



CONSTRUÇÃO DE UMA MATRIZ FÍSICA DE INSUMO-PRODUTO BRASILEIRA REPRESENTANDO AS PERDAS ENERGÉTICAS SETORIAIS E ANÁLISE EXERGÉTICA DO SISTEMA PRODUTIVO BRASILEIRO

Palavras-Chave: análise de insumo-produto, matrizes físicas de insumo-produto, análise exergética, eficiência energética

Autores:
Sami Graf Figueiredo – FEM, UNICAMP
Prof. Dr. Aleix Altimiras Martín (orientador) – DPCT, UNICAMP

INTRODUÇÃO:

As pressões impostas pela crise ambiental global que vivemos requer uma transição energética dos sistemas econômicos dos países baseado em energias renováveis e não-renováveis de baixo carbono (Shukla et al. 2022). Para isso, os países estão implementando políticas de adaptação e mitigação no âmbito tecnológico, por um lado, estimulando a adoção de tecnologias de geração renovável de energia, por outro lado, políticas de ganho de eficiência energética.

Uma parte importante dessas políticas de mitigação se fundamentam na melhoria da eficiência energética, cujos estudos utilizam dois indicadores principais: eficiência energética de tecnologias específicas (p.ex. de veículos, eletrodomésticos, etc.), ou da intensidade energética da economia como um todo ou de setores particulares (Schipper et al. 2001; UNEP 2011).

As análises de eficiência energética de uma economia, encontradas na literatura, são baseadas em limites teóricos e práticos de tecnologias (Cullen e Allwood 2010; Paoli e Cullen 2020) e estimativas para a eficiência de setores da economia (Wu et al. 2019). Porém, há uma lacuna para a obtenção de um marco que permita entender como a eficiência energética (ou exergética) de um setor afeta a de outros setores ou da economia como um todo. O trabalho mais detalhado nesse sentido foi (Schaeffer e Wirtshafter 1992), em que analisam o fluxo energético e exergético na economia brasileira em 1987, focando nos caminhos das fontes de energia e suas eficiências, mas com alta agregação setorial (apenas 4 setores).

A Análise de Insumo-Produto (AIP) é amplamente utilizada para modelar os fluxos (monetários ou físicos) dentro de uma economia, com grande disponibilidade de dados, pois está ligada aos sistemas de contas nacionais da maioria dos países. Esta modelagem tem sido validada como uma ferramenta poderosa para entender impactos ambientais como a geração de Gases de Efeito Estufa (GEE) dentro dos países (Chen e Zhang 2010) e para atribuir essas emissões entre países, a partir das relações de interações econômicas (Wiebe et al. 2012). Contudo, a AIP tradicional se baseia em matrizes monetárias, que não representam a estrutura física das economias (Altimiras-Martin 2014).

O objetivo deste trabalho é duplo: primeiro, desenvolver uma metodologia nova para criar uma Matriz de Insumo-Produto Física energética (MIPF-en) que represente os fluxos energéticos intersetoriais e a energia útil e não-útil (dissipada) como produtos finais, para o Brasil. E, segundo, desenvolver métodos de análise em bases estruturais energéticas da economia, p.ex. calculando a eficiência energética/exergética da economia como um todo (para cada fonte primária e secundária de energia), e desenvolver análise de sensibilidade, para saber quais setores e tipos de usos energéticos têm maior influência na eficiência energética e exergética da economia como um todo.

METODOLOGIA:

A metodologia básica de AIP tem suas raízes nos trabalhos de Wassily Leontief no final da década de 1930, pelos quais ganhou o Prêmio Nobel em Ciência Economia em 1973. Esse arcabouço analítico se baseia em um sistema de equações lineares, sob hipóteses simplificadoras, que modelam as trocas intersetoriais e suas relações com a demanda de uma economia (Miller e Blair 2009).

Há diversos modelos baseados em AIP, cada um com suas particularidades. No entanto, todos operam sobre bases de dados de transações interindustriais ou inter-regionais de uma economia, chamadas de Matriz de Insumo-Produto (MIP), geralmente em unidades monetárias. Na prática, cada modelo AIP vai operar sobre uma MIP específica, já que cada matriz possui relações subjacentes que devem ser compatíveis com as hipóteses do modelo utilizado para sua análise (Altimiras-Martin 2014). A tabela 1 mostra uma ilustração da estrutura de uma MIP.

	Setor 1	Setor 2	Demanda final	Produção total
Setor 1	z11	z12	f1	x1
Setor 2	z21	z22	f2	x2
Insumo primário	r1	r2		
Produção total	x1	x2		

Tabela 1: Estrutura de uma MIP para uma economia de dois setores.

Elementos da matriz Z são as trocas intersetoriais, dos vetores r e x são os insumos e a produção total de cada setor, respectivamente.

Em que os elementos da matriz intersetorial $Z=[z_{ij}]$ representam a quantidade consumida pelo setor j produzida pelo setor i , f_i é a demanda exógena¹ da economia do produto do setor i , x_i , r_i são a produção total e o recurso primário total do setor i , respectivamente. Se estes valores estiverem em unidades físicas a tabela 1 representa uma MIPF e são geralmente encontradas com mais de um produto final, i.e, o vetor de produção x e, por exemplo, w representando as emissões associadas a cada setor (Altimiras-Martin 2014).

Deduções completas dos modelos básicos de AIP e suas variações fundamentais podem ser encontradas em (Miller e Blair 2009). Neste trabalho, foi utilizado a modelagem de Ghosh. Ao longo do resumo, letras em negrito minúsculas representam vetores colunas e maiúsculas matrizes.

O modelo parte das seguintes hipóteses: 1) a entrada total da economia é igual à saída ($x=i'Z+r'$); 2) a alocação da produção de cada setor através dos outros é uma proporção constante de sua produção ($B=\hat{x}^{-1}Z^2$), em que cada $b_{ij}=\frac{z_{ij}}{x_i}$ é a proporção da alocação do produto de i em j ; 3) os insumos (r') são exógenos à economia e a demanda é proporcional à produção total ($\hat{f}_c=\hat{f}^0(\hat{x}^0)^{-1}\Rightarrow f^1=\hat{f}_c x^1$), em que \hat{f}_c são os coeficientes exógenos de demanda e os sobrescritos 0 e 1 indicam valor anterior e posterior a uma mudança no vetor de insumo. Da hipótese 1 e 2 podemos obter a produção total com respeito a um dado insumo: $x'=r'(I-B)^{-1}=r'G$, em que G é chamado de matriz inversa de Ghosh; e com a hipótese 3, obtemos a demanda correspondente a uma mudança em r' . Vale destacar que pela definição de B e \hat{f}_c temos: $\sum_j b_{ij}+\hat{f}_{ci}=1$.

A ideia central do método para criação da MIPF-en nacional é: a partir da MIP monetária, obter a matriz de coeficientes de alocação dos insumos primários (matriz B) como proxy de alocação dos materiais dentro da economia, e substituir os insumos monetários pelos insumos primários energéticos para achar a distribuição destes através dos setores. Esta ideia se baseia na premissa que o modelo de Ghosh é um modelo alocativo ou quantitativo pela oferta (Altimiras-Martin 2024).

1 Exógena significa que seu valor não é função da produção total do setor, mas depende de fatores específicos (p.ex. consumo domiciliares de energia depende de fatores climáticos).

2 Em que \hat{x} é a matriz em que os elementos não nulos são os elementos de x dispostos na diagonal principal.

Assim, ilustrando para um caso simples de 2 setores, em que um deles extrai energia primária (p.ex. energia eólica) e transforma todo insumo em energia elétrica (única fonte secundária) que será alocada para a demanda exógena da economia e para o outro setor, que por sua vez apenas consome a energia em dois dispositivos diferentes, podemos atualizar os coeficientes de \mathbf{B} obtendo \mathbf{B}^* , conforme a tabela 2.

	Setor 1	Setor 2	Energia útil na demanda final agregada ($\mathbf{C}_{u,j}$)	Energia útil na matriz intermediária ($\mathbf{C}_{u,z}$)	Energia perdida na conversão... ($\mathbf{C}_{d,trans}$)	Energia perdida no dispositivo 1 (final e intermediária)... (\mathbf{C}_{d,k_1})	Energia perdida no dispositivo 2 (final e intermediária)... (\mathbf{C}_{d,k_2})
Setor 1	$b_{11}\eta_1$	$b_{12}\eta_1$	$f_{c1}\eta_1$	-	$(b_{11}+b_{12}+f_{c1})(1-\eta_1)$	-	-
Setor 2	0	0	$f_{c2}(c_{21}n_{21}+c_{22}n_{22})$	$(b_{21}+b_{22})(c_{21}n_{21}+c_{22}n_{22})$	-	$(b_{21}+b_{22}+f_{c2})c_{21}(1-n_{21})$	$(b_{21}+b_{22}+f_{c2})c_{22}(1-n_{22})$
Insumos primários	r_1	0	-	-	-	-	-

Tabela 2: Ilustração da metodologia para obtenção dos coeficientes de energia útil e dissipada da MIPF para o caso de transformação direta da energia primária e fonte secundária única (p.ex., apenas eletricidade).

Em que b_{ij} são os coeficientes de alocação, c_{ik} é a proporção da energia utilizada no setor i e no dispositivo k , denominado “coeficiente de alocação”, n_{ik} é o rendimento energético correspondente a este dispositivo, η_i é a eficiência global de transformação da energia do insumo primário para energia elétrica no setor de transformação i , f_{ci} é o coeficiente de demanda do setor i e r_j é o insumo primário energético no setor de transformação j . Podemos verificar que a soma dos elementos na linha continua sendo igual à identidade, como no modelo de Ghosh padrão.

Com a nova matriz de coeficientes de alocação \mathbf{B}^* e com o vetor de insumo primário \mathbf{r}' contendo a energia primária consumida pelo setor de transformação, obtemos a produção de energia da economia \mathbf{x}^* . Com isso, a matriz de fluxos energéticos intersetoriais associada ao consumo de \mathbf{r}' é $\mathbf{Z}^* = \hat{\mathbf{x}}^* \mathbf{B}^*$. Além disso, como cada \mathbf{C}_u e \mathbf{C}_d são os coeficientes exógenos, obtemos a energia útil (na demanda final e no uso intermediário) e a energia dissipada, associada à demanda final e uso intermediário, em cada dispositivo. A energia dissipada no setor de conversão, como no caso da tabela 2, é obtida simplesmente fazendo $x_1^*(b_{11}+b_{12}+f_{c1})(1-\eta_1) = x_1^*(1-\eta_1)$.

Os dados necessários para realização da metodologia descrita anteriormente são: i) a MIP (67 setores) referente ao ano de 2015 (IBGE 2018) para obter a matriz \mathbf{B} e os coeficientes de demanda iniciais; ii) coeficientes de destinação e de rendimento para vários usos finais da energia³ disponíveis no estudo Balanço de Energia Útil (BEU) em (MME, Ministério de Minas e Energia 1995; 2005)- em que os dados de rendimentos foram extrapolados para o ano de 2015 (a partir dos dados de 1994 e 2004), para adequar ao ano da MIP; iii) compatibilização entre os setores do BEU e da MIP67, fornecido pelo Balanço Energético Nacional (BEN) em (EPE, Empresa de Pesquisa Energética 2022).

Vale ressaltar que quando um conjunto de setores da MIP corresponde a um único setor do BEU, as informações dos coeficientes de destinação e rendimento são herdadas pelos setores MIP, e quando o contrário ocorre, calculamos a proporção dos setores BEU dentro do setor MIP e utilizamos como peso ponderadores para os dados desses coeficientes.

3 Dispositivos agregados por finalidade: força motriz (p.ex. motores), aquecimento direto (p.ex. fornos), aquecimento indireto (p.ex. caldeiras), refrigeração, iluminação, eletroquímica (p.ex. galvanização) e outros (eletrônicos).

É importante destacar que há dois casos distintos para se considerar: 1) caso de transformação do insumo primário para uma única fonte secundária no setor de transformação e apenas consumo nos outros setores, como no caso da tabela 2; 2) caso de mais de uma energia secundária para o mesmo insumo primário. No primeiro caso, apenas o setor de transformação possui elementos de alocação intermediário em B^* . Já no segundo caso, há um setor que extrai energia de fora da economia, e que pode transferir essa energia bruta adiante, bem como outras transformações desta. Esse segundo caso aumenta a complexidade, porque o coeficiente de alocação sozinho não consegue dizer que tipo de energia foi transferida e, portanto, precisa de um tratamento mais detalhado dos dados, que ainda está em andamento.

Para analisar a eficiência energética da economia como um todo, fazemos 1) a razão da soma da energia útil total (na demanda final e intermediária) pela energia primária de entrada e 2) a razão mesma soma de energia útil pela energia secundária resultante da transformação no setor que realoca a energia. O primeiro fornece a eficiência do sistema econômico considerando as perdas de geração/transformação dos insumos primários e, o segundo, a eficiência do uso da energia após a geração/transformação, sendo a medida mais relevante a nível de planejamento industrial (além do setor de geração de energia).

Já para a análise exérgica de um sistema econômico, fazer detalhamento de processos e fluxo exérgico por uso final (dispositivo) é muito custoso e complexo, por isso, utilizamos fatores de qualidade que relacionam a eficiência exérgica⁴ com o rendimento energético convencional, e alteramos as eficiências dos dispositivos do BEU e a entrada de energia para exergia. Portanto, repetindo o processo descrito acima, obtemos as eficiências exérgica da estrutura econômica.

Por fim, para a análise de sensibilidade, deve-se completar a metodologia para tratar do segundo caso de transformação de energia primária, i.e, quando há mais de um tipo de fonte secundária para a mesma fonte. Com a MIPF-en completa para todos os insumos primários, aplica-se a metodologia descrita em (Altimiras-Martin 2014) para analisar as colunas exógenas obtidas e fazer a análise de sensibilidade setorial.

RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÃO:

Foi construída uma MIPF-en com a metodologia descrita anteriormente utilizando a linguagem *R-statistics*. Esta MIPF foi criada para o caso em que o setor energético da MIP nível 67 transforma as energias hidráulica, eólica, solar fotovoltaica e nuclear⁵ apenas em energia elétrica e transfere para os outros setores da economia. Além disso, foram obtidos 9 vetores (cada elemento correspondendo a um setor) de produtos finais exógenos à matriz intersetorial: 1 vetor de energia útil alocado na demanda final, 1 vetor de energia útil alocada na matriz intermediária (i.e, o consumo dos setores não produtores), e outros 7 vetores de energia dissipada (na matriz intermediária e na demanda final) para cada um dos dispositivos do BEU. O resultado é um DataFrame análogo à tabela 2, mas para os 67 setores da MIP e com 7 dispositivos de uso final de energia.

A eficiência energética e exérgica da economia como um todo para cada uma dessas fontes primárias que são transformadas diretamente em energia elétrica e não possuem outros usos, pode ser visto na tabela abaixo. É possível observar que a eficiência exérgica é ligeiramente menor, em todos os casos. Isso está relacionado com o fato de que a energia perde qualidade em todo processo de utilização, mas espera-se que essa diferença se acentue conforme a MIPF-en fique completa e contemple a totalidade dos insumos, pois as maiores contribuições de degradação exérgicas são de efeitos térmicos, p.ex., em queimas de combustíveis (Schaeffer e Wirtshafter 1992; Cullen e Allwood 2010).

⁴ Definida como $\epsilon = \frac{\text{exergia de saída}}{\text{exergia de entrada}}$. E a eficiência de primeira lei fica $\eta = \nu \epsilon$, em que ν é o fator de qualidade.

Os dados de fator de qualidade por tipo de dispositivo de conversão são obtidos de (Cullen e Allwood 2010) na tabela 3.

⁵ O fator de qualidade para geração de eletricidade para essas fontes são unitário (Cullen e Allwood 2010 tab. 1)

Eficiências		Hidráulica	Eólica	Solar FV ^a	Urânio
Energética	Base primária ^b	64.72 %	14.91 %	8.63 %	21.66 %
	Base secundária ^c	76.14 %	59.64 %	57.56 %	61.88 %
Exergética	Base primária	52.91 %	12.19 %	7.06 %	17.71 %
	Base secundária	62.25 %	48.76 %	47.06 %	50.59 %

Tabela 3: Eficiências energética e exergética para o sistema econômico como um todo.

a: fotovoltaica. b: considerando a energia primária bruta no denominador.

c: considerando a energia secundária (elétrica) após transformação.

CONCLUSÕES PARCIAIS:

O projeto atingiu os resultados parciais esperados de obter a MIPF-en com os produtos finais exógenos de energia útil e dissipada, e de obter as eficiências energéticas (e exergéticas) para as fontes primárias que tem apenas transformação direta para eletricidade na economia.

A análise de sensibilidade de quais setores influenciam mais a eficiência da economia só pode ser realizada com a MIPF-en completa, i.e, representando todas as fontes primárias e cada secundária correspondente. Para isso, será necessário finalizar a metodologia para o caso faltante, implementar a análise de eficiência já feita para o caso simples e ampliar a análise conforme descrito na metodologia.

BIBLIOGRAFIA

- Altimiras-Martin, Aleix. 2014. "Analysing the Structure of the Economy Using Physical Input–Output Tables". *Economic Systems Research* 26 (4): 463–85. <https://doi.org/10.1080/09535314.2014.950637>.
- . 2024. "A supply-driven model consuming simultaneously all primary inputs: unfolding analytical potential beyond the Ghosh model". *Economic Systems Research* 36 (2): 249–64. <https://doi.org/10.1080/09535314.2022.2137008>.
- Chen, G. Q., e Bo Zhang. 2010. "Greenhouse gas emissions in China 2007: Inventory and input–output analysis". *Energy Policy*, The socio-economic transition towards a hydrogen economy - findings from European research, with regular papers, 38 (10): 6180–93. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.004>.
- Cullen, Jonathan M., e Julian M. Allwood. 2010. "Theoretical Efficiency Limits for Energy Conversion Devices". *Energy* 35 (5): 2059–69. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.01.024>.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. 2022. "Manual Metodológico do Balanço Energético Nacional". <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/manual-metodologico-do-balanco-energetico-nacional>.
- IBGE, org. 2018. *Matriz de insumo-produto Brasil, 2015*. Contas nacionais, número 62. Rio de Janeiro: IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101604>.
- Miller, Ronald E., e Peter D. Blair. 2009. *Input-output analysis: foundations and extensions*. 2nd ed. Cambridge UK: Cambridge University Press.
- MME, Ministério de Minas e Energia. 1995. "BALANÇO DE ENERGIA ÚTIL 1995 - MODELO DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA".
- . 2005. "Balanço Energia Útil 2005".
- Paoli, Leonardo, e Jonathan Cullen. 2020. "Technical Limits for Energy Conversion Efficiency". *Energy* 192 (fevereiro):116228. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116228>.
- Schaeffer, Roberto, e Robert M. Wirtshafter. 1992. "An exergy analysis of the Brazilian economy: From energy production to final energy use". *Energy* 17 (9): 841–55. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(92\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0360-5442(92)90102-6).
- Schipper, Lee, Fridtjof Unander, Scott Murtishaw, e Mike Ting. 2001. "INDICATORS OF ENERGY USE AND CARBON EMISSIONS: Explaining the Energy Economy Link". *Annual Review of Energy and the Environment* 26 (1): 49–81. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.49>.
- Shukla, Priyadarshi R., Jim Skea, Raphael Slade, Alaa Al Khourdajie, Renée van Diemen, David McCollum, Minal Pathak, et al., orgs. 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>.
- UNEP, United Nations Environment. 2011. *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth*. <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/9816>.
- Wiebe, Kirsten, Martin Bruckner, Stefan Giljum, e Christian Lutz. 2012. "CALCULATING ENERGY-RELATED CO₂ EMISSIONS EMBODIED IN INTERNATIONAL TRADE USING A GLOBAL INPUT–OUTPUT MODEL". *Economic Systems Research* 24 (2): 113–39.
- Wu, Yi-Hua, Chia-Hao Liu, Ming-Lung Hung, Tzu-Yar Liu, e Toshihiko Masui. 2019. "Sectoral Energy Efficiency Improvements in Taiwan: Evaluations Using a Hybrid of Top-down and Bottom-up Models". *Energy Policy* 132 (setembro):1241–55. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.043>.