relação capital-energia por meio da expressão $\sigma = 1/(1+\rho)$. Se ρ tender para um, obtém-se uma estrutura aditiva (substitutos perfeitos), sendo $y_{i,t} = \alpha k_{i,t} + (1-\alpha)e_{i,t}$ (caso a); caso o parâmetro tenda para zero, a CES transforma-se em uma função de produção “Cobb-Douglas” (substitutos imperfeitos), com ES unitária e a forma funcional igual a $y_{i,t} = k_{i,t}^\alpha \cdot e_{i,t}^{(1-\alpha)}$ (caso b); se ρ convergir para infinito, ES iguala-se a zero e a função assume o tipo “Walras-Leontief”, na qual os fatores são complementares, isto é, $y_{i,t} = \min(\alpha k_{i,t}, (1-\alpha)e_{i,t})$.

Em contraponto, a não linearidade dos parâmetros da função CES dificulta aplicações empíricas, pois a maioria dos métodos de regressão são baseados nessa suposição (GREENE, 2002). Nesse sentido, Kmenta (1967) apresentou uma alternativa, cuja formulação emprega a expansão de Taylor na primeira ordem em torno do ponto $\rho = 0$, da seguinte maneira:

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

De modo diferente, pode-se escrever:

$$\log(y_{i,t}) = \beta_{o,i} + \beta_1 \log(k_{i,t}) + \beta_2 \log(e_{i,t}) + \psi ces + u_{i,t}, \quad (2)$$

em que $\beta_{o,i}$ representa as variáveis específicas de cada país, constantes no tempo (matriz energética, estrutura produtiva etc.); $\beta_1 = \alpha v$; $\beta_2 = (1 - \alpha) \alpha v$; e $\psi = -1/2 \rho \alpha (1 - \alpha) v$; o termo “ces” é uma variável construída por meio de $[\log(k_{i,t}) - \log(e_{i,t})]^2$. Em (2), obtém-se estimativas consistentes dos parâmetros ρ e σ , necessários para analisar as possibilidades de substituição entre capital e energia.

3. Metodologia

3.1 Método

Para estimar os parâmetros em (2), utilizaram-se técnicas de dados em painel. Os modelos em painel são mais informativos e apresentam vantagens do ponto de vista estatístico, como o aumento dos graus de liberdade e o controle de possíveis problemas ocasionados por omissão de variáveis relevantes não observáveis, constantes no tempo e específicas a cada nação, como a matriz energética ou a estrutura produtiva (BALTAGI, 2002).

Os métodos em painel adequados a dados com grande número de observações seccionais e poucos períodos são os modelos *pooled*, efeitos fixos (EF) e efeitos aleatórios (EA) (GREENE, 2002). No *pooled*, características específicas não observáveis, constantes no tempo, γ , não variam entre os países. Nas outras especificações, flexibiliza-se a estrutura do modelo para permitir que atributos individuais possam variar com as nações. Os estimadores EF e EA são, portanto, mais apropriados para capturar a influência de tais características.

A principal divergência entre os métodos EF e EA está na hipótese de relacionamento entre as variáveis não observadas e os regressores, capital e consumo energético, pois o segundo método torna-se enviesado e inconsistente nessa circunstância. Na intenção de verificar esse aspecto, foram aplicados os testes de Chow, Hausman e Breusch-Pagan, os quais podem ser vistos detalhadamente em Greene (2002).

Outra questão relevante ao estimar (2) é o provável problema de viés e inconsistência causado pela endogeneidade dos regressores. Conforme apontam Olley e Pakes (1996), a dotação dos fatores na produção é determinada, em partes, pela crença das firmas sobre a produtividade do processo produtivo, variável não observada diretamente e contida no termo de erro estocástico. Dessa forma, a decisão sobre a quantidade de insumos empregados depende do próprio produto. Então, a endogeneidade dos regressores surge da correlação entre a produtividade e a demanda por insumos.

A estratégia econométrica empregada para contornar a problemática foi estimar os parâmetros da função de produção pelo método dos momentos generalizados (*generalized method of moments* – GMM). O GMM é uma técnica estatística baseada em funções de momentos que dependem de variáveis observadas (instrumentos) e parâmetros não conhecidos, de modo que $E[g(w_{i,t}, \theta)] = 0$, em que g é a função de momentos; $w_{i,t}$ é um vetor de variáveis instrumentais; e θ é um vetor de parâmetros desconhecidos. A função de momentos estimada foi do tipo $E[W'_{i,t}(Y_{i,t} - X_{i,t}\beta)] = 0$ (representação do método de mínimos quadrados de dois estágios – MQ2E)¹. A estatística J de Sargan foi empregada para verificar a ortogonalidade das variáveis. Após testar diversas especificações, os instrumentos escolhidos para o vetor $W'_{i,t}$ foram a primeira defasagem dos regressores mais a segunda defasagem da variável energia.

A fim de verificar a estabilidade temporal das séries, aplicou-se os testes de Levin, Li e Chu, Im, Pesaran e Shin, ADF-Fisher e PP-Fisher. Esses procedimentos permitem averiguar se as variáveis são estacionárias (condição necessária para a correta estimação do modelo). Detalhes dos testes podem ser vistos em Baltagi (2002).

3.2 Fonte de dados

A base de dados foi construída por meio de um painel composto por 111 países desenvolvidos e em desenvolvimento, durante o período 1990-

¹ Y_{it} é um vetor composto pela variável dependente, enquanto X_{it} , é uma matriz com os valores das variáveis independentes.

2014. Ao total, foram analisadas 2.775 observações. Os dados foram extraídos da plataforma eletrônica do Banco Mundial (2017), conforme a disponibilidade da fonte. A lista com o conjunto utilizado de países está disponível nos anexos A1 e A2.

A produção per capita foi representada pela variável “Produto Interno Bruto – PIB”, em dólares americanos deflacionados pelo Índice de Preços ao Consumidor (IPC) dos Estados Unidos da América (EUA), comparados pela Paridade do Poder de Compra (PPC), dividida pelo número de habitantes de cada país.

Para o capital per capita, empregou-se a variável “formação bruta de capital”, em dólares deflacionados pelo IPC, dividida pelo total de habitantes. Consideram-se investimentos de capital os gastos em adições e melhorias de terras; compras de plantas, máquinas e equipamentos; construção de estradas, ferrovias e similares; escolas, hospitais, edifícios comerciais e industriais.

Em relação à energia per capita, incluiu-se a produção e as importações de energia primária, excluindo-se as exportações e os combustíveis fornecidos a navios e aeronaves em fluxo internacional, divididas pelo número de habitantes. A demanda por energia primária contempla o consumo de petróleo, gás natural, carvão mineral e outros. Apresenta-se no Anexo A3 uma tabela com informações descritivas das variáveis.

4. Resultados e discussão

Primeiramente, foram realizados testes de raiz unitária que precederam as estimativas da equação (2). Nessa etapa, o objetivo foi verificar se as séries são estacionárias (estáveis) na média e na covariância. Tal procedimento é necessário, pois produto, capital e energia podem ter sido afetados por processos de tendência estocástica ao longo do tempo. A presença de raiz unitária, no entanto, foi rejeitada em todos os casos².

Em seguida, foram utilizados os testes de Chow, Breusch-Pagan e Hausman para determinar se as características não observáveis, fixas no tempo, existem e se estão correlacionadas com capital e energia. As duas hipóteses foram validadas, indicando que a especificação mais adequada para

² Para maiores informações ver Tabela A1 do anexo.

estimar a expressão (2) é o modelo de efeitos fixos. Desse modo, procedeu-se à estimação da função de produção pelo método GMM adotando efeitos fixos e a matriz de ponderação instrumental MQ2E. Para fins de comparação, a Tabela 1 reporta as estimativas dos modelos de efeitos fixos simples e GMM.

Os modelos mostraram-se bem ajustados (coeficiente de determinação elevado) e com parâmetros significativos e teoricamente relevantes. No primeiro modelo (EF), para o capital, estimou-se a elasticidade para o capital em 0,625. Consequentemente, o coeficiente do consumo energético foi de 0,375. Na estimativa por GMM, verificou-se pela estatística J de Sargan que os instrumentos seguem a condição de ortogonalidade. Nesse modelo, capital e energia obtiveram coeficientes na ordem de 0,6840 e 0,316, respectivamente.

De forma geral, é possível dizer que a produção reage mais intensivamente ao capital (por ambos os métodos). Para exemplificar, no modelo (2), variações positivas do investimento em torno de 10% elevam a produção em 6,84%, em média, ao passo que uma mudança similar na energia expande o produto em 3,16%.

Tabela 1 – Resultados das estimativas da função CES

Coeficientes	EF (1)	GMM (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: entre parênteses estão os desvios-padrão; *** significativo a 1%; NS = Não significativo;

Em relação à elasticidade de substituição, as estimativas realizadas pelos modelos (1) e (2) evidenciaram que capital e energia são substitutos imperfeitos, com elasticidades superiores à unidade. No entanto, o modelo (1)

subestimou o parâmetro ρ (-0,7692 do modelo EF contra -0,6987 do modelo GMM).

Daqui em diante, as análises baseiam-se nos resultados do modelo (2), o qual considerou diretamente os problemas de viés e inconsistência provenientes da endogeneidade dos fatores. Ao levar em consideração o parâmetro de substituição σ , pode-se inferir que, em média, os países expandem 33,20% a razão capital-energia quando a taxa marginal de substituição técnica eleva-se em 10%.

A ES tem uma simples interpretação nesse caso. Quando a taxa marginal de substituição técnica se eleva, os agentes adaptam-se para melhorar a alocação dos recursos. Por exemplo, supondo-se uma estrutura produtiva com capital constante, a elevação do preço da energia poderia favorecer a adoção de investimentos menos intensivos. Imaginando-se agora uma economia com diversos bens e serviços, e capitais intensivos e não intensivos em energia, políticas de tarifação energética poderiam alterar a distribuição dos investimentos em favor do capital menos intensivo.

Em contextos onde políticas como a citada são implementadas, os agentes podem alterar a razão capital-energia de três formas. A primeira é expandindo a quantidade disponível de capital menos intensivo, mantendo o nível energético constante. Isso ocorreria se a economia estivesse em pleno crescimento e houvesse a necessidade de manter determinado nível de consumo energético. Dessa forma, os agentes alocariam os recursos em investimentos mais limpos, expandindo o capital, mas deixando constante a quantidade de energia consumida.

A segunda forma é diminuir a demanda por energia primária, dado determinado nível constante de capital. Nesse cenário, os agentes diminuem a intensidade energética dos investimentos, optando, por exemplo, pelo uso de energias mais limpas (renováveis). Para ilustrar, pode-se citar o setor de transportes. Supondo uma elevação no preço internacional do diesel, esse segmento poderia optar por substituir o combustível fóssil pelo biodiesel, energia renovável e com menor potencial de emissão de GEE.

No último caso, capital e energia poderiam caminhar em direções opostas, isto é, ocorrer uma expansão do capital menos intensivo e a

substituição de energias primárias por renováveis na estrutura produtiva. Em todos os casos, há esforços para reduzir a intensidade energética do investimento. Assim, tais políticas de preços possivelmente estimulariam a participação de energias limpas na economia e a diminuição da dependência energética do capital.

Com o avanço tecnológico, o grau de substituição entre os fatores pode aumentar ao longo do tempo. Desse modo, é pertinente analisar a trajetória temporal da elasticidade. Assim, estimaram-se sistemas semelhantes ao modelo (2) nas seguintes subamostras: (a) 1990 a 1997, (b) 1998 a 2005 e (c) 2006 a 2014. Buscou-se manter uma sequência temporal de, no mínimo, oito anos para evitar perdas expressivas de graus de liberdade. Os resultados são observados na Tabela 2.

Na parte (a) da Tabela 2, apresentam-se os parâmetros do modelo, estimados novamente por GMM. Na parte (b), descrevem-se as taxas de crescimento das variáveis per capita. Percebe-se que a elasticidade de substituição apresentou trajetória crescente, o que indica que os fatores de produção estão se tornando mais elásticos ao longo do tempo. Além disso, observou-se que o fator capital cresceu mais rapidamente que o consumo de energia em todas as subamostras.

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	1998	2006
	1997	2005	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	1998	2006
	1997	2005	2014
Capital	0,47%	1,68%	1,52%

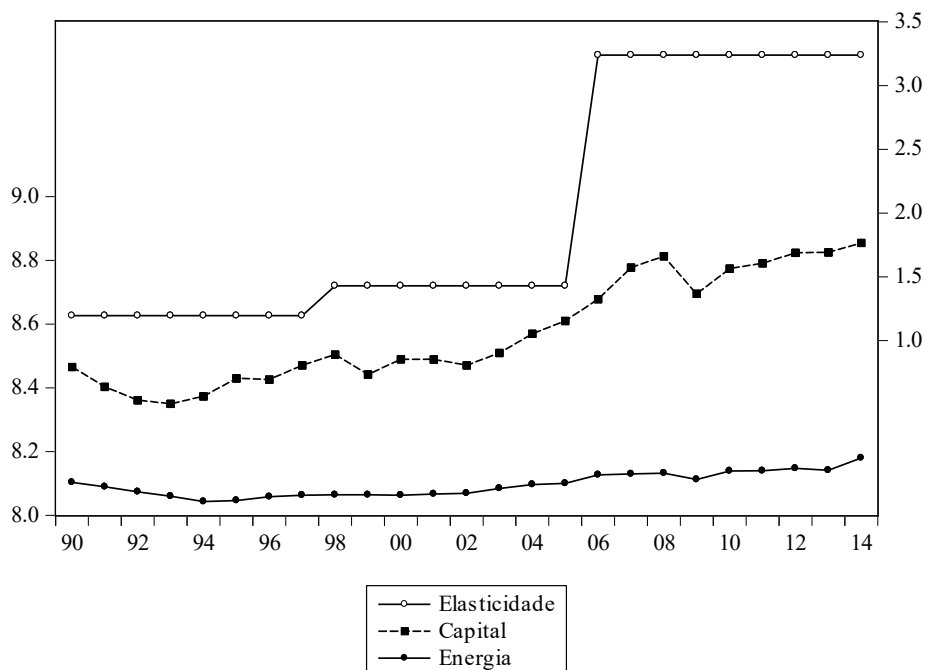
Energia	-0,59%	0,56%	0,28%
Produção	0,01%	1,96%	1,58%

Fonte: resultados do estudo.

Nota: a constante foi suprimida por economia de espaço. *** significativo a 1%; NS = Não significativo; No painel B, todas as variáveis estão ponderadas pelo total de habitantes.

Para visualizar o movimento temporal das séries, apresenta-se a Figura 1. A escala numérica da esquerda refere-se aos valores do capital e energia em forma logarítmica. A escala da direita, por sua vez, informa os valores da elasticidade de substituição capital-energia estimados nas subamostras.

Figura 1 – Trajetória temporal do capital, da energia e da elasticidade de substituição, 1990-2014



Fonte: resultados do estudo.

O desprendimento entre as séries, por si, poderia indicar que os investimentos dependem cada vez menos da energia fóssil. O que confirma essa suposição é a elevação da elasticidade de substituição entre esses fatores, que foi de 1,161 entre 1990-1997 e cresceu para 3,2384 no período 2006-2014. Esse resultado é importante e permite dizer que os custos de mitigação associados à redução do consumo energético têm diminuído ao longo do tempo.

Dois fatores podem ser apontados como possíveis explicações para a trajetória crescente da elasticidade de substituição, entre outros. O primeiro deles é o crescimento do uso de energias renováveis na matriz energética mundial. Dados do Banco Mundial (2017) mostram que o percentual de participação de energias limpas na produção cresceu de 17%, em 1990, para 19%, em 2014.

O segundo ponto diz respeito ao melhoramento tecnológico que provavelmente permitiu a redução do consumo de combustíveis fósseis por unidade de produto. Concretamente, observou-se uma diminuição de 28% no uso de energias primárias no processo produtivo mundial (7,5 mj/US\$, em 1990, para 5,4 mj/US\$, em 2014). O crescimento gradual do uso de recursos renováveis e a redução da parcela de energias fósseis na produção estão relacionados com o avanço do padrão tecnológico dos países.

5. Considerações finais

A redução do consumo de energias fósseis é condição necessária para diminuir as emissões antrópicas de poluentes. Por sua vez, essa ação depende da forma na qual energia e capital se relacionam, uma vez que o grau de flexibilidade entre as variáveis impacta diretamente nos custos de mitigação das emissões. Nesse sentido, este estudo procurou contribuir com a discussão ao estimar e analisar a elasticidade de substituição entre capital e energia a partir de uma ampla amostra de países ao longo do período 1990-2014.

Avançou-se, primeiramente, ao se adotar modelos em painel que consideram importantes características individuais rígidas no tempo, como a estrutura produtiva e a matriz energética, e os possíveis problemas de endogeneidade dos regressores. Dessa forma, foi possível obter estimadores consistentes das elasticidades e mais adequados para a realidade empírica.

Além disso, sendo as emissões de poluentes um problema global, outro avanço da pesquisa foi estudar a relação capital-energia do ponto de vista das nações. A literatura consultada foca suas análises em segmentos produtivos específicos. Apesar de serem importantes para a concretização de políticas setoriais, análises internacionais são necessárias para compreender melhor como as variáveis se relacionam no ambiente macroeconômico.

Os principais resultados da pesquisa permitem concluir que capital e energia são substitutos imperfeitos, com elasticidade acima da unidade e crescente no tempo. De forma geral, esses achados trazem apontamentos sobre a possibilidade de reduzir a intensidade do capital por meio de políticas ambientais focadas no preço da energia.

Em suma, as políticas de elevação do preço poderiam trazer diversos efeitos sobre a dotação dos fatores na economia. Por exemplo, havendo possibilidades de substituição, os agentes podem investir em setores menos intensivos para alocar melhor seus recursos. Ademais, o aumento de preços no segmento energético pode estimular pesquisas e expandir, em um segundo momento, a taxa de crescimento econômico.

Somado a esses pontos, tais ações ainda poderiam aumentar a participação de energias renováveis em alguns setores, como o de transportes, e diminuir por consequência as emissões antrópicas de poluentes. Ressalta-se, contudo, que a taxação deveria ser gradual e aplicada com limites pré-estabelecidos para não criar severas distorções na taxa de crescimento econômico dos países no curto prazo.

É importante ressaltar que os resultados e as conclusões apresentados neste estudo limitam-se aos modelos empíricos estimados, os quais podem ser sensíveis quanto aos dados e/ou à forma funcional. Por outro lado, tais limitações abrem espaço para a inserção de novas pesquisas que visam testar a validade dos resultados aqui expostos por meio de diferentes métodos, funções e bases de dados.

Referências

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

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

BALTAGI, B. H. *Econometrics*. 3. ed. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2002.

BANCO MUNDIAL. World Bank Group, 2015. Disponível em: <http://www.worldbank.org/>. Acesso em: Janeiro, 2017.

BERNDT, E. R.; JORGENSEN, Dale W. Production structure. US Energy Resources and Economic Growth, 1973.

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

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.

GREENE, W. H. Econometric Analysis. 5. ed. New Jersey: Pearson Education, Inc., 2002.

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.

HENRIKSSON, E.; SÖDERHOLM, P.; WÅRELL, L. Industrial electricity demand and energy efficiency policy: the role of price changes and private R&D in the Swedish pulp and paper industry. Energy policy, v. 47, p. 437-446, 2012.

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

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

KEMFERT, C.; WELSCH, H. 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.

MAGNUS, J. R. Substitution between energy and non-energy inputs in the Netherlands 1950-1976. *International Economic Review*, p. 465-484, 1979.

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

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

SWAIM, P.; FRIEDE, G. Die Entwicklung des Energieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland und der Vereinigten Staaten von Amerika in Abhängigkeit von Preisen and Technologie. Karlsruhe: Inst. für Angewandte Systemanalyse, 1976.

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

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

Anexos

Tabela A1 – Países desenvolvidos da amostra

País	País
Austrália	Israel
Áustria	Itália
Bélgica	Japão
Bulgária	Coréia do Sul
Canadá	Luxemburgo
Dinamarca	Nova Zelândia
Finlândia	Noruega
França	Portugal
Alemanha	Espanha
Grécia	Suécia

Hong Kong	Suíça
Islândia	Reino Unido
Irlanda	Estados Unidos

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela A2 – Países em desenvolvimento da amostra

País	País	País	País
Albânia	Chipre	Malta	Cingapura
Argélia	República Checa	Maurício	República Eslovaca
Angola	R. Dominicana	México	Sri Lanka
Argentina	Equador	Mongólia	Sudão
Armênia	Egito	Marrocos	Tajiquistão
Azerbaijão	El Salvador	Moçambique	Tanzânia
Bahrain	Gabão	Namíbia	Tailândia
Bangladesh	Geórgia	Nepal	Togo
Belarus	Gana	Países Baixos	Trinidad e Tobago
Benin	Guatemala	Nicarágua	Tunísia
Bolívia	Honduras	Nigéria	Peru
Botsuana	Hungria	Omã	Turcomenistão
Brasil	Índia	Paquistão	Ucrânia
Brunei Darussalam	Indonésia	Panamá	Uruguai
Camarões	Irã	Paraguai	Uzbequistão
Chile	Jordânia	Peru	Venezuela
China	Cazaquistão	Filipinas	Vietnã
Colômbia	Quênia	Polônia	Iêmen
Congo, Dem. Rep.	Quirguizistão	România	Zimbábue
Congo, Rep.	Líbano	Rússia	
Costa do Marfim	Macedônia	Arábia Saudita	
Cuba	Malásia	Senegal	

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela A3 – Estatísticas descritivas

Variáveis	Unidade	Média	DP	Máximo	Mínimo
Capital	US\$/hab.	8.933,38	8.504,14	79.316,23	32,66
Energia	Kg de petróleo equivalente/hab.	5.055,82	4.913,030	31.091,64	265,17
Produto	US\$/hab.	38.117,88	35.030,38	217.778,1	781,25

Fonte: elaborado pelos autores.

Nota: DP = Desvio Padrão.

Tabela A4 – Testes de raiz unitária, séries em nível

s	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: elaborado pelos autores.

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