Análise de caminho estrutural aplicada ao modelo de insumo-produto energético brasileiro: absorção e difusão energética intersetorial

Kaio Vital da Costa[1]

Área 8: Economia ecológica, mudança climática e sustentabilidade

Resumo

Este artigo aplica a Análise de Caminho Estrutural (SPA) a um modelo insumo-produto híbrido, construído com base na matriz de insumo-produto brasileira de 2019 (67 setores) e no Balanço Energético Nacional 2019 (BEN/EPE). O estudo contribui para a literatura ao compatibilizar o BEN com a MIP com 67 setores, permitindo a construção de indicadores de intensidade energética para a economia brasileira. O SPA é operacionalizado em duas direções: a perspectiva *backward* e *forward*. Os resultados permitem classificar os 67 setores em quatro quadrantes segundo seu poder de absorção e difusão energética. O Transporte Terrestre (4900), os Biocombustíveis (1992) e a Siderurgia (2491) emergem como difusores críticos; a Energia Elétrica (3500) distingue-se como difusor estrutural.

Palavras-chave: Insumo-produto ambiental; Análise de caminho estrutural; Intensidade energética; Modelo de Ghosh.

Abstract

This paper applies Structural Path Analysis (SPA) to a hybrid IO-Energy model built from Brazil's 2019 Input-Output Matrix (67 activities, IBGE) and the 2019 National Energy Balance (BEN/EPE). SPA is operationalised in two directions: the *backward* perspective, grounded in the Leontief inverse, decomposes the total energy intensity of each sector into contributions from specific supply paths; this is extended by a *forward* analysis based on the Ghosh (1958) supply-driven model, which identifies sectors critical for diffusing embodied energy through the client chain. Results classify 67 sectors into four quadrants according to their energy absorption and diffusion power. Road Transport (4900), Biofuels (1992), and Steel (2491) emerge as critical diffusers; Electricity (3500) stands out as a structural diffuser.

Keywords: hybrid input-output analysis; Structural path analysis; Energy intensity; Ghosh model.

JEL: C67; Q43; Q48; O13.

[1] Professor do Instituto de Economia da UFRJ, membro do Grupo de Indústria e Competitividade (GIC) e do Grupo de Economia do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (GEMA)

1. Introdução[2]

A mensuração da energia incorporada ao longo das cadeias produtivas constitui peça central do debate sobre transição energética, eficiência industrial e conformidade com mecanismos de precificação de carbono, como o *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) europeu. O governo brasileiro lançou vários planos setoriais com o objetivo de elaborar políticas para a descarbonização da economia. Nesse âmbito, o mais recente plano setorial de energia para a mitigação e a adaptação climática (Brasil, 2025) apresenta diretrizes para maior resiliência do setor. Essa maior resiliência estaria diretamente relacionada às interdependências que o setor mantém com os demais setores da economia. Contudo, um dos problemas dos documentos setoriais é a ausência de uma análise e diagnóstico explícito dessas interdependências setoriais. Essa lacuna parece decorrer de um instrumental analítico que deixa de lado o papel importante das cadeias produtivas na propagação das emissões e no consumo de energia.

A noção de cadeia produtiva está relacionada com a ideia de que determinado setor mantém determinadas relações diretas e indiretas com outros setores da economia. Disso derivam os conceitos clássicos de encadeamentos para trás e para frente para análise de setores-chave de uma economia. A importância de determinadas cadeias produtivas estaria relacionada com o grau de complexidade dessas interdependências, isto é, com a capacidade de difundir influência econômica aos demais setores. Essas influências podem assumir a forma de produção, emprego, renda ou determinado impacto ambiental. A possibilidade de rastrear os principais caminhos de influência econômica ou de impacto ambiental é um elemento crucial para o processo de formulação de políticas setoriais de descarbonização e eficiência energética. O caso do Brasil é interessante na medida em que combina uma matriz energética com alta participação de renováveis, mas com pauta exportadora intensiva em produtos de alta intensidade energética e emissões (Alvarenga Júnior, 2024) e herança rodoviarista baseada em combustíveis fósseis para o transporte terrestre. A especialização em commodities agrícolas, minerais e siderúrgicas, todos setores energo-intensivos e de alta participação na pauta exportadora, implica que a estrutura produtiva orienta sistematicamente o consumo energético para setores de menor valor agregado por unidade de energia consumida.

Para alcançar o objetivo de desenvolvimento sustentável, políticas setoriais adequadas são cruciais, uma vez que os setores econômicos não são ilhas isoladas. Qualquer medida tomada em relação a um setor provavelmente afetará outros setores por meio da interdependência econômica. Na literatura, a análise de insumo-produto ampliada para questões ambientais, proposta por Isard et al. (1968) e Leontief (1970), tem sido amplamente utilizada para estudar questões energéticas e ambientais e apoiar a formulação de políticas nacionais/regionais (Hoekstra, 2010; Su e Ang, 2012; Sato, 2014). A análise

[2] O processamento de dados contou com o uso de Inteligência Artificial (Claude Code) para aprimorar o código em Python.

de insumo-produto pode contabilizar as transações entre atividades interindustriais, a produção final e o consumo de bens e serviços na economia. De modo geral, os estudos utilizam os multiplicadores de Leontief como um indicador agregado da intensidade de emissões ou energética total de cada setor, mas não identificam por quais caminhos essa energia flui. Essa limitação é superada pela análise de caminho estrutural (*Structural Path Analysis,* SPA, na sigla em inglês), que decompõe o multiplicador em contribuições de sequências específicas de transações intersetoriais. Dessa forma, o método SPA permite especificar de forma explícita os principais caminhos estruturais[3] de difusão e absorção de diversas fontes energéticas.

Desenvolvido por Defourny e Thorbecke (1984) no contexto de matrizes de contabilidade social, o SPA foi adaptado para análises energéticas e ambientais por Treloar (1997) e formalizado matematicamente por Lenzen (2007). No Brasil, aplicações à estrutura produtiva são escassas, em especial combinando a perspectiva de para trás (*backward*) com a de difusão (*forward*) e articulando os dados físicos do balanço energético nacional com a matriz de insumo-produto. Este artigo preenche essa lacuna ao construir e aplicar um modelo de insumo-produto energético ou híbrido para a economia brasileira de 2019 a partir do método de caminhos estruturais em ambas as direções. A perspectiva *backward*, baseada na inversa de Leontief, identifica os caminhos pelos quais a intensidade energética se acumula na cadeia de fornecedores. A perspectiva *forward*, fundamentada no modelo de Ghosh (1958), identifica os setores que, ao produzir, irradiam energia incorporada para seus demandantes diretos e indiretos.

Os indicadores tradicionais de encadeamentos (para trás e para frente) respondem à pergunta: quais setores têm maior poder de encadeamento? Essa é uma abordagem útil para análises de políticas industriais. O SPA responde a uma pergunta mais específica: qual elo da cadeia deve ser prioritariamente afetado para reduzir o consumo energético total de um setor? O objetivo principal do presente estudo é analisar os principais caminhos estruturais de consumo energético, de modo a fornecer subsídios para políticas industriais de eficiência energética setoriais para a economia brasileira. Isso possui outra implicação de política econômica: regular setores críticos ou de alto poder de transmissão pode ser mais eficiente que regular emissores diretos, como aparece em documentos do governo brasileiro.

Para responder a essas perguntas, o estudo busca contribuir para a literatura a partir de duas frentes: por um lado, uma contribuição metodológica por meio da compatibilização do Balanço Energético Nacional (BEN) com as matrizes de insumo-produto (MIP); por outro lado, uma contribuição empírica, aplicando o método de análise de composição de caminhos estruturais (SPA). Isso significa que podemos estender a análise de insumo-produto com a adição de uma dimensão

[3] Qualquer noção de estrutura implica a intenção de destacar a dependência das partes de um objeto em relação à sua totalidade. É, portanto, o caráter relacional da totalidade que a análise estrutural procura compreender (Gazon, 1974).

ambiental, consumo energético, em nível setorial. Uma grande vantagem do uso da análise de insumo-produto ambiental é que as cadeias produtivas podem ser facilmente modeladas, permitindo identificar, a partir da rede, setores e fluxos/caminhos importantes do ponto de vista ambiental. Um setor crítico do ponto de vista ambiental, conforme identificado pela análise de setores-chave (Rasmussen, 1956; Hirschman, 1958; Hazari, 1970; Lenzen, 2003) é considerado um setor que contribui para a geração de maiores emissões ou menor eficiência energética (por exemplo, emissões de CO_2) na economia, não apenas através da aquisição de produtos intensivos em emissões e energia de outros setores *upstream*, mas também através da produção de produtos intensivos em emissões e energia no seu próprio setor. Portanto, uma política eficaz de redução de emissões ou maior eficiência energética consiste em aprimorar a tecnologia de produção do setor crítico, visando uma tecnologia mais limpa, com menor consumo de energia e emissões ambientais ao longo da cadeia produtiva do setor.

O trabalho está organizado em três seções além desta introdução e das conclusões. A Seção 2 apresenta a revisão da literatura. Já na seção 3, discutimos o modelo de insumo-produto híbrido com fontes energéticas e a concordância entre BEN–MIP. A Seção 4 discute os resultados e implicações.

2. Revisão da literatura

A análise de caminhos estruturais (SPA), proposta por Lantner (1974)[4] com base na análise de insumo-produto e generalizada por Crama et al. (1984) e Defourny e Thorbecke (1984) para a análise de uma matriz de contabilidade social, é uma ferramenta importante em análises estruturais. A vantagem da SPA é a capacidade de decompor os resultados da análise de uma matriz de insumo-produto em diferentes camadas ou caminhos, extraindo as ligações entre vários setores no sistema econômico. A SPA, nos primeiros estudos econômicos (por exemplo, Defourny e Thorbecke, 1984), enfatizava os caminhos de transmissão do setor inicialmente afetado para outras contas e os multiplicadores de caminho induzidos por circuitos intermediários ao longo do caminho, de modo a identificar os principais canais de transmissão por meio dos quais um choque de demanda exógeno influencia a economia. Quando o SPA foi posteriormente ampliado para estudar questões energéticas e ambientais, as aplicações passaram a se concentrar em camadas/estágios de transmissão, o que permitia explicitar as ligações para trás e para frente ao longo da transmissão.

[4] É interessante notar que a abordagem do SPA guarda uma relação com a abordagem de influência econômica desenvolvida por Lantner (1974) por meio da noção de grafo dirigido ou orientado. Ambas as abordagens partem da mesma constatação: a matriz de coeficientes técnicos A define um grafo dirigido sobre os setores da economia, onde uma aresta $(i \rightarrow j)$ existe se $A[j,i] > 0$ (j compra de i). O SPA pode ser lido como a quantificação algébrica do que Lantner descreve topologicamente. Cada caminho $p = (j \rightarrow k_1 \rightarrow k_2 \rightarrow \ldots \rightarrow k_n)$ no SPA corresponde exatamente a um caminho dirigido no grafo de Lantner. O CPC: $CPC(p) = e_dir[k_n] \times A[k_n, k_{n-1}] \times \cdots \times A[k_1, j]$ é o produto dos pesos dos arcos ao longo desse caminho, ponderado pela intensidade do nó terminal. A soma $\Sigma PPC(p)$ sobre todos os caminhos de comprimento n é o n-ésimo termo de Neumann, precisamente a contribuição de todos os caminhos de comprimento n ao multiplicador. A diferença é que Lantner se interessa pela existência e topologia dos caminhos, enquanto o SPA se interessa pela magnitude da contribuição de cada caminho a um multiplicador específico. Mas essa é uma discussão que foge ao escopo do estudo.

Desde então, vários estudos passaram a utilizar o método de SPA para proporcionar uma melhor compreensão dos fluxos exatos de energia incorporada e de emissões em diferentes escalas. Lenzen (2002) combina o SPA com a análise de processos para extrair caminhos importantes de consumo de energia, perturbações, uso de água e fluxos de emissões atmosféricas nos setores industriais australianos[5]. Peters e Hertwich (2006) combinam o SPA com a estrutura de insumo-produto multirregional para identificar as ligações ambientais nas redes de produção globais. Huang et al. (2009) aplicam a técnica SPA para analisar a pegada de carbono completa para frente[6], enquanto Lenzen e Murray (2010) utilizam a técnica para quantificar as responsividades das emissões para trás e para frente. Estudos mais recentes usando SPA sobre energia/emissões incluem Butnar et al. (2011) sobre a Espanha, Skelton et al. (2011) sobre o sistema de produção global, Hong et al. (2016), Liang et al. (2016) e Peng et al. (2018) sobre a China, Heun et al. (2018) sobre o Reino Unido e Li et al. (2018) sobre a Índia.

A utilização da abordagem por caminhos estruturais permite superar algumas limitações da abordagem clássica de encadeamentos. Os indicadores clássicos de encadeamentos (para trás e para frente) são indicadores puramente monetários, medindo encadeamentos sem distinguir a natureza do insumo ou do produto. O SPA projeta um vetor de intensidade energética sobre a estrutura de encadeamentos, de modo que cada caminho carrega informação sobre qual setor consome energia e por qual sequência de transações essa energia é acionada. Nesse sentido, dois setores com encadeamentos para trás idênticos podem ter perfis de SPA completamente distintos se a composição de seus fornecedores diferir em termos de intensidade energética. O que importa nessa abordagem é a contribuição de cada setor ao longo de determinados caminhos das cadeias produtivas.

Um setor pode ser topologicamente dominante (muitos caminhos passam por ele) sem ser energeticamente relevante (se os caminhos que passam por ele têm intensidade energética direta baixa nos setores finais), e vice-versa. A dominância topológica de um setor k é uma função de sua posição na rede produtiva, especificamente, do número de caminhos entre outros pares de setores que passam por k como setor intermediário. A relevância energética de k como setor intermediário, por outro lado, depende de duas condições simultâneas: que k apareça como setor em caminhos relevantes (condição topológica) e que o setor terminal desses caminhos apresente um elevado nível de intensidade energética (condição energética). No método SPA, a dominância se manifesta como concentração nos caminhos que passam por k. Assim, podemos dizer que o SPA é uma medida local e sequencial por percorrer os

[5] Utilizando a álgebra linear comumente empregada na literatura econômica, esses modelos rastreiam todas as transações ao longo da rede da cadeia produtiva, levando à demanda final dos bens produzidos pelos consumidores. Uma vez calculadas as compras econômicas totais necessárias para um determinado nível de demanda final, qualquer intervenção ambiental pode ser estimada, utilizando a análise de insumo-produto, multiplicando a produção de cada setor pelo seu impacto ambiental por unidade monetária de produção.

[6] Podemos dizer que o SPA "desmembra" as inúmeras contribuições para uma pegada de carbono de escopo 3 (emissões indiretas por consumo energético) completa para cadeias produtivas específicas, denominadas "caminhos". Assim, um SPA fornece a decomposição mais detalhada de uma pegada de carbono ou consumo energético baseada nas relações de insumo e produto que um setor mantém com os demais setores da economia.

caminhos um a um, atribuindo a cada um uma contribuição específica. A dominância emerge da comparação entre as magnitudes dos caminhos individuais.

É possível fazer uma distinção entre a dominância em termos de absorção e de transmissão. Essa distinção entre dominância de absorção e dominância de transmissão ao longo dos caminhos tem implicação direta para a política. Um setor dominante como consumidor terminal é candidato a políticas de eficiência interna: reduzir seu consumo direto diminui o peso de todos os caminhos que terminam nele, com efeito imediato e proporcional sobre o consumo total de todos os setores que o encadeiam. Um setor dominante como intermediário é candidato a políticas de substituição estrutural, porque alterá-lo na cadeia (substituí-lo por um fornecedor alternativo de menor intensidade) redireciona os caminhos para terminais menos energéticos, reduzindo o consumo energético total de todos os setores para trás.

3. Metodologia e base de dados

A matriz de insumo-produto (MIP) de 2019 desenvolvida por Alves-Passoni (2023) desagrega a economia brasileira em 67 atividades, com transações a preços correntes e constantes (2010) expressos em R$ milhões. O Balanço Energético Nacional (BEN, referência 2019) da EPE registra o consumo físico de 25 fontes energéticas por 22 categorias setoriais, em 10^3 toneladas equivalentes de petróleo (tep). As classificações setoriais do BEN e da MIP não são isomorfas, porque várias categorias do BEN agregam múltiplos setores da MIP. O *crosswalk* ou matriz de concordância entre BEN–MIP resolve essa incompatibilidade mediante três formas de ponderação propostas por Montoya et al. (2014). Este artigo utiliza o Método 3 de Montoya et al. (2014), que usa os fluxos interindustriais monetários Z_{ij} como ponderadores quando disponíveis, com *fallback* proporcional ao Valor Bruto da Produção (VBP) onde $Z = 0$. Para o presente estudo, utilizamos os coeficientes energéticos a preços de 2010, que é uma forma metodologicamente mais rigorosa para análises temporais.

3.1 Coeficientes energéticos e intensidades[7]

Seja $U_E \in \mathbb{R}^{n\times m}$ a matriz a matriz de uso de energia, medida em 10^3 tep/ano, na qual cada linha f representa uma fonte energética e cada coluna j um setor produtivo. Seja $VBP \in \mathbb{R}^n$ o vetor de valor bruto da produção setorial (R$ milhões). A intensidade energética da fonte f no setor j pode ser definida como

$$B_{E[f,j]} = \frac{U_{E[f,j]}}{VBP_{[j]}},$$

Onde $B_E \in \mathbb{R}^{n\times m}$ medido em 10^3 tep/ano por milhão de reais. Já a intensidade energética direta agregada do setor j é:

$$e_{dir[j]} = \sum_j B_{E[f,j]}.$$

Em notação matricial, temos:

$$e_{dir} = \mathbf{1}'B_E,$$

Onde $\mathbf{1}$ é um vetor coluna de uns com dimensão igual ao número de fontes energéticas. Sabendo que a matriz inversa de Leontief é dada por

$$L = (I - A)^{-1},$$

isso que implica a convergência da série de Neumann:

$$L = I + A + A^2 + \cdots + A^n.$$

Assim, podemos construir os multiplicadores energéticos totais, que são obtidos por

$$M_E = B_E L$$

[7] A intensidade energética total mede o volume de energia acionado em toda a cadeia produtiva de j por unidade monetária de demanda final. Trata-se de uma medida de encadeamento econômico-energético, não de eficiência tecnológica ou de balanço energético líquido. Seu domínio de validade pressupõe que o produto do setor j é um bem ou serviço cuja geração de valor não envolve a transformação de energia em energia, ou seja, que o valor monetário do produto não é determinado pelo conteúdo energético que ele carrega. Essa premissa é válida para a maioria dos setores industriais e de serviços: quando j é Siderurgia, o produto é aço; quando j é Celulose/Papel, o produto é fibra celulósica. Em ambos os casos, o insumo energético é um fator de produção utilizado no processo de transformação, e o produto final não é ele mesmo energia. O setor 1992 (Fabricação de Biocombustíveis) constitui uma exceção estrutural a essa lógica. Sua função econômica é precisamente transformar energia primária de baixa densidade (biomassa de cana-de-açúcar, soja, milho) em energia secundária de alta densidade e facilidade de uso (etanol anidro e hidratado, biodiesel). O produto do setor é ele mesmo um portador de energia. Nesse caso, parte da intensidade direta registrada no modelo não representa um custo energético de produção no sentido convencional, representa o conteúdo energético da matéria-prima que está sendo transformada. O mesmo raciocínio se aplica, com menor intensidade, aos setores 0680 (Extração de Petróleo e Gás), 1991 (Refino de Petróleo e Coquerias) e 3500 (Eletricidade, Gás e Outras Utilidades), todos os setores cuja produção consiste em extrair, transformar ou distribuir energia.

ou explicitamente:

$$M_E = B_E(I + A + A^2 + \cdots + A^n),$$

Onde $M_E \in \mathbb{R}^{n \times m}$[8].

Cada elemento $M_{E[f,j]}$ mede a energia total da fonte f (direta e indireta) requerida ao longo de toda a cadeia produtiva para atender R$ 1 milhão de demanda final do setor j.

Isso permite construirmos a intensidade energética total do setor j dada por

$$e_{total[j]} = \sum_j M_{E[f,j]}.$$

Em notação matricial, temos:

$$e_{total} = \boldsymbol{e}_{dir}\boldsymbol{L}.$$

Assim, o vetor e_{total} mede o requisito energético completo (direto + indireto) por unidade monetária de demanda final setorial.

3.2 SPA *backward*: absorção energética

Formalmente, um caminho backward de comprimento n, com destino no setor j, é definido como uma sequência ordenada:

$$p = (j \to k_1 \to k_2 \to \cdots \to k_n)$$

onde j é o setor que absorve a demanda final e k_né o setor cuja intensidade energética direta contribui, via encadeamentos produtivos, para o consumo total de energia incorporado em j.

A contribuição pura do caminho (*CPC, pure path contribution*) é dada por:

$$\mathrm{CPC}(p) = e_{k_n}^{\mathrm{dir}} \cdot A_{k_n,k_{n-1}} \cdot \ldots \cdot A_{k_1,j}$$

onde Aé a matriz de coeficientes técnicos.

[8] Em nosso caso, $M_E \in \mathbb{R}^{n \times m}$ é $M_E \in \mathbb{R}^{25 \times 67}$, isto é, uma matriz de 25 fontes energéticas por 67 setores.

Para diferentes comprimentos de caminho, obtém-se:

- **Comprimento 0 (efeito direto):**

$$\mathrm{CPC}(j) = e_j^{\mathrm{dir}}$$

- **Comprimento 1 (primeira ordem indireta):**

$$\mathrm{CPC}(j \to k) = e_k^{\mathrm{dir}} \cdot A_{k,j}$$

Esse termo representa o consumo energético incorporado nos insumos diretos utilizados por j, isto é, seus fornecedores imediatos.

- **Comprimento 2:**

$$\mathrm{CPC}(j \to k_1 \to k_2) = e_{k_2}^{\mathrm{dir}} \cdot A_{k_2,k_1} \cdot A_{k_1,j}.$$

Capturando efeitos indiretos de segunda ordem ao longo da cadeia produtiva.

De forma geral, a soma sobre todos os caminhos possíveis reproduz exatamente a intensidade energética total:

$$e_j^{\mathrm{total}} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{p \in \mathcal{P}_n(j)} \mathrm{CPC}(p)$$

onde $\mathcal{P}_n(j)$é o conjunto de todos os caminhos de comprimento $n$que terminam em j[9].

[9] Considere dois setores j e j' com $BL[j] = BL[j'] = 1{,}5$. Isso significa que $\Sigma_i\, L[i,j] = \Sigma_i\, L[i,j'] = 1{,}5$. Suponha que j encadeie predominantemente com setores de alta intensidade energética, siderurgia (2491), minerais não-metálicos (2300), celulose (1700), e j' encadeie com setores de baixa intensidade, como serviços financeiros, comércio, administração pública. Então: $e_total[j] = \Sigma_i\, e_dir[i] \times L[i,j] >> e_total[j']$ mesmo com $BL[j] = BL[j']$. O mesmo volume de produção encadeada carrega conteúdos energéticos radicalmente distintos dependendo de quem é encadeado. O BL não distingue, enquanto o SPA sim. Por construção, as decomposições SPA têm a tendência de distribuir a maior quantidade possível da intensidade total em sua forma direta, representando a queda múltipla das componentes de alta ordem. Portanto, a informação estrutural importante é derivada, acima de tudo, da relatividade da importância de caminhos curtos, mas não do próprio domínio do caminho principal.

3.3 SPA *forward*: difusão energética

Para capturar a perspectiva de difusão, utiliza-se o modelo de Ghosh (1958), que é um modelo frequentemente usado para análises pelo lado da oferta. Assim, em vez de propagar um choque de demanda final (Leontief), propaga um choque de oferta. A matriz B mede como o produto de um setor é distribuído entre os compradores intermediários.

$$B[i,j] = \frac{Z[i,j]}{VBP[i]}$$

onde

- $Z[i,j]$= fluxo intermediário do setor $i$para o setor j
- $VBP[i]$= valor bruto da produção do setor i

Logo,

$$\sum_{j} B[i,j] \leq 1$$

Pois parte da produção de $i$vai para demanda final.

3.4 CPC *forward* e o índice de difusão energética

Um caminho forward de comprimento n a partir do setor jé

$$p = (j \rightarrow k_1 \rightarrow k_2 \rightarrow \cdots \rightarrow k_n)$$

onde

- j= setor fornecedor inicial
- k_1= cliente direto
- k_2= cliente do cliente
- k_n= cliente de ordem n

A contribuição pura do caminho *forward* é

$$\mathrm{CPC}(p) = e_{dir}[j] \times B[j,k_1] \times B[k_1,k_2] \times \cdots \times B[k_{n-1},k_n]$$

Assim, o produto dos coeficientes mede a fração da produção inicial de j que chega ao setor k_n. Somando todos os caminhos possíveis que partem de j:

$$IDE_{fwd}[j] = \sum_{p:\, origem=j} CPC_{fwd}\,(p)$$

Utilizando a inversa de Ghosh $G = (I - B)^{-1}$, isso pode ser escrito de forma compacta:

$$IDE_{fwd}[j] = e_{dir}[j] \times FL_G[j]$$

onde

$$FL_G[j] = \sum_k G[j,k]$$

é o *forward linkage* de Ghosh[10].

3.5 Classificação por quadrantes

Combinando as dimensões de absorção e difusão, os setores podem ser classificados em quatro quadrantes segundo os seguintes critérios mostrados no Quadro 1: i. setor difusor crítico, ii. Setor absorvedor, iii. Setor difusor estrutural e iv. Setor periférico. Essa tipologia permite identificar que o grau de criticidade de um setor depende simultaneamente de dois fatores: i) a magnitude de sua intensidade energética direta, que reflete o consumo próprio de energia e (ii) sua capacidade de propagar o consumo energético ao longo das cadeias produtivas, capturada pelos encadeamentos intersetoriais. Isso significa dizer que os setores classificados como difusores críticos combinam elevado consumo direto de energia com forte capacidade de induzir consumo indireto nos demais setores da economia, desempenhando papel central na dinâmica energética do sistema.

[10] No caminho *backward*, a intensidade energética é do setor terminal (quem consome a energia na ponta da cadeia de fornecimento); no caminho *forward*, é do setor de origem (quem a irradia). Os indicadores de encadeamento não fazem essa distinção. Ademais, os encadeamentos *backward* e *forward* identificam setores-chave no sentido de Rasmussen-Hirschman: aqueles com BL e FL simultaneamente acima da média são classificados como chave. Mas um setor com BL alto pode alcançar esse valor por encadeamentos dispersos por dezenas de elos pequenos, ou por um único elo dominante, de modo que o BL não distingue.

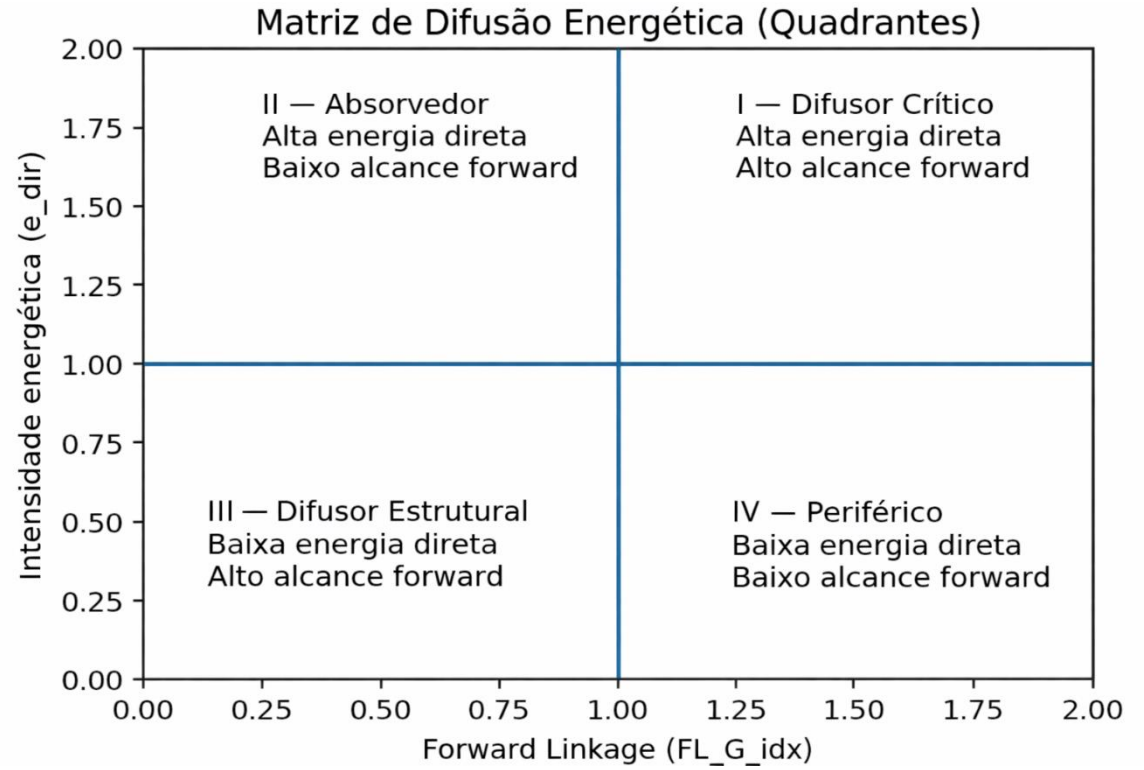
Tabela 1. Tipologia para classificação dos setores

Quadrante	Condição	Interpretação
I — Difusor crítico	$e_{dir} \geq média\ e\ FL_G \geq 1$	Setores intensivos em energia com forte capacidade de difusão na cadeia produtiva. Pequenas variações de produção propagam grande volume de energia pela economia.
II — Absorvedor	$e_{dir} \geq média\ e\ FL_G < 1$	Setores com alto consumo energético direto, mas baixo encadeamento *forward*. A energia tende a permanecer concentrada no próprio setor.
III — Difusor estrutural	$e_{dir} < média\ e\ FL_G \geq 1$	Setores pouco intensivos diretamente em energia, mas estruturalmente importantes como fornecedores na economia. Podem transmitir energia indiretamente via cadeias produtivas.
IV — Periférico	$e_{dir} < média\ e\ FL_G < 1$	Setores com baixa intensidade energética e baixo encadeamento *forward*. Seu impacto energético sistêmico é limitado.

Fonte: elaboração própria.

Com o objetivo de facilitar o entendimento, a Figura 1 sintetiza a discussão da Tabela 1, apresentando a matriz de difusão energética, construída a partir de duas dimensões: (i) a intensidade energética direta e_{dir}e (ii) o índice de encadeamento para frente (*forward linkage*), denotado por FL. Os eixos são normalizados em torno da média (por hipótese igual a 1), mostrando nos quatro quadrantes a disposição dos setores.

Figura 1. Classificação dos setores



Fonte: elaboração própria.

4. Discussão dos resultados

O padrão de consumo energético setorial será analisado a partir de quatro subseções, que buscam discutir de maneira integrada a forte concentração em um pequeno número de setores. O eixo central da análise será a aplicação do método de decomposição das trajetórias críticas de consumo energético setorial na economia brasileira. Os demais indicadores mobilizados fornecem subsídios complementares, de modo a realçar a dominância de setores como transporte terrestre e siderurgia no consumo energético nacional. Como teremos a oportunidade de discutir, a análise setorial do consumo energético fornece um melhor quadro analítico para a formulação de políticas voltadas a uma maior eficiência energética em nível setorial. Além disso, a análise por meio de trajetórias críticas também revela a importância de políticas setoriais integradas, realçando a importância dos efeitos de absorção e difusão dos padrões setoriais de consumo energético.

4.1 Padrão setorial de consumo energético e fluxos de energia incorporada entre setores

A Figura 2 mostra o consumo energético direto absoluto (em escala logarítmica) e a intensidade energética direta para 10 setores selecionados. Como esperado, o padrão do gráfico é determinado por um pequeno número de setores: transporte terrestre, siderurgia, papel e celulose, minerais não metálicos e minerais não ferrosos. O setor de transporte terrestre desloca-se consistentemente para cima e à direita ao longo da década: o consumo absoluto cresce de 65.000 para 76.000 × 10^3 tep e a intensidade real aumenta de 0,306 para 0,372, revelando um crescimento de 22% na intensidade por unidade de VBP.

A dependência do setor de transportes de combustíveis fósseis consolidou-se no Brasil em decorrência do investimento histórico na construção de estradas, em detrimento de modais mais eficientes, como ferrovias e hidrovias[11]. Isso significa que a posição do transporte terrestre como difusor crítico se mantém e torna-se mais intensiva no período em análise.

A trajetória da agropecuária distingue-se das demais por combinar crescimento do consumo absoluto com estabilidade da intensidade energética real. Esse padrão contrasta com os setores das indústrias de base, que apresentam elevação simultânea de consumo e intensidade. Isso sugere que a expansão da produção agropecuária, fortemente associada ao avanço da fronteira agrícola no Centro-Oeste e na região do MATOPIBA, foi acompanhada de um consumo energético proporcional, sem deterioração da eficiência por unidade de produto real, mas também sem ganhos expressivos. A mecanização crescente e o maior uso de defensivos e fertilizantes (setores 2092 e 2100, energo-intensivos) aparecem nos encadeamentos *backward* da agropecuária, o que limita os ganhos de eficiência que poderiam ser esperados da modernização do setor.

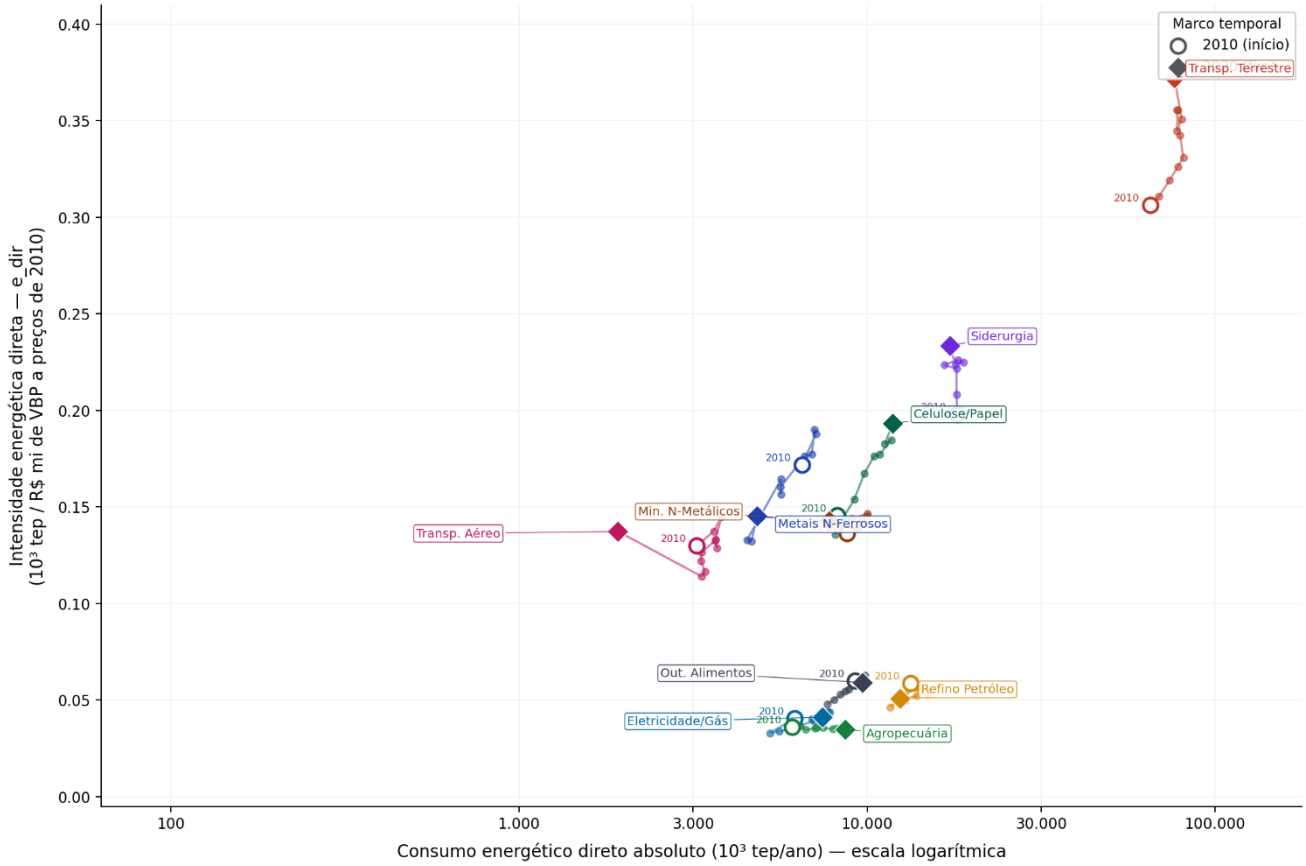
A trajetória da siderurgia revela um padrão de relativa estabilidade do consumo energético direto, mas com aumento da intensidade energética. A siderurgia brasileira contraiu sua produção real em cerca de 19% entre 2010 e 2020[12], mas a intensidade por unidade aumentou de 0,198 para 0,234. Esse padrão é compatível com três mecanismos complementares. Primeiro, a subutilização da capacidade instalada eleva o consumo energético por unidade de VBP, dada a presença de componentes quase fixos no uso de energia em processos contínuos. Segundo, mudanças no mix da produção podem aumentar a intensidade agregada mesmo na ausência de mudanças tecnológicas. Terceiro, a presença de rigidez tecnológica e irreversibilidades no capital produtivo limita ajuste de eficiência no curto prazo, reforçando o aumento da intensidade energética em períodos de recessão ou lento crescimento.

A trajetória do setor de celulose e papel vai para cima e à direita, com crescimento simultâneo de consumo e intensidade. O setor expandiu produção real (VBP volume cresce), mas o consumo energético cresceu mais do que proporcionalmente, elevando a intensidade de 0,146 para 0,193. Esse resultado pode refletir a expansão da capacidade para regiões mais distantes das florestas de eucalipto, cadeias logísticas mais longas com maior consumo de transporte incorporado, ou a entrada de novas plantas com menor eficiência energética relativa às instalações existentes.

[11] Um estudo da IEA (2021) aponta que o setor de transporte terrestre é um dos mais difíceis de serem descarbonizados. Outro fator seria a política de subsídios para a compra de carros e caminhões, que dependem de combustíveis fósseis (INESC, 2022).

[12] A produção da siderurgia brasileira contrai, especialmente após 2013, em função da recessão, da queda do consumo aparente doméstico e da concorrência do aço chinês. O que os dados mostram é que a intensidade piora não por ineficiência tecnológica crescente, mas porque os custos energéticos fixos são diluídos sobre um VBP real menor.

Figura 2. Consumo energético e intensidade energética entre 2010 e 2020 para os 10 principais setores



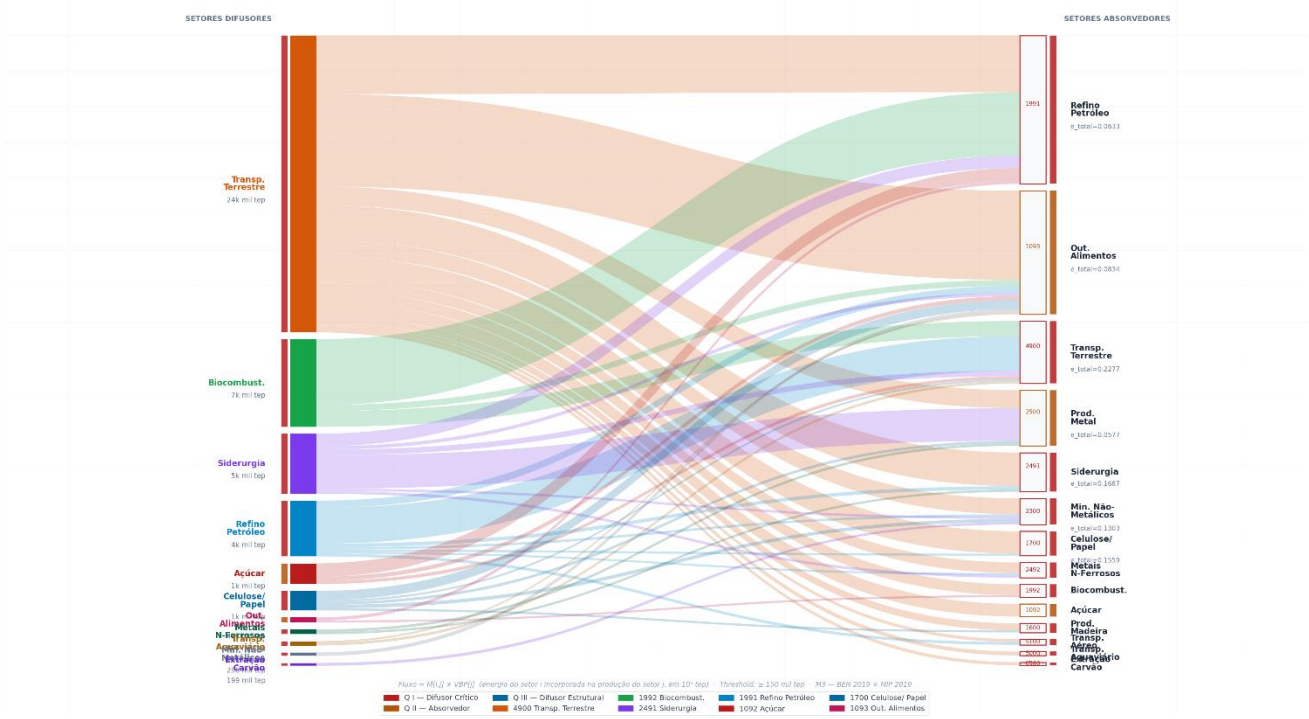
Fonte: elaboração própria.

Praticamente todos os setores exibem uma inflexão na trajetória entre 2014 e 2016, que é caracterizada como um período de recessão na economia brasileira. O padrão predominante é um movimento para a esquerda com manutenção ou elevação da intensidade: o consumo absoluto cai, mas a intensidade real não cai proporcionalmente. Isso é característico de setores com custos energéticos fixos elevados. A siderurgia (2491) ilustra isso com clareza, porque o VBP a preços constantes cai, mas o forno elétrico e o alto-forno não podem ser desligados sem custos extraordinários. Isso implica em um fenômeno conhecido como rigidez energética de curto prazo**,** ou seja, a intensidade energética é anticíclica porque o consumo de energia se ajusta mais lentamente que a produção. Su e Ang (2012) identificam precisamente esse padrão na SDA aplicada a economias em recessão: o efeito de intensidade tende a ser maior nos anos de queda de produto.

O Brasil apresenta uma das maiores participações do transporte rodoviário na matriz de consumo energético entre os países de renda média, que é uma herança direta do modelo de desenvolvimento consolidado entre os anos 1950 e 1970, privilegiando sistematicamente o modal rodoviário em detrimento de ferrovias e hidrovias. O que a Figura 3 mostra é que esse legado histórico não é apenas infraestrutural, sendo sedimentado na estrutura de coeficientes técnicos da matriz de

insumo-produto e, portanto, na distribuição da energia incorporada de toda a economia. Qualquer setor que demanda insumos intermediários no Brasil inevitavelmente aciona transporte rodoviário, e esse transporte carrega consigo uma intensidade energética direta de 0,187 × 10³ tep/R$ mi, que é uma das mais altas da economia.

Figura 3. Fluxos de energia incorporada entre setores difusores e absorvedores: Brasil 2019



Fonte: elaboração própria

A presença do setor de transporte terrestre (4900) como terceiro maior absorvedor à direita, ao mesmo tempo em que domina o lado dos difusores, ilustra um mecanismo denominado *energy trap* ou dependência de trajetória energética (*energy path dependency*). O refino de petróleo consome energia para produzir combustíveis que alimentam o transporte, que por sua vez demanda mais combustíveis do refino. Esse loop fechado não é trivial, pois implica que políticas de eficiência em transporte reduzem a demanda por combustíveis, o que alivia a demanda energética do próprio refino, um efeito de segunda ordem frequentemente ignorado em avaliações de impacto de políticas de mobilidade elétrica[13].

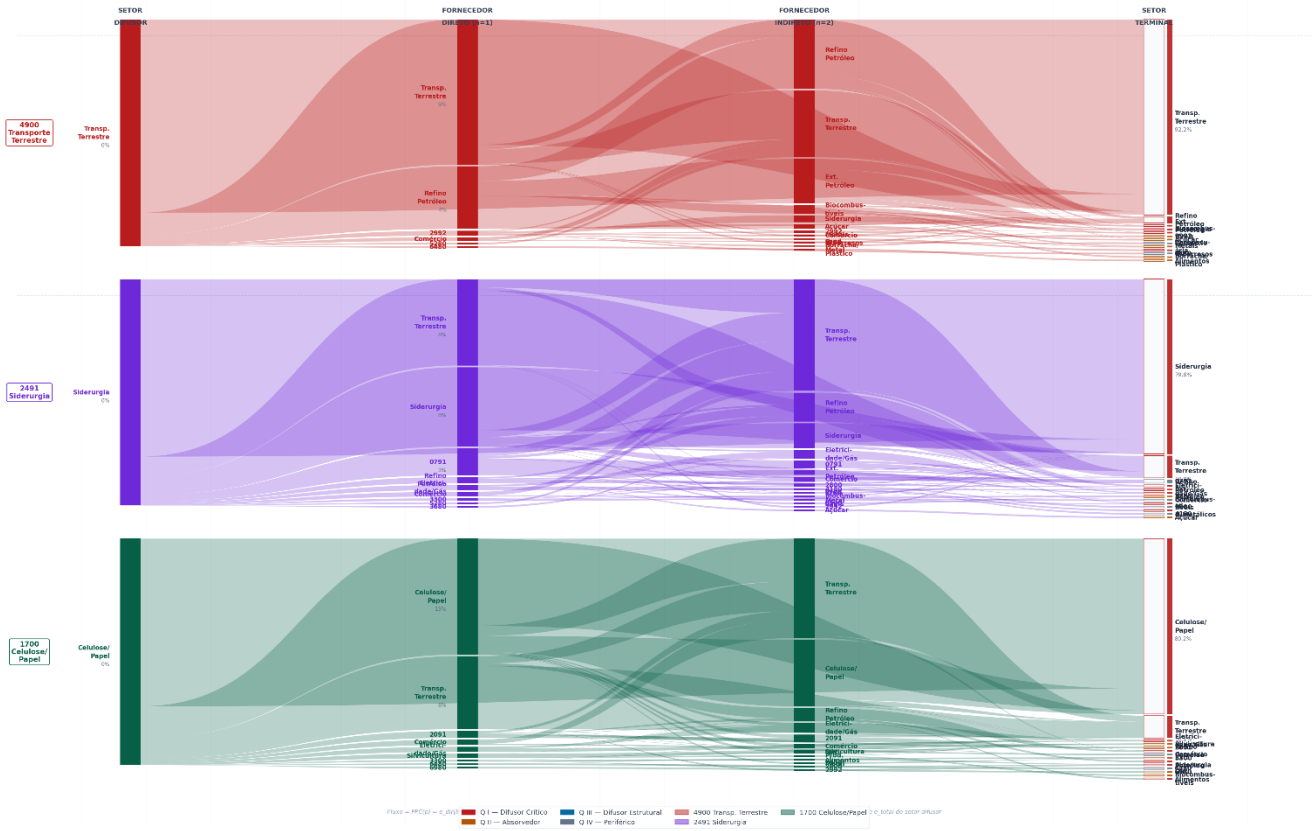
O padrão de dispersão dos fluxos de 2491 (Siderurgia) e 1700 (Celulose/Papel) para múltiplos absorvedores à direita reflete o papel desses dois setores como insumos básicos da estrutura produtiva brasileira, o que a literatura de insumo-produto denomina setores de alta sensibilidade de dispersão. A energia incorporada em aço e celulose se dissemina por toda a cadeia metalmecânica, de construção civil, de embalagens e de papel, tornando esses setores multiplicadores de impacto energético mesmo

[13] O fluxo concentrado de 1992 (Biocombustíveis) em direção a 1991 (Refino) é uma das características mais distintivas da matriz energética brasileira no contexto internacional. Diferentemente de outros grandes produtores de petróleo, o Brasil possui uma cadeia de biocombustíveis, etanol de cana e biodiesel de soja, que se integra funcionalmente ao setor de refino via mistura obrigatória (atualmente E27 para gasolina e B12 para diesel).

para políticas aparentemente distantes, como eficiência em habitação ou redução de embalagens plásticas[14].

Para o setor de transporte terrestre esse fluxo representa 82,5% da intensidade total, para Celulose/Papel 68,7%. Esse resultado é coerente com a literatura de decomposição estrutural de energia. Ang e Zhang (2000) e Su e Ang (2012) documentam sistematicamente que em economias em desenvolvimento o efeito de intensidade direta supera os efeitos de encadeamento indireto, ao contrário de economias mais integradas verticalmente. No caso brasileiro, a herança de uma industrialização truncada, com cadeias produtivas mais curtas do que as de economias asiáticas, implica que a intensidade energética se concentra principalmente nos nós diretos em vez de se distribuir por múltiplos elos de fornecimento.

Figura 4. Caminhos de absorção energética na estrutura produtiva brasileira (2019)



Fonte: elaboração própria

No bloco de Siderurgia (roxo) e no bloco de Celulose/Papel (verde), o Tier 2 é dominado por Transporte Terrestre como fornecedor direto de primeira ordem. O caminho 2491 → 4900 contribui com 7,1% da intensidade total da Siderurgia e 1700 → 4900 com 7,2% da intensidade total de Celulose/Papel. Isso revela que o transporte não é apenas consumidor final de energia, mas o principal

[14] Os benefícios de ganhos de eficiência em transportes ou siderurgia se distribuem por toda a cadeia *downstream*, mas os custos de investimento em eficiência recaem sobre os setores *upstream*. Esse é um argumento econômico clássico para intervenção regulatória ou de política industrial,

vetor de transmissão de energia incorporada para os setores industriais de base. É o equivalente energético do que Hirschman (1958) chamou de *linkage effects* do transporte, isto é, um setor que aparece como insumo em quase todas as cadeias produtivas e, por ter alto consumo energético direto, carrega energia incorporada significativa em cada uma dessas relações.

A diferença visual entre os três blocos traz um resultado importante: embora os três setores sejam classificados como difusores críticos (Quadrante I), seus perfis de encadeamento energético são distintos. Transporte concentra no autoconsumo e no refino; siderurgia concentra em transporte e extração mineral; celulose diversifica por transporte, comércio e silvicultura. Essa heterogeneidade interna é precisamente o que o SPA revela e que os indicadores de encadeamento agregados, BL e FL, não distinguem. Dois setores com BL idêntico podem ter árvores de caminhos SPA completamente distintas, como a Figura 3 mostra: a magnitude do fluxo principal é similar nos três blocos, mas a composição dos fluxos menores diverge de forma economicamente significativa para fins de política industrial.

4.2 SPA *backward*: estrutura dos caminhos energéticos

A Tabela 2 mostra os cinco principais setores em termos de consumo direto, consumo total e os três principais caminhos[15] para o ano de 2019. Os resultados sugerem uma dominância do consumo direto em todos os setores, porque o primeiro caminho, correspondente ao caminho de comprimento zero, responde de 69% a 83% da intensidade energética total nos setores analisados. Nesse sentido, o aspecto de maior relevância analítica da análise de caminhos estruturais está relacionado à identificação de caminhos indiretos que compõem os principais mecanismos de propagação de energia no sistema. Os caminhos de primeira ordem são responsáveis pela maior parte do efeito em rede, destacando o papel de setores energéticos intermediários, particularmente eletricidade e refino, como principais vetores de transmissão do consumo energético ao longo da estrutura produtiva. Além disso, esses são setores de cadeias produtivas relativamente curtas.

Tabela 2. Top-5 setores por consumo energético direto, total e três principais caminhos *backward* (CPC e participação no consumo energético total) - 2019

[15] O primeiro caminho é sempre o consumo direto do próprio setor j (ordem zero). Os caminhos subsequentes rastreiam fornecedores de primeira ordem ($j \rightarrow k$), segunda ordem ($j \rightarrow k \rightarrow m$) e assim por diante, sempre movendo-se para trás na cadeia produtiva, em direção às fontes primárias de energia.

Setor	e_dir (10^3tep/R$mi)	e_total (10^3tep/R$mi)	1º Caminho (CPC / %)	2º Caminho (CPC / %)	3º Caminho (CPC / %)
Transp. Terrestre	0,187	0,227	4900 (0.1873 / 82.5%)	4900 → 1991 (0.0047 / 2.1%)	4900 → 1991 → 0680 (0.0012 / 0.5%)
Siderurgia	0,124	0,169	2491 (0.1239 / 73.2%)	2491 → 4900 (0.0121 / 7.1%)	2491 → 0791 (0.0025 / 1.5%)
Celulose/Papel	0,097	0,141	1700 (0.0969 / 68.7%)	1700 → 4900 (0.0101 / 7.2%)	—
Min. N-Metálicos	0,089	0,129	2300 (0.0892 / 69.1%)	2300 → 4900 (0.0085 / 6.6%)	2300 → 1700 (0.0020 / 1.5%)
Impressão	0,097	0,124	1800 (0.0969 / 77.9%)	1800 → 1700 (0.0059 / 4.7%)	1800 → 4900 (0.0035 / 2.8%)

Fonte: elaboração própria.

4.3 SPA *forward*: setores difusores

A análise da Tabela 3 revela resultados similares em termos de ordenação dos principais setores, mas com algumas diferenças importantes. A análise para frente (*forward*) captura o quanto o consumo direto de um setor é propagado para outros setores por meio das cadeias produtivas. Os resultados revelam que setores como transporte terrestre, siderurgia e minerais não-metálicos apresentam elevada capacidade de difusão energética, com valores de EDI_{fwd} substancialmente superiores ao consumo direto. Como no caso dos setores absorvedores, o primeiro caminho *forward*, concentra a maior parcela do indicador, com valores entre 35% e 49%. No entanto, de maneira diferente do indicador *backward*, observa-se uma maior importância dos caminhos indiretos, especialmente de primeira ordem, parecendo refletir o papel desses setores como fornecedores intermediários amplamente utilizados.

Os resultados também revelam padrões estruturais claros, como, por exemplo, transporte terrestre e celulose/papel difundindo energia principalmente para setores de serviços e alimentos, enquanto siderurgia e minerais não metálicos estão fortemente conectados à cadeia industrial, incluindo metais e construção. Em conjunto, os resultados das análises de SPA em sentido *backward* e *forward* revelam uma estrutura assimétrica do uso de energia na economia brasileira. Enquanto a intensidade energética é determinada em grande parte pelo consumo do próprio setor (dominância retroativa), a propagação da energia pela rede de produção é impulsionada por um conjunto relativamente pequeno de setores-chave com fortes ligações progressivas.

Tabela 3. Top-5 setores por consumo energético direto, total e três principais caminhos *forward* (CPC e participação no consumo energético total) - 2019

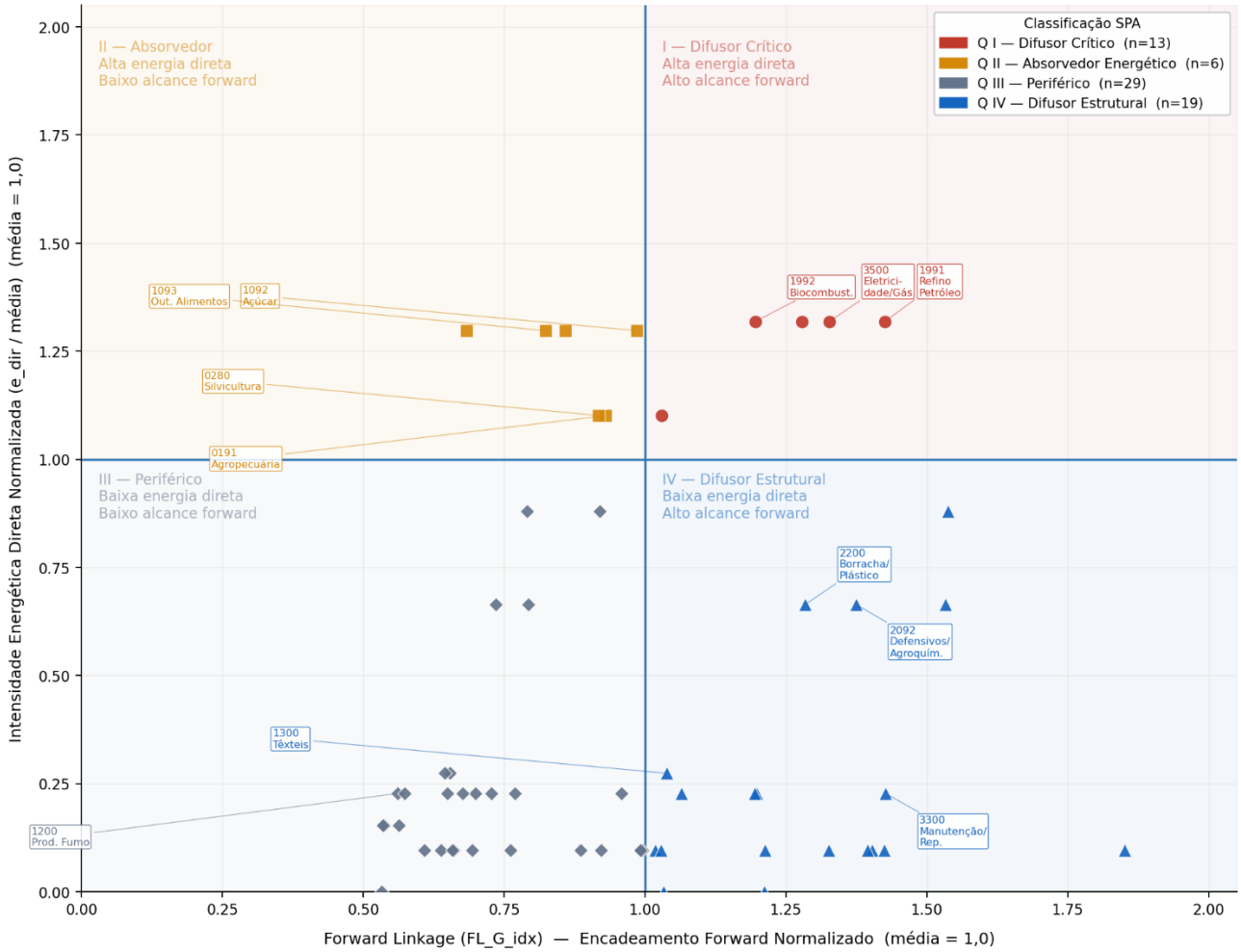
Setor	e_dir (10^3tep/R$mi)	EDI_{fwd} (10^3tep/R$mi)	1º Caminho (CPC / %)	2º Caminho (CPC / %)	3º Caminho (CPC / %)
Transp. Terrestre	0,187	0,436	4900 (0.187 / 43.0%)	4900 → 4580 (0.021 / 4.8%)	4900 → 1093 (0.011 / 2.5%)
Impressão	0,096	0,277	1800 (0.096 / 34.9%)	1800 → 4580 (0.031 / 11.3%)	1800 → 7380 (0.011 / 4.1%)
Siderurgia	0,123	0,272	2491 (0.123 / 45.4%)	2491 → 2500 (0.016 / 5.9%)	2491 → 4180 (0.010 / 3.9%)
Min. N-Metálicos	0,089	0,206	2300 (0.089 / 43.3%)	2300 → 4180 (0.045 / 22.0%)	2300 → 0191 (0.002 / 1.4%)
Celulose/Papel	0,096	0,197	1700 (0.096 / 49.0%)	1700 → 4580 (0.005 / 2.9%)	1700 → 1093 (0.003 / 1.9%)

Fonte: elaboração própria.

4.4 Tipologia setorial por consumo de energia: setores difusores críticos, absorvedores, difusores estruturais e periféricos

A Figura 5 abaixo mostra a disposição dos setores em torno das quatro tipologias propostas no presente estudo. Um primeiro resultado interessante é que distribuição dos 67 setores não é simétrica em torno dos dois eixos. O eixo vertical de intensidade energética apresenta alta concentração próxima de zero, de modo que a maioria dos setores tem intensidade direta muito baixa, com poucos *outliers* extremos no topo. O eixo horizontal tem distribuição mais uniforme. Isso implica que o poder de difusão *forward* é mais igualmente distribuído na estrutura produtiva brasileira do que o poder de absorção energética direta. Em termos da decomposição mais teórica, isso significa que a variância do consumo total entre setores é determinada muito mais pela heterogeneidade de intensidade energética do que pela heterogeneidade dos encadeamentos *forward*. Em outras palavras, o vetor de intensidade domina sobre a estrutura de encadeamentos na explicação das diferenças intersetoriais de intensidade total.

Figura 5. Localização dos 67 setores nos quatro quadrantes



Fonte: elaboração própria

Os 13 setores difusores críticos concentram os setores industriais de base da economia brasileira: transporte terrestre, siderurgia, biocombustíveis, celulose, minerais não-metálicos, metais não-ferrosos, transporte aéreo e aquaviário. Esses setores compartilham duas características interessantes: alta intensidade energética direta (consomem muito) e alto encadeamento *forward* (difundem muito). A posição de Transporte Terrestre como *outlier* extremo no eixo vertical, distante de todos os demais setores do próprio quadrante, é a evidência mais eloquente da dependência de trajetória rodoviarista da economia brasileira. O transporte não é apenas um grande consumidor, surgindo como um setor que, pela combinação de alta intensidade energética e alta capacidade de propagação, amplifica a intensidade energética de toda a cadeia produtiva via encadeamentos *forward*. Isso significa que qualquer política de descarbonização que ignore esse setor subestima sistematicamente o impacto energético indireto sobre os demais setores.

Os 6 setores absorvedores têm alta intensidade direta, mas com baixo efeito de propagação. Isso significa que consomem muita energia por real produzido, mas não a transmitem de forma relevante

para outros setores como insumo. À luz da SPA, esses setores são terminais energéticos: os caminhos *backward* de outros setores que terminam neles carregam um elevado CPC precisamente por causa da alta intensidade direta. O setor de Refino de Petróleo aparece como um destaque, porque parte de seu consumo direto é conteúdo energético da matéria-prima transformada, não custo de processo redutível. Mas os setores de Açúcar, Outros Alimentos e Fumo podem ser considerados como vulneráveis, dado que possuem alta intensidade direta com baixo poder de transmissão, o que os torna candidatos prioritários a políticas de eficiência interna sem expectativa de grandes externalidades positivas na cadeia. O setor de Eletricidade/Gás surge com um dos maiores efeitos de propagação, mas com intensidade energética abaixo da média. Isso ocorre porque a eletricidade é um setor de altíssima centralidade na rede produtiva, mas sua intensidade direta é modesta por causa das fontes energéticas majoritariamente menos poluentes e intensivas em energia.

5. Conclusão

O presente estudo aplicou a análise de caminho estrutural (SPA) ao modelo de insumo-produto híbrido com 26 fontes energéticas para a economia brasileira em 2019, operacionalizando tanto a perspectiva *backward* (via inversa de Leontief) quanto a *forward* (via modelo de Ghosh) a partir do método de análise de decomposição de caminhos estruturais. Tendo em vista a ausência de uma tabela de concordância entre as matrizes de insumo-produto e o balanço energético, foi necessária a construção de uma tabela de correspondência para compatibilizar os dados. O estudo apresenta uma dupla contribuição à literatura. A primeira é metodológica: a construção de uma tabela de concordância BEN–MIP pelo método proposto por Montoya et al. (2014), que utiliza os fluxos interindustriais monetários como ponderadores, produzindo coeficientes energéticos setoriais diferenciados para os 67 setores da MIP brasileira de 2019. A segunda é empírica: a aplicação da SPA em suas duas direções, *backward* via inversa de Leontief e *forward* via modelo de Ghosh, ao modelo de insumo-produto híbrido com 26 fontes energéticas, gerando uma taxonomia operacional de setores segundo seu poder de absorção e difusão energética.

Os resultados revelam que a intensidade energética total dos setores industriais intensivos é dominada pelo consumo direto, respondendo por 68 a 82% da intensidade total, com caminhos de segunda ordem via insumos primários constituindo os principais canais indiretos de transmissão. A classificação dos 67 setores em quatro quadrantes identifica 13 difusores críticos, 6 absorvedores, 19 difusores estruturais e 29 setores periféricos. Transporte Terrestre, Biocombustíveis e Siderurgia emergem como difusores críticos, combinando alta intensidade direta com alto encadeamento *forward*. O setor de Energia Elétrica configura-se como difusor estrutural, com encadeamento *forward* entre os maiores da economia, apesar de intensidade direta abaixo da média, o que implica que a

descarbonização da matriz elétrica propaga benefícios de eficiência para todos os setores demandantes via efeitos de segunda e terceira ordem.

A análise SPA revela que a intensidade energética total de um setor é codeterminada pela sua própria tecnologia de produção e pela intensidade energética de seus fornecedores ao longo da cadeia. No caso brasileiro, essa segunda dimensão é decisiva: o caminho *backward* 2491→4900 responde por 7,1% da intensidade total da siderurgia e 1700→4900 por 7,2% da intensidade total de celulose e papel, evidenciando que o transporte rodoviário, com intensidade direta de 0,187 × 10^3 tep/R$ mi, funciona como amplificador energético sistêmico, transferindo sua intensidade para todos os setores que o demandam como insumo intermediário. A estrutura produtiva é um determinante direto da intensidade energética total de cada setor e, por essa via, do esforço necessário para a transição energética.

A classificação por quadrantes fornece um critério operacional para priorizar intervenções de política energética segundo seu impacto sistêmico. Políticas direcionadas aos setores difusores críticos, especialmente o setor de transporte terrestre, produzem reduções simultâneas no consumo direto do setor e na energia incorporada propagada para os setores consumidores via encadeamentos *forward*. Especificamente, uma redução da intensidade energética de 4900, seja por eletrificação da frota, transferência modal ou melhoria de eficiência veicular, alivia o peso energético de todos os caminhos *backward* que o incluem como nó terminal ou intermediário, abrangendo a quase totalidade dos setores industriais de base brasileiros. Por sua vez, políticas direcionadas ao setor de energia elétrica, classificado como difusor estrutural, produzem externalidades positivas de larga escala sem exigir intervenção direta na tecnologia de processo dos setores demandantes, dado seu alto *forward linkage*. Essas duas lógicas de intervenção, sobre difusores críticos e sobre difusores estruturais, são complementares e não substitutas, constituindo a principal implicação de política derivada do presente estudo.

Uma das limitações do método utilizado no presente estudo, o SPA, é a condição de dependência do efeito do caminho de ordem zero sobre consumo energético total, a partir da qual a contribuição depende parcialmente da decomposição, atribuindo toda a importância ao consumo energético direto sem nenhuma correção por conta dos fatores de encadeamento. No entanto, uma extensão natural da análise poderia ser por meio da decomposição do consumo energético total em sua própria participação e efeito de rede. A ideia é separar o que é consumo energético próprio do setor do que é consumo incorporado via rede produtiva. Esse procedimento permitiria separar e definir efeito de fornecedores diretos dos efeitos de fornecedores indiretos de ordem superior. Uma combinação convexa de um componente de produção própria e um componente mediado pela rede, sendo que este último refletiria o grau em que o uso de energia está integrado nas cadeias de produção para trás (*upstream*).

Referências

ALVARENGA JUNIOR, M. Towards a structural carbonization of the Brazilian economy: the implications of recent structural changes for the country's greenhouse gas emissions. 2024. Tese (Doutorado em Economia) – Instituto de Economia – UFRJ, Rio de Janeiro, 2024.

ALVES-PASSONI, P.; FREITAS, F. Estimação de Matrizes Insumo-Produto anuais para o Brasil no Sistema de Contas Nacionais, Referência 2010. Pesquisa e Planejamento Econômico (PPE), v. 53, n. 1 (jan/abr.), 2023. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/13265/23/PPE_v53_n1_Artigo4_estimacao_de_matrizes.pdf.

ANG, B. W.; ZHANG, F. Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. Energy, v. 25, n. 12, p. 1149-1176, 2000.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. *Plano Clima Adaptação: Plano Setorial de Energia*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2024. Disponível em: Acesso em: 23 mar. 2026.

BUTNAR, I. et al. Atmospheric emissions and structural path analysis in the Spanish economy. In: Air Pollution: Economic Modelling and Control Policies. Bentham Science Publishers, 2011. p. 31-45.

DEFOURNY, J. Une approche structurale pour l'analyse Input-Output: un premier bilan. *Économie et Statistique*, n. 157, p. 29–44, 1983.

CARVALHO, P. S. L., MESQUITA, P. P. D., ARAÚJO, E. D. G. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. BNDES Setorial, 41, 181-236, 2015. Disponível em https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4287/2/BS%2041%20Sustentabilidade%20da%20siderurgia%20brasileira_.pdf

DEFOURNY, J.; THORBECKE, E. Structural path analysis and multiplier decomposition within a Social Accounting Matrix framework. *The Economic Journal*, v. 94, n. 373, p. 111–136, 1984.

EPE — EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2020: Ano-base 2019. *Brasília: EPE/MME*, 2020.

GHOSH, A. Input-output approach in an allocation system. *Economica*, v. 25, n. 97, p. 58–64, 1958.

HAZARI, B. R. Empirical identification of key sectors in the Indian economy. The review of economics and statistics, p. 301-305, 1970.

HEUN, Matthew Kuperus; OWEN, Anne; BROCKWAY, Paul E. A physical supply-use table framework for energy analysis on the energy conversion chain. Applied energy, v. 226, p. 1134-1162, 2018.

HIRSCHMAN, A.O. The Strategy of Economic Development. Yale University Press, New Haven, CT, USA, 1958.

HONG, J; SHEN, Q.; XUE, F. A multi-regional structural path analysis of the energy supply chain in China's construction industry. Energy Policy, v. 92, p. 56-68, 2016.

HUANG, Y. Anny et al. The role of input–output analysis for the screening of corporate carbon footprints. Economic Systems Research, v. 21, n. 3, p. 217-242, 2009.

IEA. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector (4th Revision, October, tech. rep.). International Energy Agency (IEA). Paris, France, 2021. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

IBGE — INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistema de Tabelas de Recursos e Usos — MIP 2019. *Rio de Janeiro: IBGE*, 2022.

INESC. Fossil fuels subsidies in Brazil: know, assess and reform (5th edition)**.** Brasília: INESC, 2022. Disponível em: https://inesc.org.br/en/fossil-fuels-subsidies-in-brazil-know-assess-and-reform-5th-edition/. Acesso em: 26 abr. 2026.

LANTNER, R. Théorie de la dominance économique. Dunod, Paris, 1974.

LEONTIEF, W. Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach. *Review of Economics and Statistics*, v. 52, n. 3, p. 262–271, 1970.

LENZEN, M. A guide for compiling inventories in hybrid life-cycle assessments: some Australian results. Journal of Cleaner Production, v. 10, n. 6, p. 545-572, 2002.
LENZEN, M. Environmentally important paths, linkages and key sectors in the Australian economy. Structural Change and Economic Dynamics, v. 14, n. 1, p. 1-34, 2003.
LENZEN, M. Structural path analysis of ecosystem networks. *Ecological Modelling*, v. 200, n. 3–4, p. 334–342, 2007.
LENZEN, Manfred; MURRAY, Joy. Conceptualising environmental responsibility. Ecological economics, v. 70, n. 2, p. 261-270, 2010.
LIANG, Sai; QU, Shen; XU, Ming. Betweenness-based method to identify critical transmission sectors for supply chain environmental pressure mitigation. Environmental Science & Technology, v. 50, n. 3, p. 1330-1337, 2016.
MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. Input-Output Analysis: Foundations and Extensions. 2. ed. *Cambridge: Cambridge University Press*, 2009.
MONTOYA, M. A.; LOPES, R. L.; GUILHOTO, J. J. M. A desagregação da Matriz de Insumo-Produto com o Balanço Energético Nacional: uma aplicação para o Brasil em 2008. *Economia Aplicada*, v. 18, n. 3, p. 379–419, 2014.
PENG, J. et al. Analysis of driving factors on China's air pollution emissions from the view of critical supply chains. Journal of Cleaner Production, v. 203, p. 197-209, 2018.
PETERS, G. P.; HERTWICH, E. G. The importance of imports for household environmental impacts. Journal of Industrial Ecology, v. 10, n. 3, p. 89-109, 2006.
PETERS, G. P.; HERTWICH, E. G. Structural analysis of international trade: environmental impacts of Norway. *Economic Systems Research*, v. 18, n. 2, p. 155–181, 2006.
RASMUSSEN, P.N. Studies in Intersectoral Relations. North-Holland, Amsterdam, Netherlands, 1956.
SKELTON, A. et al. Mapping flows of embodied emissions in the global production system. Environmental Science & Technology, v. 45, n. 24, p. 10516-10523, 2011.
SU, B.; ANG, B. W. Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: some methodological developments. Energy Economics, v. 34, n. 1, p. 177-188, 2012.
TRELOAR, G. J. Extracting embodied energy paths from input-output tables: towards an input-output-based hybrid energy analysis method. *Economic Systems Research*, v. 9, n. 4, p. 375–391, 1997.