

IAGO GOMES GONÇALVES

**EMERGÊNCIA ENERGÉTICA: IMPACTOS ECONÔMICOS DO AUMENTO DO
CONSUMO DE ENERGIA PELO SETOR DE ENERGIA**

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

Orientador: Ian Michael Trotter

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

G635e
2023
Gonçalves, Iago Gomes, 1997-
Emergência energética: impactos econômicos do aumento
do consumo de energia pelo setor de energia / Iago Gomes
Gonçalves. – Viçosa, MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (83 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Ian Michael Trotter.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Economia Rural, 2023.

Referências bibliográficas: f. 61-67.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.138>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Recursos energéticos. 2. Energia - Consumo. 3. Energia -
Custos. 4. Política energética. I. Trotter, Ian Michael, 1983-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Economia
Rural. Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada.
III. Título.

CDD 22. ed. 333.79

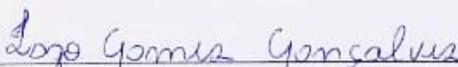
IAGO GOMES GONÇALVES

**EMERGÊNCIA ENERGÉTICA: IMPACTOS ECONÔMICOS DO AUMENTO
DO CONSUMO DE ENERGIA PELO SETOR DE ENERGIA**

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

APROVADA: 02 de março de 2023.

Assentimento:



Iago Gomes Gonçalves

Autor



Ian Michael Trotter

Orientador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todos que, de alguma forma, estiveram presentes durante os últimos dois anos e contribuíram para a elaboração deste trabalho. Agradeço especialmente a todas as pessoas que, constantemente, me inspiram e fazem parte da minha formação intelectual.

À minha família, agradeço em especial aqueles que sempre acreditaram e torceram por mim.

Aos meus avôs Zé Moitinha e Joaquim Gonçalves, às minhas avós Elena Maria e Geralda Francisca, que eu tenho o privilégio de contar com a presença e serem sinônimos de cuidado e de luta durante a vida.

Aos meus pais Andréa e Ronaldo e à minha irmã Rafaella, por sempre me apoiarem e por serem inspiração de luta.

Aos meus tios Márcio e Marcelo que desde sempre me mostraram a capacidade transformadora da Universidade. Hoje, ocupo um espaço que eles alcançaram e me incentivaram a buscar. Serei eternamente grato.

À minha querida companheira Jéssica, por todo carinho e afeto, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, acompanhando cada etapa e me incentivando a não desistir do propósito que tanto almejo. Um sonho ganha novos significados, quando é compartilhado e vivido ao lado de pessoas especiais.

Ao meu orientador Ian Michael Trotter, por não medir esforços em transmitir seus conhecimentos. Com certeza sempre será uma fonte de inspiração.

Aos membros da banca de defesa, Dr. Dênis Antônio da Cunha e Dr. Cícero Zanetti de Lima pelas contribuições importantes.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação e por representar um ambiente tão acolhedor e propício à pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada do departamento de Economia Rural pelos ensinamentos de excelência.

Aos demais funcionários DER que sempre cuidaram tão bem desse ambiente que por dois anos foi minha segunda casa.

Aos amigos de longa data, aos amigos da República Ventania, em especial Emerson e Pedro Vieira, e também àqueles que pude conhecer e fortalecer laços neste período em Viçosa, em especial Cadu, Daniel e Felipe.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Não terei as coisas finas e luxuosas da vida para deixar como legado. Mas só quero deixar de herança uma vida de dedicação. E isso é tudo que eu queria fazer”.

(Martin Luther King Jr.)

RESUMO

GONÇALVES, Iago Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2023. **Emergência Energética: Impactos econômicos do aumento do consumo de energia pelo setor de energia.** Orientador: Ian Michael Trotter.

A energia é um elemento essencial para o bem-estar da humanidade e está intrinsecamente ligada à atividade econômica. No entanto, a alta dependência de recursos fósseis e o aumento da demanda por energia geram incertezas em relação às implicações na economia. Por essa razão, este estudo investigou como um aumento no consumo de energia pelo setor de energia afetará o restante da economia. O estudo iniciou-se calculando o indicador "Energy Return on Investment" (EROI) para os países selecionados pela base de dados da OCDE e globalmente de 1995 a 2018, usando matriz insumo-produto para identificar os insumos diretos e indiretos usados pelo setor energético na produção de energia. Em seguida, verificou-se o comportamento da série de tempo do EROI global e foi feita a previsão do EROI global até 2049. Por fim, avaliaram-se os impactos do EROI global estimado para 2049 sobre a produção total, considerando as observações disponíveis até 2018. Os resultados indicam que a maioria dos países apresentaram valores de EROI baixos com quedas graduais ao longo dos anos, assim como o EROI global. As estimativas sugerem que a produção de energia atual não é sustentável e que os insumos de produção, principalmente energia, precisam ser alocados no setor de energia para fornecer a sociedade a quantidade mínima de energia, para que o sistema econômico continue operando. Identificou-se uma tendência decrescente nos dados observados e, ao realizar a previsão até 2049, as estimativas mantiveram a tendência de queda esperada. Ao avaliar a produção total, identificou-se um aumento de 3,19% na produção total entre 2018 e 2049, indicando que é necessário aumentar a produção total da economia em cerca de 3,19% para satisfazer a demanda energética. Especificamente para o setor energético, observou-se um aumento de 25,16% na produção total entre 2018 e 2049, o que significa que é necessário que a produção do setor de energia aumente em 25,16% para satisfazer a demanda interna do setor de energia e garantir o mesmo nível de produção da economia como um todo.

Palavras-chave: EROI. Consumo de energia. Energia incorporada. Insumo-produto.

ABSTRACT

GONÇALVES, Iago Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa March, 2023. **Emergência Energética: Impactos econômicos do aumento do consumo de energia pelo setor de energia.** Advisor: Ian Michael Trotter.

Energy is an essential element for human well-being and is intrinsically linked to economic activity. However, heavy dependence on fossil fuels and increasing energy demand create uncertainties regarding the implications for the economy. Therefore, this study investigates how an increase in energy consumption by the energy sector will affect the rest of the economy. The study began by calculating the "Energy Return on Investment" (EROI) indicator for the countries available in the OECD database and globally from 1995 to 2018, using input-output matrices to identify the direct and indirect inputs used by the energy sector in energy production. Then, the behavior of the global EROI time series was examined and the global EROI was forecasted until 2049. Finally, the impacts of the estimated global EROI for 2049 on total production were evaluated, considering the observations available until 2018. The results indicate that most countries had low EROI values with gradual declines over the years, as did the global EROI. The estimates suggest that current energy production is not sustainable, and that production inputs, mainly energy, need to be allocated to the energy sector to provide society with the minimum amount of energy necessary for the economic system to continue operating. A decreasing trend was identified in the observed data, and the forecasts maintained the expected downward trend. When evaluating total production, an increase of 3.19% was identified between 2018 and 2049, indicating that it is necessary to increase total production of the economy by about 3.19 percent to satisfy the additional energy demand. Specifically for the energy sector, a 25.16% increase in total production between 2018 and 2049 was observed, meaning that it is necessary for the energy sector production to increase by 25.16% to satisfy the internal demand of the energy sector and supply the same final demand for the economy as a whole.

Keywords: EROI. Energy consumption. Embodied energy. Input-output.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo mundial de energia em quatrilhão de BTUs entre 1980 e 2019.	11
Figura 2 - Consumo de energia do Brasil em quatrilhão de BTUs entre 1980 e 2019.	13
Figura 3 - Média aritmética, mediana e média geométrica do EROI dos países.	42
Figura 4 - Nível do EROI em 2018 das 67 economias avaliadas.	43
Figura 5 - Média do EROI dos países entre 1995 e 2018.	44
Figura 6 - EROI do Brasil entre 1995 e 2018.	47
Figura 7 - EROI global entre 1980 e 2018.	49
Figura 8 - Logaritmo natural do EROI global entre 1995 e 2018.	51
Figura 9 - Previsão do EROI global de 2018 a 2049.	53
Figura 10 - EROI global observado e previsto.	54
Figura 11 - Produto total global (em trilhões de US\$) em 2018 e 2049.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Esquema de uma matriz insumo-produto para uma economia com 2 setores.....	26
Tabela 2 - Exemplo de Matriz inversa de Leontief	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Considerações iniciais	10
1.2. O problema e sua importância	14
1.3. Hipótese	19
1.4. Objetivos	19
1.4.1. Objetivo Geral	19
1.4.2. Objetivos específicos	19
2. REVISÃO DE LITERATURA	20
3. REFERENCIAL METODOLÓGICO	25
3.1. Análise de Insumo-Produto	25
3.2. Calculando o EROI	27
3.3. Análise de Tendência	34
3.4. Previsão	36
3.5. Impactos econômicos de mudanças no EROI	39
3.6. Descrição e Fonte dos Dados	40
4. RESULTADOS	41
4.1. Estimando o EROI por país e EROI global	41
4.2. Tendência do EROI global	51
4.3. Previsão do EROI global	52
4.4. Impactos do valor estimado para o EROI na economia	55
5. DISCUSSÃO	56
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICES	68

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A adoção da Agenda 2030¹ para o Desenvolvimento Sustentável pelos países Membros das Nações Unidas, forneceu um instrumento importante de cooperação internacional direcionada ao alcance de níveis desejáveis de sustentabilidade. Nessa perspectiva, a energia é reconhecida como um elemento de investigação fundamental, visando um horizonte socioeconômico próspero e promissor, à medida que se revela entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)² dos países, a garantia de energia limpa, acessível e moderna para todas as pessoas até 2030 (UN GENERAL ASSEMBLY, 2015). Portanto, a energia é um fator fundamental para a prosperidade humana e é indissociável da atividade econômica. À vista disso, o aumento de energias renováveis na composição da matriz energética e a duplicação da taxa global de eficiência energética se configuram como tarefas essenciais a serem cumpridas (GIELEN *et al.*, 2019).

Conforme International Energy Outlook (2021), há sinais inconfundíveis de que uma nova economia energética está emergindo. No entanto, apesar do mundo acompanhar a ascensão do processo de transformação energética em termos de produção e práticas de consumo sustentáveis, há diversas circunstâncias que não garantem a maneira pela qual essas mudanças ocorrerão. Nessa perspectiva, a demanda crescente por energia primária se destaca, sobretudo a demanda por combustíveis fósseis (por exemplo carvão, gás natural e petróleo), pois, atualmente, são as principais fontes de energia, em termos globais, para a indústria, geração de energia e transportes (KAMARULZAMAN; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2021). Assim, para a sociedade alcançar níveis aceitáveis de desenvolvimento sustentável, é preciso monitorar a relação entre demanda por produtos, recursos e serviços, juntamente com a oferta de recursos naturais primários (CASTELAO; SOUZA; FRAINER, 2019).

Na atualidade, o aumento da demanda por combustíveis fósseis se deve, especialmente, à retomada da atividade econômica, mas ressalta-se que o cenário de pandemia ofuscou as mudanças estruturais em processo no setor de energia (ENERDATA, 2021). Em contraste, anterior a pandemia, em anos recentes, o crescimento da demanda por energia foi impulsionado pelo crescimento econômico e uma maior procura por aquecimento e refrigeração em algumas

¹ A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável diz respeito ao plano de ação construído e compartilhado entre os países visando garantir a prosperidade das pessoas e do planeta, por meio da adoção de 17 ODS. Mais detalhes disponíveis em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.

² Os ODS representam um apelo à ação conjunta dos países a fim de se cumprirem as diretrizes adotadas na Agenda 2030. Para mais detalhes sobre os 17 ODS ver: <https://sdgs.un.org/goals#history>.

regiões do mundo (IEO, 2019). Desse modo, embora a configuração do consumo de energia tenha se alterado em cenário pandêmico, o aumento da demanda global por energia nos próximos anos tende a retomar os padrões anteriores à pandemia e continuar crescendo (KAMARULZAMAN; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2021).

Atualmente, o consumo de energia é sustentado pela extração de combustíveis fósseis e corresponde a aproximadamente 80% do consumo global de energia (HUSSAIN; KHAN; ZHOU, 2020). Diante da magnitude dos problemas associados ao modelo de desenvolvimento atual, apoiado na alta dependência das economias por energia baseada em recursos fósseis, inúmeras preocupações surgiram a pelo menos meio século, a respeito da viabilidade e sustentabilidade de sistemas econômicos firmados, sobretudo, em combustíveis fósseis (DEFNEY, 2006; BRANDT, 2011; CASTELAO; SOUZA; FRAINER, 2019). Dessa maneira, é reconhecido que as consequências desse modelo de desenvolvimento atingem o tripé da sustentabilidade, o qual compreende as dimensões ambiental, econômica e social.

Nesse sentido, a gestão eficiente de recursos energéticos torna-se uma das condições essenciais na realização de sistemas socioeconômicos mais sustentáveis, a fim de atenuar as implicações negativas ao bem-estar da sociedade (RANA *et al.*, 2020). Ademais, a razão pela qual as economias dependem expressivamente de combustíveis fósseis diz respeito ao seu baixo custo, eficiência energética e alta disponibilidade (MALEK; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2020). Para fins ilustrativos, a figura 1 retrata a distribuição do consumo total de energia no mundo, em que se destaca a proporção correspondente aos combustíveis de origem fóssil.

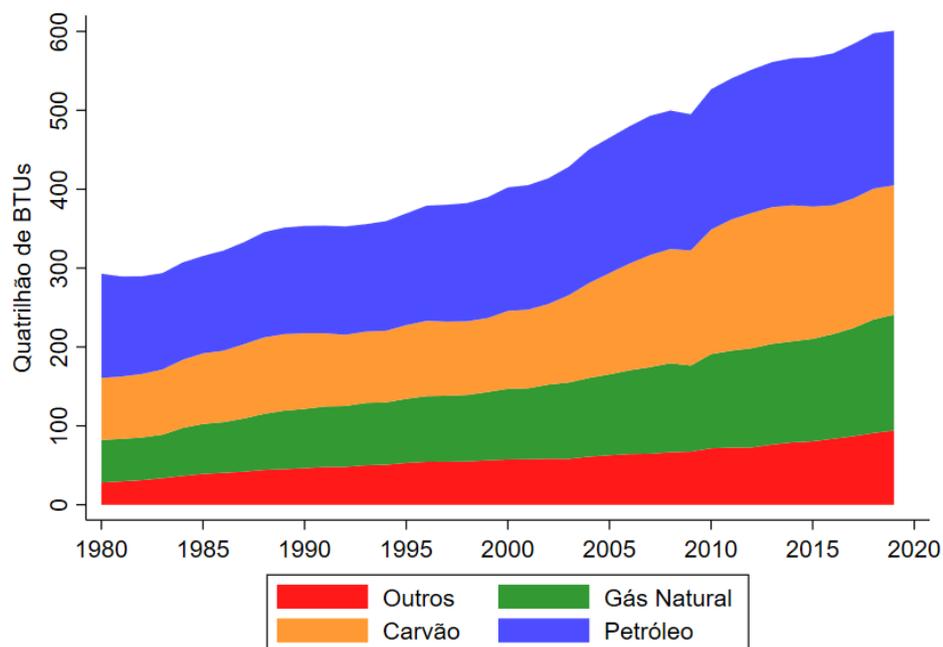


Figura 1 - Consumo mundial de energia em quatrilhão de BTUs entre 1980 e 2019.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados da U.S. Energy Information Administration (EIA).

É possível observar na figura 1 o consumo mundial dos três principais combustíveis fósseis utilizados como energia (petróleo, carvão e gás natural), e também o consumo de energia proveniente de outras origens, incluindo fontes renováveis, de 1980 a 2019. Observa-se a proporção que tais combustíveis fósseis ocupam no consumo total, como também a tendência crescente de consumo. Logo, o cenário de consumo global de energia revela a necessidade de cautela quanto ao crescente consumo de energia, sobretudo aquelas provenientes de fontes não renováveis. No entanto, embora as fontes de energia renovável se configurem entre os principais elementos que garantirão níveis de sustentabilidade aceitáveis nas próximas décadas, ainda assim, sua proporção atual em termos de consumo corresponde a uma fração pequena do consumo total, em contraste ao alto consumo de recursos fósseis.

No Brasil, aproximadamente 45% da matriz energética é formada por fontes renováveis, o que é muito superior ao padrão encontrado em outros países do mundo, fazendo com que o setor energético do Brasil seja um dos mais sustentáveis em termos de emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2022). Ao longo das últimas décadas, o consumo de energia no Brasil aumentou significativamente, com destaque para a maior demanda por eletricidade e combustíveis para transporte, motivado, sobretudo, pelo crescimento econômico do período (IEO, 2022).

A matriz energética brasileira é considerada uma das mais limpas do planeta, tendo em vista que cerca de 80% da geração doméstica de eletricidade advém das hidrelétricas, o que denota o comprometimento do Brasil com a estratégia de manutenção da sua matriz energética, aliada à política de segurança energética (FREITAS *et al.*, 2019). No entanto, há diversos danos socioambientais associados a construção das hidrelétricas no Brasil (RANDELL, 2016; HESS; FENRICH, 2017). Um dos impactos socioambientais mais significativos associados a construção das hidrelétricas, se refere a migração forçada, ou reassentamento, em grande escala de pessoas para dar lugar a reservatórios das hidrelétricas (RANDELL, 2017; MAYER *et al.*, 2021).

Os recursos não renováveis ainda possuem peso razoável na composição da matriz energética nacional, mesmo que os níveis de consumo sejam substancialmente inferiores aos níveis dos países que mais consomem energia. À vista disso, a figura 2 mostra a distribuição do consumo de energia do Brasil.

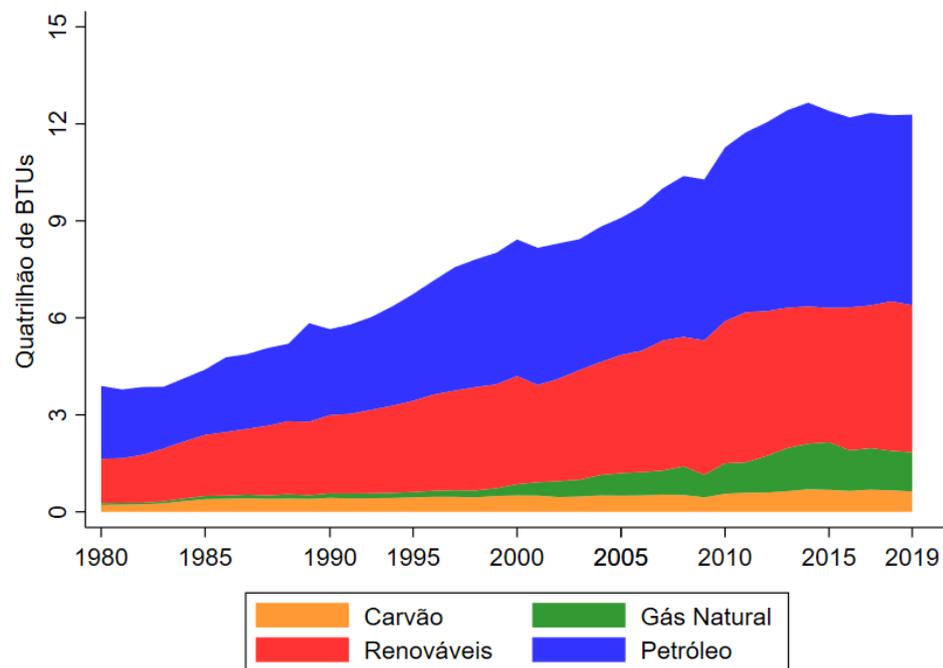


Figura 2 - Consumo de energia do Brasil em quatrilhão de BTUs entre 1980 e 2019.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados da U.S. Energy Information Administration (EIA).

É possível observar na figura 2 o consumo dos três principais combustíveis fósseis utilizados como energia no Brasil (petróleo, carvão e gás natural) entre 1980 e 2019, bem como a parcela significativa que os recursos renováveis representam no consumo total. Em geral, constata-se que a tendência crescente de consumo de energia no Brasil ao longo das últimas décadas acompanhou a tendência mundial, como observado na figura 1.

Ademais, embora os recursos renováveis representem uma parcela significativa do consumo de energia no Brasil, os recursos fósseis ainda se encontram em evidência, especialmente o petróleo e seus derivados³. Mesmo que o petróleo e seus derivados sejam essencialmente os principais recursos energéticos consumidos no Brasil, o gás natural e carvão vegetal não possuem peso tão significativo como em outros países, ao passo que os recursos renováveis estão se estabelecendo na matriz energética nacional, ao contrário das maiores economias consumidoras de energia do mundo.

Dessa maneira, haja vista os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, as atuais políticas energéticas do Brasil estão à altura dos desafios energéticos mais urgentes do mundo. Entretanto, como destacam Rao, Min e Mastrucci (2019), a questão sobre

³ Em 2019, o petróleo e seus derivados corresponderam a 34,4% do consumo, enquanto o gás natural representou 12,2%, o carvão mineral 5,3% e outros não renováveis 2%. Por outro lado, dada sua fração significativa no consumo total, a parcela de consumo renovável foi composta por Biomassa de cana (18%), hidráulica (12,4%), lenha e carvão vegetal (8,7%) e outras renováveis (7%) (EPE, 2020).

a quantidade de energia necessária para atender às necessidades humanas ainda permanece sem resposta conclusiva e com diversas lacunas a serem preenchidas. Portanto, apesar do estágio atual favorável das políticas energética no Brasil, a necessidade de mitigação das mudanças climáticas vinculadas aos parâmetros ideais de consumo de energia ainda carece de uma resposta satisfatória, tendo em vista que os acordos climáticos existentes também manifestam pretensões de proteger os direitos básicos de desenvolvimento dos cidadãos e sociedade (AGREEMENT, 2015; UN GENERAL ASSEMBLY, 2015).

Krausmann *et al.*, (2009) apontam que, entre 1900 e 2005, ocorreu um aumento na extração global de recursos primários, incluindo combustíveis fósseis e minerais, em oito vezes. Nessa direção, as perspectivas de consumo energético mundial até 2050 indicam que, após um período de queda no consumo de carvão até 2030, o consumo dos principais combustíveis (carvão, gás natural e petróleo junto a demais combustíveis líquidos) tendem a crescer de 2030 a 2050 (IEO, 2021). Ademais, espera-se que o consumo de energias renováveis mais do que dobre entre 2020 e 2050, resultante, sobretudo, de mudanças de trajetória nas políticas governamentais e redução nos custos tecnológicos de produção.

Todavia, a alta dependência das economias por recursos fósseis, junto ao aumento da procura por energia, geram incertezas sobre suas implicações na economia atual e também no médio e longo prazo, bem como a capacidade das fontes renováveis apresentarem viabilidade financeira e, sobretudo, eficiência energética, se comparadas às fontes de energia fósseis. Nesse sentido, enfatiza-se que o setor de energia (incluindo extração, processamento e distribuição) requer insumos de energia para produzir energia, englobando uma quantidade significativa de energia ao final dessa cadeia produtiva (FENG *et al.*, 2018).

Não obstante, a produção de energia fornece indícios de que sua produção apresenta retornos decrescentes de escala (em termos de energia), pois os recursos fósseis são finitos, pelas alternativas energéticas mais lucrativas serem exploradas primeiro e também pelo fato de as tecnologias de extração e processamento de recursos não acompanharem o crescimento da demanda por energia (DALE, M.; KRUMDIECK; BODGER, 2012). Desse modo, nota-se a importância da inter-relação existente entre a energia utilizada como insumo na produção de energia e a energia resultante dessa produção, a fim de compreender os potenciais impactos sobre a economia.

1.2. O problema e sua importância

Além do setor de energia, as atividades de outros setores da economia dependem de energia para sua realização, a exemplo dos setores industrial e residencial, estabelecidos como

os maiores consumidores mundiais de energia (IEO, 2021). Dessa forma, conforme a elevação do grau de dificuldade requerido para extrair os recursos utilizados na produção de energia, é preciso cada vez mais energia para disponibilizar a mesma quantidade de energia para a sociedade (HEUN; DE WIT, 2012). Assim, a tendência é que haja um aumento no consumo de energia pelo setor de energia (BROCKWAY *et al.*, 2019). Além do mais, quando o setor de energia consome mais energia na produção de energia, resta menos energia para os outros setores. Sendo assim, a questão da pesquisa é: quanto teria que ser o crescimento da produção total para suprir a mesma demanda final da economia?

A importância de estudos voltados para a relação entre consumo de energia, crescimento econômico e bem estar se encontram em evidência, pois se pressupõe que os outros setores da economia, sobretudo os que demandam mais energia, pressionem o setor energético para atender a demanda crescente por energia. À vista disso, conforme as nações se enriquecem, para sustentar os níveis de atividade econômica, naturalmente há uma maior exigência por recursos e por energia.

À título de exemplo, impulsionada por seu crescimento econômico sustentado, a China se apresenta como a nação que mais consumiu energia no mundo desde 2009 (XU; WANG, 2020). O crescimento econômico estimado para o Brasil na última década foi um elemento importante no aumento da demanda por energia, o que levantou questões sobre a capacidade do país atender a nova demanda por energia em vigor. Além do mais, Montoya *et al.*, (2013) reforçam que era esperado um aumento do consumo de energia por parte das famílias, advindos do crescimento populacional e, principalmente, da renda. Por sua vez, Montoya *et al.*, (2019) destacam que o desenvolvimento acelerado das atividades produtivas da cadeia de soja no Brasil possui um papel relevante no aumento do consumo de energia, sobretudo petróleo e seus derivados.

Seguramente, para que a produção de energia não se torne o fator determinante da estagnação econômica dos países, é necessário empenho das nações para definir claramente as estratégias tanto de investimento quanto de produção de energia, bem como o papel exercido pelo setor energético no avanço econômico (MONTROYA *et al.*, 2013). Conforme ressaltam Hall *et al.*, (2009), qualquer sistema necessita de energia e, portanto, precisa ganhar significativamente mais energia do que se usa na obtenção de energia, simplesmente para que o sistema sobreviva e, conseqüentemente, cresça. Portanto, têm-se que as condições de produção de energia são fundamentais para garantir a prosperidade econômica (FAGNART; GERMAIN; PEETERS, 2020).

Sendo assim, avaliar o processo produtivo de energia se configura como primeira etapa da análise. Nessa perspectiva, uma maneira pertinente de avaliar o processo produtivo de energia se dá por meio do indicador “Energy Return on Investment” (EROI), abordado a princípio por Cleveland *et al.*, (1984) e amplamente debatido na literatura desde a última década⁴. O conceito de EROI se refere a razão entre a energia bruta extraída e a energia necessária direta e indiretamente para se obter essa energia bruta e fornecer à sociedade de forma útil (FENG *et al.*, 2018). Em outras palavras, mensura o retorno de energia sobre a energia investida. Por sua vez, Heun e De Wit (2012) descrevem o EROI como um indicador físico de escassez, atuando como uma *proxy* para o embate entre o esgotamento das fontes de energias de combustíveis fósseis e o avanço tecnológico voltado à extração mais eficiente de combustíveis fósseis.

A preocupação em torno do declínio do EROI de combustíveis fósseis é impulsionada à medida que as fontes de recursos primários passam a se esgotar mais rápido que o desenvolvimento de tecnologias para extração e processamento, levando a níveis mais baixos de EROI, como destacado por (DALE; KRUMDIECK; BODGER, 2011). Conforme Murphy *et al.*, (2011), ao avaliar a diminuição do EROI, percebe-se que, ou o investimento em energia usado na extração aumentou desproporcionalmente ao aumento na produção de energia, ou os ganhos decorrentes da extração diminuíram. Portanto, o EROI se mostra essencial em análises envolvendo a eficácia pela qual os recursos energéticos são explorados (HALL; LAMBERT; BALOGH, 2014).

Geralmente, os valores do EROI são expressos por uma razão. Hall, Balogh e Murphy (2009) denotam que essa razão é adimensional, uma vez que numerador e denominador são expressos nas mesmas unidades. Usualmente o resultado do EROI obtido é representado por meio de uma proporção, por exemplo, 20:1, que pode ser lido como “vinte para um”. Isso significa que um determinado processo de produção de energia rende 20 unidades de energia utilizando uma unidade de energia, ou seja, para cada unidade de energia consumida para produzir energia, 20 unidades de energia são produzidas. Do ponto de vista energético, valores de EROI mais altos são preferíveis, pois sugerem que menos recursos são necessários para produzir uma unidade de energia, portanto, são considerados eficientes. Por outro lado, quanto mais baixos os valores do EROI, menos eficientes eles serão, do ponto de vista energético, pois indicam que mais recursos são necessários para produzir uma unidade de energia.

⁴ Murphy e Hall (2010); Hall e Klitgaard (2018); Brand-Correa *et al.*, (2017); Feng *et al.*, 2018; Capellán-Pérez *et al.*, (2019); Rana *et al.*, 2020.

Hall *et al.*, (2009) consideram útil este indicador, pois permite verificar as vantagens e desvantagens de diferentes combustíveis, além de proporcionar um olhar cuidadoso ao futuro frente às questões energéticas. Estudos recentes, a exemplo de Capellán-Pérez *et al.*, (2019) e Jackson e Jackson (2021), sugerem que a redução do EROI é um indicativo de que mais energia é necessária no processo de produção energética para disponibilizar à sociedade a mesma quantidade de energia, portanto, menos energia sobra para as demais atividades econômicas. Além de que, quanto maior o EROI de uma sociedade, maiores são as contribuições possíveis para o bem-estar social, se associando a padrões de vida mais elevados (LAMBERT *et al.*, 2014).

Frequentemente, o conceito de energia líquida (energia fornecida menos o custo de energia para obter essa energia), é utilizado na literatura como uma denominação alternativa ao conceito de EROI (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009; HALL, 2017). Nessa ótica, Feng *et al.*, (2018) ressaltam que medir a energia líquida é a aplicação real do EROI. Isso significa que os insumos energéticos diretos e indiretos precisam ser contabilizados no processo de produção de energia, comumente denominados energia incorporada. Portanto, o EROI é uma medida útil para avaliar a eficiência energética de uma fonte de energia, entretanto, não é entendida como uma medida completa de sustentabilidade, mas sim como uma métrica quantitativa importante.

Por essa razão, utilizar uma matriz de insumo-produto é uma ferramenta adequada para calcular a energia incorporada pelas atividades econômicas setoriais, em termos monetários, pois essa análise se baseia nas interdependências entre os diferentes setores em uma economia, tema que foi inicialmente discutido em (LEONTIEF, 1936). Isso posto, o presente estudo propõe uma maneira alternativa de calcular o EROI diretamente da matriz insumo-produto, a fim de englobar os insumos diretos e indiretos demandados pelo setor energético durante o processo produtivo de energia.

A análise de matrizes insumo-produto fornece um retrato das relações econômicas de compra e venda entre produtores e consumidores dentro de uma economia em um ano (OECD, 2015). A partir do modelo básico de Leontief, tendo como premissa o aumento do consumo de energia pelo setor de energia, é possível mensurar o impacto (em US\$), por exemplo, sobre a produção total. De acordo com Miller e Blair (2009), as variações nos preços dos produtos primários levam a mudanças nos custos unitários setoriais e, portanto, nos preços dos produtos finais. Dessa forma, os aumentos nos custos são repassados inteiramente para os compradores, que por sua vez repassam esses aumentos aos consumidores, através do aumento dos preços de

produção. Portanto, o encarecimento energético apresenta implicações diretas sobre o bem-estar das famílias por meio dos preços.

É comum encontrar na literatura análises individuais do EROI de determinados tipos de energia, por exemplo, carvão, energia eólica, fotovoltaica, hidrelétricas, dentre outras. Nestes contextos, geralmente o cálculo do EROI considera uma base de dados que inclui os valores individuais de cada fonte de energia, o que viabiliza a realização desses cálculos. No entanto, Gupta e Hall (2011) ressaltam que há obstáculos que dificultam a análise individual do petróleo e gás natural. Por essa razão, tais fontes de energia são agregadas e analisadas conjuntamente, pois muitas vezes são extraídas dos mesmos poços e seus custos de capital e de operação são, conseqüentemente, combinados, o que dificulta a separação das entradas de energia de cada combustível (LAMBERT; HALL, BALOGH, 2013).

Por sua vez, as matrizes de insumo-produto nacionais da OCDE⁵, utilizadas neste estudo, não apresentam uma desagregação por tipo de energia, mas classificam os setores de energia em três categorias, o que inviabiliza a análise individual por tipo de energia. No entanto, ao somar as três subdivisões que são classificadas como energia, é possível trabalhar com apenas um setor de energia. Desse modo, a inclusão de três setores energéticos e a agregação posterior em um único setor de energia, progride em relação a alguns trabalhos, os quais, geralmente, se restringem a apenas um setor energético⁶. Outro ponto de avanço deste estudo se refere a ampliação do horizonte temporal de análise, se dispo de dados de 1995 a 2018, e também em número de países, precisamente 67 economias, as quais correspondem conjuntamente a 93% do PIB mundial, 92% das exportações e 90% das importações.

Ademais, ao incluir países que, quando somados seus respectivos indicadores de crescimento econômico, seus valores correspondem a uma fração significativa do produto da economia mundial, é possível calcular o EROI global, de tal maneira que, as estimativas obtidas sejam representativas a nível mundial. A estimação do EROI global busca complementar o número reduzidos de estudos que compreendem a economia em sua dimensão mundial, sobretudo no que se refere a utilização de matrizes insumo-produto para estimação do EROI. Portanto, a intenção de expandir a análise para mais países e anos, encontra respaldo no trabalho de Brand-Correa *et al.*, (2017), em que é sugerido ampliar a análise do EROI e seus efeitos na economia, à medida em que os resultados encontrados podem responder questões importantes em termos de políticas energéticas nacionais.

⁵ A qual utiliza a quarta revisão da ISIC para classificar os setores.

⁶ A exemplo de Feng *et al.*, 2018.

Além do mais, a análise de tendência do comportamento da série de tempo do EROI global permite uma descrição mais assertiva sobre o comportamento da série. Ao identificar a presença ou não de tendência na série, bem como o tipo de tendência, projetar o comportamento futuro da série permite verificar se há ou não tendência de declínio nos valores do EROI ao longo do tempo. A escolha de projetar valores para o futuro tem como base a perspectiva energética global, que considera meados deste século como um ponto de inflexão e tensão na transição energética (RAIMI *et al.*, 2022). Além disso, os relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) tratam dos futuros de Desenvolvimento e Clima de Longo Prazo, apresentando cenários projetados até o ano de 2100.

Por fim, se valendo dos resultados obtidos a partir da projeção do EROI, bem como a análise dos impactos decorrentes do aumento do consumo de energia pelo setor energético sobre a produção total, este estudo contribui para elaboração de instrumentos vinculados a políticas energéticas e socioeconômicas, como também introduz na literatura uma análise para os países, no tocante ao aumento do consumo de energia pelo próprio setor de energia e seus desdobramentos na economia global.

1.3. Hipótese

À medida que o setor de energia consome mais recursos, a redução do EROI global ao longo do tempo exigirá um aumento na produção total da economia para atender à mesma demanda final no futuro.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo Geral

Analisar os efeitos econômicos do aumento do consumo de energia pelo setor energético nos países selecionados e globalmente.

1.4.2. Objetivos específicos

- Calcular o EROI de todos os países selecionados e o EROI global de 1995 a 2018;
- Verificar se a tendência da série de tempo do EROI global foi crescente ou decrescente;
- Simular uma projeção de comportamento do EROI global para as próximas décadas;
- Analisar os impactos sobre o produto total da economia e sobre o setor de energia a partir das previsões obtidas do EROI global até meados do século.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Abordado inicialmente por Cleveland *et al.*, (1984), o retorno de energia sobre a energia investida é uma maneira de avaliar o processo produtivo de energia. Em síntese, a racionalidade por trás dessa literatura, leva a uma expectativa de que, um EROI em declínio, pode estar associado a custos de oportunidade de energia crescentes para garantir quantidades adicionais de energia, e que quantidades crescentes de energia já extraídas devem ser desviadas da produção de bens não energéticos e direcionadas para extrair uma quantidade adicional de energia (HALL; LAMBERT; BALOGH, 2014). Ademais, a queda do EROI também pode conduzir a um maior preço pelo qual a energia é comercializada (KING; HALL, 2011; HEUN; DE WIT, 2012), como também a um custo energético crescente (Brockway *et al.*, 2019).

Segundo Court e Fizaine (2017), as consequências associadas ao aumento do custo da energia líquida permanecem incertas, mas levantam algumas preocupações, uma vez que as sociedades foram estabelecidas utilizando recursos fósseis indiscriminadamente, mas que veem sua capacidade de desenvolvimento freada, sobretudo, pela alta dependência desses recursos. Grande parte das investigações da literatura sobre análise de energia líquida na última década caminharam no sentido de verificar se um determinado projeto, sobretudo produção de energia, possuía ou não superávit líquido, isto é, se houve ou não ganho de energia no processo produtivo. Nesse sentido, questões acerca da produção de energia e se a energia necessária para sua produção é maior do que a fornecida pelo processo produtivo se estabeleceram como questões importantes (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009).

Portanto, a partir do papel estratégico desempenhado pelo setor de energia, destaca-se que a energia líquida possui um papel relevante no estímulo ao crescimento econômico dos países (FENG *et al.*, 2018). Nesse sentido, a escassez de recursos fósseis e a adoção de alternativas energéticas mais sustentáveis permitiu que visse à tona o debate a respeito da eficiência energética das fontes de energia renováveis em comparação aos recursos fósseis, possibilitando, assim, quantificar e comparar a energia líquida de combustíveis fósseis e energias renováveis, ou seja, mensurar os retornos de energia sobre o investimento de combustíveis e fontes de energia distintas.

Conforme Hall, Lambert e Balogh (2014), além de ser considerado essencial em análises que envolvam a eficácia pela qual os recursos energéticos são explorados, o EROI dos combustíveis mais importantes (carvão, gás natural e petróleo) está diminuindo ao longo dos anos e a maioria das alternativas de energia renovável apresentam valores do EROI substancialmente inferiores se comparadas aos combustíveis fósseis convencionais. Nesse

sentido, entende-se que as tecnologias de produção de energia renovável não se encontram em um estágio suficientemente maduro para substituir os combustíveis fósseis em termos de ganho energético (RANA *et al.*, 2020). Ademais, Brandt (2017) ressalta que o desafio da produtividade dos recursos energéticos atual é um enquadramento moderno das preocupações já existentes há décadas, sobretudo as que surgiram partir da década de 1980⁷.

Na última década, houve uma ascensão de estudos sob a perspectiva do “Energy Payback Time”⁸ (BHANDARI *et al.*, 2015; GOOD, 2016; HALL, 2017). Estes estudos sugerem que, além do EROI dos principais combustíveis fósseis convencionais, que eram tradicionalmente altos, estarem em declínio, a maioria das energias renováveis alternativas e não convencionais apresentam, com frequência, valores do EROI consideravelmente mais baixos do que os combustíveis fósseis. Entretanto, é importante perceber que os valores do EROI variam dependendo da tecnologia de produção e da localização das estruturas de produção de cada tipo de energia, sobretudo para energia fotovoltaica e eólica (AL-WAELI *et al.*, 2017).

Em contraponto a este raciocínio, Murphy *et al.*, (2022) apresentam uma revisão de literatura e harmonização dos valores dos EROI’s para fornecer comparações precisas entre este indicador, afirmando que a não padronização metodológica levou a comparações indevidas entre estimativas de EROI. Por essa razão, os autores defendem a estimação do EROI pelo seu ponto de uso e não pelo seu ponto de extração, a partir da tese que a maioria dos combustíveis térmicos apresentam valores de EROI substancialmente reduzidos ao medir o EROI da extração ao ponto de uso. Sendo assim, ao contrário de alguns estudos, os valores estimados indicam que energia fotovoltaica, eólica e hidrelétrica apresentam EROI’s iguais ou superiores a 10, enquanto petróleo e gás apresentam valores abaixo de 10. Portanto, os autores afirmam que as estimativas do EROI no ponto de extração podem apresentar resultados bastante enganosos.

Raugei, Palmer e Fthenakis (2012) e Prieto, Hall e Melgar (2013), por exemplo, calculam o EROI para energia fotovoltaica e encontram resultados similares a resultados de combustíveis fósseis, apesar de diferirem nas métricas em seus respectivos estudos. Brockway *et al.*, (2019) apresentam uma análise alternativa, ao estimarem o EROI de recursos energéticos em sua fase primária, mas também na fase final em que a energia é inserida na economia, por exemplo energia elétrica e gasolina. Suas estimativas globais indicam que o EROI dos estágios

⁷ Hall e Cleveland (1981); Hall *et al.*, 2003; Hall, Balogh e Murphy (2009); Hall, Lambert e Balogh (2014).

⁸ O termo “Energy Payback Time”, traduzido como “tempo de retorno de energia”, é uma métrica que se refere ao período de tempo que um sistema energético deve operar antes de recuperar a energia investida ao longo de sua vida útil. É comumente utilizado, sobretudo, para representar o desempenho energético de diferentes tecnologias.

finais de energia é baixo e similar aos valores encontrados para energias renováveis. No entanto, os autores ressaltam que, em um futuro próximo, há possibilidade desses valores caírem consideravelmente.

Nos últimos anos, um dos pontos destacados na literatura, se refere, sobretudo, ao direcionamento do cálculo do EROI em cenários de transição para energia renovável, haja vista os resultados encontrados por estudos recentes com tendências promissoras no rendimento energético líquido de alguns tipos de energia renovável, principalmente fotovoltaica e eólica (DAY *et al.*, 2018; RANA *et al.*, 2020). Para o caso de sistemas de demanda e oferta de eletricidade em larga escala em regiões com alta disponibilidade de recursos solares e/ou eólicos, na ótica da transição energética completa, Diesendorf e Wiedmann (2020) apresentam resultados promissores, tendo em vista que os EROI's das tecnologias eólica e fotovoltaica calculados foram altos e com respectivas tendências crescentes.

Além de estudos comparativos de produtividade energética entre recursos, diversos estudos relacionados ao EROI focalizam a análise para apenas uma fonte de energia, um único local e para um determinado período de tempo. No entanto, a expansão desses estudos está gerando contribuições pertinentes para a literatura recente. Nesse sentido, visando ampliar a análise relacionada a energia líquida, os valores do EROI podem ser alternativamente calculados através da tabela de insumo-produto de cada país, possibilitando a construção das séries de tempo dos EROI's nacionais e também uma série de tempo representativa da economia mundial, denominada neste estudo como EROI global.

Hall *et al.*, (2014) apresentam uma análise empírica robusta, ao verificarem que o EROI de três combustíveis amplamente utilizados (carvão, gás natural e petróleo) está diminuindo, sugerindo que mais energia é necessária para a manutenção básica da atividade econômica. Por outro lado, um EROI mais alto possibilita que mais energia líquida esteja disponível para a economia, o que é oportuno, à medida que toda a atividade econômica depende de energia em alguma medida (BRAND-CORREA *et al.*, 2017).

Brandt (2011), em análise para a Califórnia, nos Estados Unidos, avalia o impacto do esgotamento do petróleo na eficiência energética da extração de refino de petróleo na Califórnia entre 1955 e 2005, utilizando as mudanças das taxas do EROI como critério de análise. Brandt (2017), denota que o esgotamento dos recursos energéticos e o declínio do retorno sobre o investimento em energia podem impactar negativamente os estilos de vida modernos e prósperos. Para responder tal questão, foi desenvolvido um modelo simplificado com apenas quatro setores baseado na modelagem dos fluxos intersetoriais de uma matriz de insumo-

produto. Os resultados encontrados apresentaram um EROI mínimo que impacta negativamente a prosperidade da sociedade.

Sob essa perspectiva, Brand-Correa *et al.*, (2017), em análise restrita ao Reino Unido, entre 1997 e 2012, desenvolveram um modelo multi-regional de insumo-produto para estimar o EROI em nível nacional, com o intuito de rastrear a energia incorporada (insumos de energia diretos e indiretos) em todo o processo produtivo de energia. A construção do modelo se valeu de dados da International Energy Agency (IEA)⁹ e Eora MRIO, que permitiu a análise agrupada dos países em 6 regiões e 106 setores. Os resultados encontrados evidenciaram a queda do EROI no período analisado, indicando que, em média, 9,8% da energia extraída do Reino Unido não foi diretamente para a atividade econômica para fins produtivos ou de bem-estar, mas sim reinvestida pelos setores de energia para produzir mais energia.

Por sua vez, Feng *et al.*, (2018) construíram um modelo para calcular o EROI da economia chinesa entre 1987 e 2012, utilizando dados sobre a energia incorporada pelos setores de produção de energia, obtidos também de uma matriz de insumo-produto. Posteriormente, através de uma função de produção acumulada, investigaram os efeitos das variações do EROI no crescimento econômico da China de 2016 a 2030. Os resultados encontrados indicaram uma tendência de queda do EROI para combustíveis fósseis da China, em consonância com a literatura (HALL; LAMBERT; BALOGH, 2014; POISSON; HALL, 2013; HALL; KLITGAARD, 2018).

Gagnon, Hall e Brinker (2009) argumentam que em economias bem sucedidas é fundamental ter altas taxas de retorno sobre o investimento. Desse modo, os autores estimam o EROI global para os dois combustíveis mais relevantes, petróleo e gás. O estudo abrangeu um período de 15 anos, especificamente de 1995 a 2006. Os autores estimaram o EROI global para o petróleo e gás em cada ano e construíram uma série de tempo do EROI global. Os resultados mostraram que o uso indireto de energia representou, em média, 11% do consumo de energia entre 1995 e 2006. Além disso, considerando que houve uma tendência de queda do EROI no período analisado e se uma extrapolação da tendência foi apropriada, os autores sugerem que o EROI tende a cair para 1:1 em três décadas.

Brockway *et al.*, (2019) estimam o EROI global dos combustíveis fósseis nos estágios inicial e final, utilizando o banco de dados EXIOBASE MRIO que disponibilizam matrizes globais de transações de entrada e saída, e também os balanços de energia estendidos da IEA. Por sua vez, Dupont, Germain e Jeanmart (2021) estimam o EROI global utilizando as matrizes

⁹ Em português: Agência Internacional de Energia.

de entrada e saída da OCDE e incorporam os três setores de atividades vinculadas a energia em apenas um indicador, assim como a agregação proposta neste estudo, o que reforça a aplicabilidade desta junção de setores de energia em apenas um setor representativo. Os autores estimam um modelo macroeconômico simplificado com dois setores, um setor agregado de energia e outro setor associado ao restante da economia.

Ecclesia *et al.*, (2022) propuseram uma nova medida de EROI que pudesse descrever a eficiência geral de uma sociedade na gestão de recursos energéticos ao longo do tempo. A análise foi realizada para Portugal com dados de 1960 a 2014. O valor do EROI encontrado foi consideravelmente mais baixo, em torno de 3, ao contrário dos valores atualmente disponíveis, que apresentam certa estabilidade. No entanto, as quatro inovações propostas para o novo cálculo mostraram que o valor do EROI encontrado se manteve em torno de um valor estável.

Por sua vez, Fabre (2019) denota que o EROI de um sistema é o inverso da quantidade de energia necessária para produzir uma unidade de energia, quando as séries de todos os insumos incorporados são levadas em consideração, que representa a razão entre a energia fornecida pelo sistema e a energia necessária para sua obtenção. O autor calcula a evolução do EROI de 2010 a 2050 considerando três cenários: o primeiro leva em conta o consumo energético atual, o segundo considera uma transição parcial, enquanto o terceiro considera um cenário com eletricidade 100% renovável. Todos os cenários apresentam uma queda no EROI até 2050, destacando-se que quanto mais renováveis são os cenários energéticos, mais acentuada é a redução do EROI.

A partir da interpretação do EROI mostrada acima, o presente estudo reforça que esse conceito permite incluir a matriz de insumo produto na análise, onde os insumos diretos e indiretos “*x*” necessários para atender uma demanda final “*y*” podem ser obtidos através da matriz inversa de Leontief. A proposta de calcular o EROI deste estudo se assemelha ao método enunciado por Fabre (2019), melhor detalhado na metodologia. No entanto, o autor inclui um coeficiente de intensidade energética, de modo que a análise seja feita em termos energéticos e não monetários.

Sendo assim, a proposta de calcular o EROI dos países diretamente de suas respectivas matrizes insumo-produto se apresenta como uma contribuição metodológica para a literatura, tendo em vista que estudos que se propuseram a calcular o EROI de modo alternativo, apresentaram resultados respaldados na literatura e comparáveis com outros resultados obtidos da maneira convencional de calcular o EROI. O cálculo proposto neste estudo utiliza valores monetários para obter o EROI, o que pode causar algumas distorções analíticas, segundo

(MURPHY *et al.*, 2011). No entanto, os resultados encontrados para o EROI dos países e também globalmente se mostram pertinentes em relação as conclusões de outros estudos. Embora os valores sejam menores, devido à utilização de valores monetários, a tendência de queda encontrada é semelhante à encontrada em outros estudos, o que fortalece a validade do cálculo do EROI e suas projeções.

O segundo ponto de contribuição, diz respeito a utilização dos dados obtidos com a projeção dos EROI's dos países. Como a ideia é isolar o efeito do setor de energia sobre os demais setores, ao utilizar os valores obtidos nas projeções do EROI para o ano de 2049 nas matrizes de insumo-produto referente ao último ano de dados disponíveis, no caso 2018, obtém-se os impactos sobre produto total da economia nos anos subsequentes, até o último ano da previsão, 2049. Em resumo, é realizado o processo reverso para aplicar o valor do EROI obtido com a projeção na matriz insumo-produto de 2018, melhor detalhado no tópico 3.5.

3. REFERENCIAL METODOLÓGICO

O primeiro tópico apresenta o referencial teórico básico da análise insumo-produto. Em seguida, este estudo segue uma sequência de quatro etapas metodológicas para alcançar os objetivos estabelecidos. A primeira etapa envolve a estruturação e o cálculo do EROI global e dos países, com base em uma matriz insumo-produto, para todos os anos. Na segunda etapa, é verificada a tendência da série temporal do EROI global. Na terceira etapa, é realizada a projeção do EROI global. Finalmente, na quarta etapa, é avaliado o impacto sobre a produção total, aplicando o valor estimado do EROI global na matriz de insumo-produto global correspondente a 2018.

3.1. Análise de Insumo-Produto

Os aspectos teóricos que fornecem suporte a este estudo se fundamentam na análise de insumo-produto. Leontief (1936) apresenta o quadro analítico básico do método, ao classificar o modelo insumo-produto como a base empírica do estudo da interdependência produtiva entre as diferentes partes da economia. Em sua forma mais básica, um modelo de insumo-produto corresponde a um sistema de equações lineares, em que cada uma das equações descreve a distribuição do produto de uma indústria no sistema econômico, com objetivo fundamental de analisar a interdependência produtiva entre os setores em uma economia (MILLER; BLAIR, 2009).

O modelo básico de insumo-produto de Leontief é construído a partir de dados econômicos observados em uma região geográfica específica, como município, estado ou país.

Guilhoto (2011) avalia que o modelo de Leontief permite a construção de uma fotografia econômica da economia, mostrando como os setores estão interrelacionados entre si. Em outras palavras, a ideia básica do modelo sugere que a indústria tanto produz bens (*outputs*) quanto consome bens (*inputs*) em seu próprio processo de produção.

Por essa razão, a análise da interdependência produtiva entre os setores da economia possibilita uma análise singular e compreensível de como a economia funciona. Nesse sentido, a fim de descrever e interpretar as relações estruturais básicas do modelo, supõe-se que a região de análise possua m firmas produzindo diversos bens e serviços, as empresas são atribuídas a n setores baseados em seu produto principal e os fluxos de oferta e demanda são equilibrados ao nível de cada setor. Esse sistema de interdependência é formalmente demonstrado pela tabela de insumo produto. Dessa maneira, a tabela 1 apresenta um exemplo de como uma tabela de insumo produto é organizada em uma economia com 2 setores:

Tabela 1 - Esquema de uma matriz insumo-produto para uma economia com 2 setores

		Setores (j)		Demanda Final (Y)				Produção Total (X)
		S_1	S_2	Consumo das famílias (C)	Governo (G)	Investimento (I)	Exportações (E)	
Setores (i)	S_1	z_{11}	z_{12}	c_1	g_1	i_1	e_1	X_1
	S_2	z_{21}	z_{22}	c_2	g_2	i_2	e_2	X_2
Importação		m_1	m_2	m_c	m_g	m_i	m_e	
Impostos		t_1	t_2	t_c	t_g	t_i	t_e	
Valor Adicionado		w_1	w_2					
Produto Total		X_1	X_2					

Fonte: Elaboração própria baseada em Miller e Blair (2009), Guilhoto (2011) e Porsse e Vale (2020).

Onde:

z_{ij} : transações monetárias intermediárias entre os setores i e j ;

c_i : consumo das famílias dos produtos do setor i ;

g_i : gastos do governo junto ao setor i ;

i_i : demanda por bens de investimento gerados no setor i ;

e_i : total exportado pelo setor i ;

X_i : total produzido pelo setor i ;

t_i : total pago por i de impostos indiretos líquidos;

m_i : importação total realizada pelo setor i ;

w_i : valor adicionado produzido pelo setor i .

A tabela 1 indica que todos os setores estão interligados, direta ou indiretamente. Conforme destaca Guilhoto (2011), os setores compram e vendem uns para os outros, interagindo diretamente com um número pequeno de setores, mas que dentro do processo produtivo, essa interação se expande de maneira indireta para os outros setores. Isso significa que, as vendas do setor i , por exemplo, pode ser consumida pelo setor j , bem como pode ser consumida pelos elementos que compõem a demanda final, como famílias e governo. Por sua vez, o processo produtivo necessita de insumos, ao passo que há impostos a serem pagos, insumos importados e insumos primários (terra, trabalho e capital), além da geração de valor adicionado.

Nessa perspectiva, as transações entre setores estão dispostas em uma matriz com n linhas e n colunas, em que essa parte da tabela de insumo produto é chamada de transações interindustriais ou consumo intermediário, a qual fornece uma imagem da economia focada nas relações intersetoriais, normalmente identifica como matriz “ z ”. Ademais, ressalta-se que as transações intersetoriais são mensuradas em um horizonte de tempo específico e os insumos são descritos em valores monetários, uma vez que é difícil combinar, por exemplo, toneladas de carvão, com megawatts de eletricidade.

Para fins deste estudo, a tabela de insumo-produto é utilizada para obter a energia incorporada pelos setores, representada nos elementos da matriz “ z ”, ou seja, a energia direta necessária para produzir um produto ou serviço, nesse caso, especificamente, uma unidade de energia. Por sua vez, as relações indiretas são fornecidas pela matriz de Leontief. O próximo tópico busca apresentar o cálculo do EROI baseado nas tabelas de entradas e saídas, bem como suas respectivas especificações.

3.2. Calculando o EROI

De acordo com Miller e Blair (2009), no modelo básico de insumo-produto se assume que a economia pode ser caracterizada em n setores, de tal modo que a equação abaixo represente a maneira como a produção total do setor i distribui seu produto através de vendas a outros setores e a demanda final:

$$x_i \equiv z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{ii} + \dots + z_{in} + y_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} + y_i \quad (1)$$

Em que x_i representa a produção total do setor i , y_i ¹⁰ indica a demanda final do produto do setor i e, por último, os termos z_{ij} ($\forall i, j = 1, 2, \dots, n$) representam as vendas intersetoriais pelo setor i para todos os setores j .

Assume-se também que os fluxos intermediários por unidade de produto final são fixos, e expressos pelo sistema aberto de Leontief. Segundo Guilhoto (2011), isso significa dizer que a economia é impulsionada por variações na demanda final (componente exógeno) dadas as relações intersetoriais (componente endógeno). Assim, o sistema é descrito como:

$$x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + y_i \quad (2)$$

Em que x_i expressa a produção total de uma economia, que é resultado da soma do consumo intermediário $a_{ij}x_j$ e do consumo final y_i ($\forall i, j = 1, 2, \dots, n$). Em termos matriciais¹¹, o sistema (2) pode ser representado por:

$$x = Ax + y \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2i} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ii} & \dots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{ni} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

em que x e y são vetores colunas de ordem $(n \times 1)$, A é obtida por meio da matriz z , a qual fornece os requerimentos diretos de insumo de ordem $(n \times n)$, enquanto o elemento a_{ij} da matriz A é denominado coeficiente técnico, o qual indica a quantidade de insumo i necessária para produzir uma unidade monetária de produto final do setor j , que pode ser obtido por meio da equação abaixo:

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j} \quad (4)$$

Desse modo, uma vez que se conhece os termos da equação descrita em (3), a qual revela a dependência dos fluxos intersetoriais dos produtos totais de cada setor, é possível

¹⁰ A demanda final y_i é composta pelo consumo das famílias dos produtos do setor i (c_i), gasto do governo junto ao setor i (g_i), demanda por bens de investimento produzidos no setor i (i_i) e pelo total exportado pelo setor i (e_i), ou seja, $y_i = c_i + g_i + i_i + e_i$.

¹¹ Para fins de notação, destaca-se que as letras minúsculas representam vetores (linhas e colunas), enquanto as letras maiúsculas representam matrizes.

realizar manipulações algébricas para obter a produção total que é necessária para atender a demanda final:

$$x = Ax + y \quad (5)$$

$$y = x - Ax \quad (6)$$

$$(I - A)x = y \quad (7)$$

$$x = (I - A)^{-1}y \rightarrow x = By \quad (8)$$

Em que $(I - A)^{-1} = B$ é a matriz inversa de Leontief ou matriz de requisitos totais (requisitos diretos e indiretos). Miller e Blair (2009) destacam que a matriz inversa de Leontief elucidada a dependência de cada uma das saídas brutas dos valores de cada uma das demandas finais. Portanto, a equação (8) se estabelece como a equação básica do modelo de insumo-produto. Em termos matriciais, a equação (8) pode ser representada por:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1i} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2i} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & b_{ii} & \dots & b_{in} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{ni} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

Em que x e y são vetores colunas de ordem $(n \times 1)$ e B é a matriz inversa de Leontief. Conforme Guilhoto (2011), cada elemento b_{ij} da matriz B é interpretado como a produção total do setor i que é necessária para produzir uma unidade de demanda final do setor j .

As matrizes de insumo-produto permitem que sejam realizadas inúmeras aplicações do modelo no mundo real, quando se deseja manter uma distinção razoável entre os setores, a fim de realizar uma análise mais detalhada de algum setor. Para isso, é necessário obter a matriz inversa de Leontief e compreender seu significado econômico. Uma forma de obter a inversa de Leontief diz respeito a um resultado útil de álgebra matricial, frequentemente aplicável a matrizes do tipo $(I - A)$, que torna possível uma aproximação de séries de potências para $(I - A)^{-1}$ e que não requer nenhuma inversa. Além de que, possui interpretação econômica útil.

Por definição, a matriz A é não negativa com $a_{ij} \geq 0 \quad \forall i \text{ e } j$ (esta característica é muitas vezes escrita como $A \geq 0$, onde se entende que nem todos $a_{ij} = 0$). Também se entende que

cada setor utiliza insumos do setor de pagamentos, por exemplo capital e trabalho, e que a soma dos elementos da matriz A em cada uma das colunas é menor que 1 ($\sum_{i=1}^n a_{ij} < 1 \forall j$)¹².

Portanto, matrizes de insumo-produto que apresentam as duas características descritas acima ($a_{ij} \geq 0 \forall i$ e j e $\sum_{i=1}^n a_{ij} < 1 \forall j$), é possível aproximar o vetor de produção total bruta (x), que se associa a um vetor de demanda final (y), sem a necessidade de encontrar a matriz inversa de Leontief $(I - A)^{-1}$. Desse modo, ao multiplicar a matriz $(I - A)$ por $(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n)$, chega-se a:

$$(I - A)(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n) = (I - A^{n+1}) \quad (9)$$

A operação mostrada acima resulta em $(I - A^{n+1})$, pois todos os outros termos são cancelados, tendo em vista que para cada " A " existe um " $-A$ ", para cada " A^2 " existe um " $-A^2$ " e assim por diante. Se isso é válido para n grande ($n \rightarrow \infty$), todos os elementos de A^{n+1} serão iguais a zero ou próximo de zero. Portanto, o lado direito da equação é igual a matriz identidade I :

$$(I - A)(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n) = I \quad (10)$$

Então, conclui-se que $(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n)$ passa a ser considerada a matriz inversa de $(I - A)$ quando n aumenta e assume valores altos. Reescrevendo a equação (10), tem-se que:

$$(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n) = (I - A)^{-1} \quad (11)$$

Para fins desse estudo e para compreender melhor o significado econômico da matriz inversa de Leontief, pode-se pensar na equação básica do modelo de insumo-produto como uma análise de impacto. Miller e Blair (2009) destacam que um dos principais usos da matriz de insumo-produto se refere a avaliação dos impactos na economia decorrentes de mudanças em elementos que são exógenos à economia. Um exemplo disso, é a mensuração dos efeitos diretos e indiretos ocasionados por uma mudança feita na demanda final. Assim, a forma geral do modelo pode ser representada por:

$$\Delta x = (I - A)^{-1} \Delta y \quad (12)$$

¹² Esta condição de soma de colunas não precisa necessariamente se aplicar a tabelas construídas em unidades físicas (como BTUs), não monetárias, de transações e saídas.

Em que Δy representa a variação na demanda final, $(I - A)^{-1}$ indica a inversa de Leontief e Δx indica o produto total. Nessa perspectiva, assume-se a premissa de que a economia é impulsionada por variações na demanda final (componente exógeno) dado as relações interindustriais (componente endógeno).

Assim, a partir das discussões realizadas nas seções anteriores a respeito do aumento da demanda por energia, assume-se que há uma tendência de aumento recorrente no consumo de energia pelo próprio setor de energia ao longo dos anos. Nesse sentido, tendo em vista os objetivos desta pesquisa, é possível avaliar o impacto do aumento do consumo de energia pelo próprio setor de energia pela ótica de uma análise de impacto, para, posteriormente, calcular o EROI.

O fundamento da medida do EROI proposto, é de contabilizar o conteúdo energético dos insumos e dos insumos dos insumos. Conforme Guilhoto (2011), tendo em vista o encadeamento produtivo existente entre os setores, é possível dizer que o impacto desse aumento pode ser dividido em algumas rodadas. O impacto inicial decorrente desse aumento da demanda por produtos do setor j ¹³, corresponderá exatamente ao aumento da produção deste setor j . Essa variação é refletida no primeiro termo I do somatório $(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n)$. No entanto, para aumentar a produção, o setor j demandará insumos dos demais setores, segundo a proporção estabelecida pela coluna j . Isso significa que, o aumento da demanda por energia pelo próprio setor de energia também demanda insumos de outros setores em uma cadeia infinita.

Em seguida, ao pré-multiplicar o vetor j da variação da demanda (Δy) pela matriz inversa de Leontief $(I - A)^{-1}$, obtém-se o seguinte resultado: o aumento da produção do setor j corresponde à variação da demanda somado ao valor necessário de insumo demandado pelo próprio setor em função do aumento na demanda final, também denominado aqui como consumo final do setor. Nesse sentido, cada acréscimo corresponde à variação da demanda multiplicada pelo coeficiente técnico a_{ij} . Assim, conforme Miller e Blair (2009), o termo “A” do somatório $(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n)$ equivale a necessidade de insumo do setor pioneiramente demandado e mensura os efeitos da primeira rodada, também chamado de efeitos diretos.

Ademais, todos os demais setores que fornecem insumos ao setor j terão suas respectivas produções modificadas, pois a produção desses insumos demandará outros insumos de outros

¹³ Como a análise diz respeito ao setor de energia, para fins didáticos de compreensão, setor j equivale ao setor de energia.

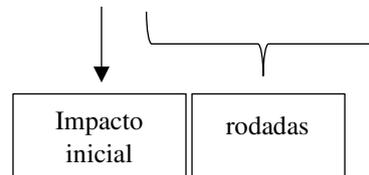
setores, em que o impacto desta demanda é representado pelo termo “ A^2 ” do somatório $(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n)$. Desse modo, para aumentar suas respectivas produções, esses setores demandarão insumos uns dos outros. Portanto, este encadeamento não tem fim, de modo que os efeitos indiretos são associados aos termos exponenciais do somatório $(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n)$, por exemplo, A^2 , A^3 , A^4 e assim por diante.

Para fins deste estudo, levando em consideração a cadeia completa de produção e os insumos necessários para produzir energia, a matriz inversa de Leontief pode ser representada por $(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n)$, pois nesse caso n é considerado alto. Nessa perspectiva, ao haver aumento do consumo de energia pelo setor de energia, o impacto inicial corresponderá exatamente ao aumento da produção desse setor, que é refletida pelo primeiro termo do somatório $(I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^n)$, I .

No entanto, para aumentar a produção, o setor de energia demanda insumos dos demais setores e todos os demais setores que fornecem insumos ao setor de energia também terão suas produções modificadas. Assim, o termo A do somatório contém os termos que mensuram a necessidade de insumos do setor de energia originalmente demandado e mede os efeitos da primeira rodada. Por sua vez, a produção desses insumos demandará outros insumos, nesse caso, mais energia direta e indireta, e o valor desta demanda será refletido pelo termo A^2 . Dessa maneira, esse encadeamento se estende na cadeia produtiva e cada rodada é contemplada por mais um termo no somatório.

Para fins ilustrativos e de notação, têm-se que um aumento na demanda final y requer a produção de y , o que demanda insumos para realizar a produção de y ($= Ay$). Em seguida, para produzir Ay ($= A^2y$), para produzir A^2y ($= A^3y$) e assim por diante. Logo, y requer a produção total equivalente a:

$$x = y + Ay + A^2y + A^3y + \dots = (I + A + A^2 + A^3 + \dots)y \quad (13)$$



Ou de outra maneira, como explicitado anteriormente:

$$\Delta x = (I + A + A^2 + A^3 + \dots)\Delta y \quad (14)$$

$$\Delta x = B\Delta y \quad (15)$$

Em seguida, a partir da matriz inversa de Leontief, compreende-se a maneira que o presente estudo abordará o cálculo do EROI. Como exemplo ilustrativo, a matriz inversa de Leontief descrita por Miller e Blair (2009)¹⁴ foi adaptada para fins didáticos e para a compreensão do cálculo proposto, em que:

Tabela 2 - Exemplo de Matriz inversa de Leontief

$(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$	S1	S2
S1	1,352	0,440
S2	0,267	1,137
Total	1,619	1,577

Fonte: adaptação de Miller e Blair (2009)

As entradas da tabela mostram os impactos diretos e indiretos em um setor quando há uma variação em \$1 (\$1 milhão ou \$100 milhões) na demanda final do setor no topo da coluna. Ressalta-se que os valores na diagonal principal apresentam valores sempre superiores a unidade (> 1). O valor 1.352 indicado para o Setor 1 (S1) representa o efeito total da expansão da demanda final neste setor. O valor 1 indica o efeito direto, enquanto 0.352 representa o efeito indireto. Portanto, se a demanda final do Setor 1 aumentar em \$1, haverá um impacto total de \$1.352 neste setor. Em outras palavras, é necessário gastar \$0.352 para produzir \$1 de energia. Com base nesse exemplo, é possível aplicar os conceitos estudados para calcular o EROI.

A definição de energia líquida descrita na seção 1.2 e sua verificação de adequação para o cálculo do EROI, justifica o uso da matriz de insumo-produto para determinar a quantidade total de energia incorporada no processo de produção de energia. Portanto, o EROI é calculado por meio da seguinte expressão:

$$EROI = \frac{1}{b_{ii} - 1} \quad (16)$$

Em que b_{ii} representa o efeito total de um aumento de uma unidade (em \$) na demanda final do setor i , ou seja, indica o efeito total do aumento do consumo de energia pelo próprio setor de energia. Já o denominador ($b_{ii} - 1$) indica o efeito indireto deste aumento, enquanto a

¹⁴ Dados adaptados de Miller e Blair (2009), especificamente por meio da tabela 2.3 de fluxos intersetoriais do tópico 2.3: “An Illustration of Input–Output Calculations”.

constante 1 no denominador representa o efeito direto. Em resumo, a razão descrita acima mede o retorno de energia em relação à energia investida.

3.3. Análise de Tendência

De acordo com Enders (2015), a tarefa do econometrista de séries temporais moderno é desenvolver modelos razoavelmente simples que sejam capazes de prever, interpretar e testar hipóteses sobre dados econômicos. Nesse sentido, ao longo das últimas décadas foram desenvolvidas metodologias que auxiliassem a análise de uma série de tempo. Dessa forma, surgiu a abordagem clássica ou tradicional, a qual decompõe uma série temporal em quatro componentes não observáveis: tendência, ciclo, sazonalidade e variações irregulares.

O componente de tendência de uma série é definido como o movimento sistemático de longo prazo no nível médio da série, de forma ascendente ou descendente. Dois objetivos estão atrelados à análise de tendência, o primeiro deles consiste na identificação da tendência e seu uso para previsão de valores futuros da série, enquanto o segundo objetivo se refere a remoção da tendência da série.

Além disso, há dois tipos de tendência que podem causar mudanças sistemáticas na série, as tendências determinística e estocástica. A tendência determinística de uma série temporal é representada por variações fixas em relação ao nível médio da série ao longo do tempo, ou seja, tem característica de previsibilidade. Por sua vez, a tendência estocástica é definida como uma tendência que muda de maneira aleatória e imprevisível ao longo do tempo. De um modo geral, se a série tiver tendência determinística, os parâmetros de tendência podem ser estimados através de uma regressão simples.

Como o objetivo nesta etapa é apenas verificar se a série apresenta comportamento crescente ou decrescente ao longo do período analisado, ajustar uma regressão linear simples se apresenta como um instrumento adequado para identificar a presença ou não de tendência determinística¹⁵. Desse modo, ao considerar que não há componentes sazonais e cíclicos na série, a série analisada pode ser representada por:

$$Y_t = T_t + \varepsilon_t \quad (17)$$

Em que Y_t indica a série de interesse, T_t indica o componente de tendência e ε_t é o ruído branco. Gujarati e Porter (2011) denotam que existem diferentes formas funcionais dos modelos de regressão, de modo que tais modelos podem ser não lineares nas variáveis, mas o são nos

¹⁵ Há algumas técnicas específicas para identificar a presença de tendência em uma série de tempo, como por exemplo o Teste de Wald e o Teste de Cox-Stuart.

parâmetros, ou que podem ser tornados lineares por meio de transformações das variáveis. Assim, como o objetivo é modelar a tendência pelo método de regressão, ajusta-se Y_t em função do tempo, de modo que:

$$Y_t = f(t) + \varepsilon_t \quad (18)$$

Em que $f(t)$ assume a forma do polinômio que melhor se ajusta a série. Dessa maneira, a função $f(t)$ pode assumir três formas:

(i) Tendência linear $\rightarrow Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t$

Nesse caso, a variável de tempo t é denominada variável de tendência, enquanto β_0 e β_1 são os parâmetros da regressão e representam o intercepto e o coeficiente angular, respectivamente. Se o coeficiente angular for positivo, Y terá uma tendência crescente. Por outro lado, se for negativo, a tendência será decrescente.

(ii) Tendência quadrática $\rightarrow Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \varepsilon_t$

Nesta situação, é adicionada uma variável de tempo ao quadrado, a qual sugere que os valores da série tendem a crescer ou decrescer a uma taxa que não é constante e que oscila mais ou menos ao longo da série.

(iii) Tendência exponencial $\rightarrow Y_t = A e^{\beta t} \varepsilon_t$

Em que A é o valor inicial, β a taxa de crescimento e t a variável de tempo. Nesse caso, é preciso fazer uma transformação logarítmica na série inicial antes de realizar o processo de modelar a tendência. No entanto, para ser estimado por Mínimos Quadrados Ordinários, o modelo precisa ser linearizado, de modo que:

$$\log Y_t = \log [A e^{\beta t} \varepsilon_t] \quad (19)$$

Pela propriedade logarítmica, é possível reescrever (19):

$$\log Y_t = \log(A) + \log(e^{\beta t}) + \log(\varepsilon_t) \quad (20)$$

Cancelando as operações inversas do “log” e do logaritmo natural “e”, têm-se:

$$\log Y_t = \log(A) + \beta t + \log(\varepsilon_t) \quad (21)$$

Dado que A , r e ε são constantes, é possível reescrever (21):

$$\log Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t \quad (22)$$

Em que o parâmetro β_0 representa o log do valor inicial, enquanto β_1 representa a taxa de crescimento instantânea da variável Y, ou seja, reflete a variação percentual média da variável Y ao longo do tempo.

Tratando-se de uma série de tempo univariada, a escolha da forma funcional específica é comparativamente mais fácil do que no caso de duas ou mais variáveis. Por essa razão, a análise gráfica preliminar da série pode sugerir a forma funcional mais adequada. No entanto, conforme descreve Gujarati e Porter (2011), a teoria subjacente pode sugerir uma forma funcional em particular, de modo que após a estimação do modelo, os coeficientes do modelo selecionado satisfaçam certas expectativas *a priori*.

3.4. Previsão

A previsão é um elemento importante da análise econométrica, considerado para muitos, o mais importante. Grande parte dos modelos de previsão¹⁶ se baseiam na ideia de que as observações passadas contêm as informações necessárias a respeito do padrão de comportamento da série. No entanto, a previsibilidade de uma série de tempo depende de diversos fatores, como conhecimento prévio dos mecanismos que afetam a série estudada e, em grande medida, dos dados disponíveis (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018).

Tendo que vista que uma série temporal pode ser decomposta em quatro componentes não observáveis, os métodos de previsão precisam levar em conta, caso a série apresente, cada um desses elementos. Nesse sentido, utilizar um método de suavização exponencial se apresenta como uma ferramenta adequada, haja vista a intuição do método, bem como sua aplicabilidade em diversas séries temporais e por ser computacionalmente eficiente.

Propostos inicialmente na década de 1950, voltados para a área dos negócios, os métodos de suavização exponencial¹⁷ são médias ponderadas das observações anteriores, que atribuem peso menor as observações mais antigas e peso maior às observações mais recentes. Ao utilizar tais métodos, a primeira etapa da seleção do modelo diz respeito a identificação dos componentes não observáveis (tendência e/ou sazonalidade).

A suavização exponencial simples (SES) é o mais simplório dos métodos de suavização, sendo utilizado em situações que se deseja prever observações que não possuam tendência ou sazonalidade. No entanto, o fundamento teórico do modelo SES permitiu que houvessem

¹⁶ Em linhas gerais, diversos métodos podem ser utilizados a fim de realizar previsões econômicas baseadas nos dados de séries de tempo, como: modelos de regressão uni-equacionais, modelos de regressão de equação simultânea, autorregressivo integrado de média móvel (ARIMA), modelos de vetores autorregressivos (VAR) e métodos de suavização exponencial.

¹⁷ Ver Holt (1957), Brown (1959) e Winters (1960).

avanços significativos na literatura referente a suavização exponencial. Por sua vez, o Método de Holt, que é uma extensão do modelo SES, permitiu a previsão dos dados considerando a existência de tendência na série, mas sem sazonalidade (HOLT, 1957). Este método foi desenvolvido a partir da percepção de que, ao aplicar o método de SES em uma série que possui tendência linear, as estimativas podem superestimar ou subestimar os valores reais da série.

Para realizar a suavização exponencial pelo Método de Holt, as observações são ponderadas através de dois parâmetros de suavização, comumente representados por α e β , que correspondem aos componentes de nível e de tendência, respectivamente. Para o Método de Holt, a previsão é indicada por uma reta que possui inclinação diferente de zero, que exibe uma tendência constante (aumentando ou diminuindo), que se estende do final das observações utilizadas até k passos a frente que se deseja obter a previsão.

Nesse sentido, a equação de previsão especificada pela metodologia de Holt pode ser representada por:

$$\hat{y}_{T+h} = L_t + kT_t \quad \forall k > 0 \quad (23)$$

Em que (\hat{y}_{T+h}) é a combinação da estimativa de nível da série no tempo t (L_t) e da estimativa do componente de tendência no tempo t (T_t). Desse modo, a função de previsão não é mais plana como no método SES, mas uma reta com tendência, de modo que a observação k passos à frente é igual ao último nível estimado (L_t) mais k vezes o último valor da tendência estimado (kT_t).

Conforme Boehmke (2018), a equação de nível abaixo indica que o nível no tempo t é uma média ponderada do valor real no tempo t e o nível no período anterior, ajustado pelo componente de tendência. Pode ser escrita como:

$$L_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (24)$$

Em que α é o parâmetro de suavização e está definido no intervalo de 0 a 1, ou seja, $0 < \alpha < 1$. Já a equação de tendência abaixo indica que a tendência no tempo t é uma média ponderada da tendência no período $t - 1$ e as informações mais recentes sobre a mudança no nível. Pode ser representada por:

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (25)$$

Em que β é o componente de tendência, definido também no intervalo entre 0 e 1, sendo esse termo a inovação do Método de Holt em comparação ao método SES.

Para realizar a previsão por suavização exponencial, os dados são divididos em dois conjuntos, de treinamento e de teste. O conjunto de treinamento é composto por dados contidos apenas dentro da amostra, enquanto o conjunto de teste contém dados de dentro e fora da amostra, mesmo que em proporções diferentes. Neste estudo, o conjunto de treinamento vai de 1995 a 2017, enquanto o conjunto de teste inclui apenas o ano de 2018, que está dentro da amostra, e se estende até 2049, que é o último ano k períodos a frente que se deseja obter estimativas.

Além disso, são considerados intervalos de confiança de 80% e 95%. Os limites de previsão inferior e superior constituem um intervalo de previsão para cada observação prevista. Isso significa que, por exemplo, com um intervalo de confiança de 95%, há 95% de confiança de que o intervalo de previsão contém a previsão do EROI global.

O valor dos parâmetros α e β podem ser definidos de maneira subjetiva, utilizando conhecimentos empíricos prévios, de modo a verificar o comportamento do modelo a partir de mudanças na constante. No entanto, o modo mais assertivo de escolher esses valores ocorre através de um algoritmo de otimização, que estima α e β utilizando as observações obtidas e identifica os parâmetros ideais. As constantes de suavização são encontradas selecionando os valores que minimizam os critérios de tamanho de erro, que incluem o Erro Quadrático Médio (EQM), o Erro Absoluto Médio (EAM) e o Erro Percentual Médio Absoluto (EPMA).

Ademais, duas colocações são válidas a respeito dos parâmetros de suavização. Em primeiro lugar, quanto mais próximo de 1 o valor de α , maior é o peso atribuído às observações mais recentes, o que é considerado aprendizado rápido. Portanto, alterações recentes nas observações terão maior impacto nos valores previstos. Por outro lado, a aprendizagem lenta é classificada quando o valor de α está mais próximo de 0, de modo que o algoritmo confere mais peso às observações mais antigas da série. Da mesma maneira, quanto mais próximo de 0 o valor do β , significa que a aprendizagem é lenta e que dificilmente a inclinação muda ao longo do tempo. Por sua vez, quanto mais alto o valor de β , significa que a inclinação da tendência é mais dependente das inclinações identificadas nas tendências recentes. O valor ótimo atribuído a β é obtido por meio da minimização de erros no conjunto de treinamento.

Portanto, a alta adesão dessa ferramenta no emprego em previsões se deve, principalmente, a sua simplicidade de formulação, por possuir ajustes razoavelmente simples, além de boa precisão nas previsões (GARDNER, 2006)¹⁸.

¹⁸ Para mais detalhes e comparação entre os modelos ver: Makridakis, Wheelwright e Hyndman (2008).

3.5. Impactos econômicos de mudanças no EROI

A partir dos dados obtidos das previsões do EROI global de 2018 a 2049, é possível calcular os potenciais impactos sobre o produto total da economia, decorrentes do aumento do consumo de energia pelo setor energético, em um cenário simulado utilizando o valor do EROI global estimado para o ano de 2049. Como o intuito é analisar as variações dos valores do setor energético, os demais setores terão seus valores fixados de acordo com o último ano disponível da base de dados, especificamente o ano de 2018.

Como a essência do EROI proposto neste estudo contabiliza o conteúdo energético, em valores monetários, dos insumos e dos insumos dos insumos, em uma cadeia infinita, é importante levar em conta toda essa cadeia no momento de mensurar os impactos sobre a economia após a previsão, para ser consistente. Nesse sentido, faz-se o seguinte questionamento, qual o aumento de produção necessária em cada setor para produzir mais uma unidade (em US\$) de energia? A matriz inversa de Leontief contém a resposta: para ver o aumento da produção total em cada setor devido a um aumento de uma unidade (em US\$) na demanda final de energia, basta ver a coluna da matriz B que corresponde ao setor de energia, a primeira coluna de B nos cálculos realizados.

Porém, para aumentar a produção total em cada setor, cada setor precisa de mais insumos. Assim, para calcular o aumento em insumos (em US\$) para cada setor, é necessário multiplicar a matriz inversa de Leontief (coluna na matriz B) pelo aumento de produção de cada setor. Ou seja, multiplicar cada coluna em B pelo aumento da produção setorial que vem da primeira coluna de B. Supondo que u é a coluna de B que corresponde ao setor energético, e $diag(u)$ é uma matriz com u no diagonal. Portanto, o aumento necessário de insumos em todos os setores para um aumento de uma unidade de energia (em US\$) na demanda final, pode ser calculado por:

$$\Delta z = B * diag(u) \quad (26)$$

Entretanto, o aumento de produção não é para atender um aumento na demanda final, mas uma maior demanda interna pelo setor energético. O problema é que isso muda a estrutura interna da produção. Por isso, é preciso fazer os aumentos em passos pequenos, verificando a cada passo qual o novo valor do EROI. Assim, são realizados sucessivos aumentos até o que o valor do EROI calculado a partir de 2018, chegue ao mesmo patamar do EROI global estimado para 2049. Para isso, cada etapa é estimada considerando aumentos sucessivos de US\$10 mil.

Após a alteração da estrutura produtiva interna do setor de energia, é possível obter os impactos sobre a economia de duas maneiras. A primeira delas se refere à razão entre o somatório da produção total prevista de 2018 a 2049 e a produção total em 2018, que fornece o percentual que o produto total precisa aumentar para atender a nova demanda interna do setor de energia. Por sua vez, a razão entre a produção do setor de energia em 2049 pela produção do mesmo setor em 2018 gera a estimativa de quanto o setor de energia precisa aumentar sua produção de energia.

3.6. Descrição e Fonte dos Dados

As tabelas de entradas e saídas utilizadas são provenientes do banco de dados da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Elas descrevem os fluxos de bens e serviços finais e intermediários através da abordagem indústria x indústria, a qual permite a integração com estatísticas compiladas de acordo com a atividade industrial, emprego, investimento estrangeiro direto e consumo de energia. São considerados 45 setores ou indústrias, abrangendo os anos de 1995 a 2018. Todos os setores que englobam a base de dados utilizada neste estudo podem ser conferidos no Apêndice A.

Nos dados coletados, as informações financeiras estão representadas em milhões de dólares correntes (US\$) para todos os países membros da OCDE e para outras economias não membros, incluindo todos os países do G20, o que totaliza 67 economias. A classificação dos setores energéticos segue a quarta revisão da International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC)¹⁹, considerando três setores de energia específicos: Mineração e pedreiras, produtos de produção de energia (D05T06), Coque e produtos petrolíferos refinados (D19), e Fornecimento de eletricidade, gás, vapor e ar condicionado (D35). Estes setores serão agregados em um índice único que representará a energia. É importante destacar que estes setores abrangem os principais recursos energéticos utilizados de alguma maneira como energia, especialmente os de origem fóssil, que são fundamentais para as matrizes energéticas de diversos países.

As categorias individuais da quarta divisão da ISIC são agregadas em 21 seções. A seção B – Mineração e Extração; inclui a extração de minerais que ocorrem naturalmente como sólidos (carvão e minérios), líquidos (petróleo) ou gases (gás natural). Os métodos de extração são diversos, como mineração subterrânea ou de superfície e mineração no fundo do mar. As atividades de mineração são classificadas em divisões, grupos e classes com base no principal

¹⁹ Em português: Classificação Industrial Padrão Internacional de Todas as Atividades Econômicas.

mineral produzido. As divisões 05 e 06, equivalente ao código de indústria D05T06 correspondem a mineração e extração de combustíveis fósseis (carvão, linhito, petróleo, gás).

Por sua vez, a seção C – Fabricação; engloba processos de transformação física ou química de materiais, substâncias ou componentes em novos produtos, a partir dos produtos brutos extraídos. A divisão 19, correspondente ao código de indústria D19 inclui a transformação de petróleo bruto e carvão em produtos utilizáveis. O refino de petróleo é o processo dominante, que envolve a separação do petróleo bruto em produtos componentes por meio de técnicas como craqueamento e destilação. Esta divisão também inclui a fabricação de produtos característicos (por exemplo, coque, gasolina, querosene, óleo combustível, etc.), bem como serviços de processamento (por exemplo, refinação personalizada) e a fabricação de gases como etano, propano e butano como produtos provenientes de refinarias de petróleo.

Em terceiro lugar, a divisão 35, equivalente ao código industrial D35, está contido na seção D, a qual representa o fornecimento de eletricidade, gás, vapor e ar condicionado, inclui atividades de fornecimento de energia elétrica, gás natural, vapor, água quente e similares por meio de uma infraestrutura permanente de linhas, redes e tubulações. O fornecimento abrange tanto parques industriais edifícios residenciais, quanto operações de concessionárias de eletricidade e gás. No entanto, exclui a operação de serviços públicos de água e esgoto e também o transporte (geralmente de longa distância) de gás através de gasodutos.

4. RESULTADOS

Para atender os objetivos propostos neste estudo, a descrição dos resultados foi dividida em quatro etapas, de modo que cada etapa compreenda um objetivo específico e, em conjunto, correspondam ao objetivo geral. A primeira etapa consiste no desenvolvimento do cálculo do EROI em cada ano para cada um dos países, e também o cálculo do EROI global. A segunda etapa mostra a verificação da tendência da série de tempo do EROI global. O terceiro passo corresponde a realização de projeções do EROI global até 2049. Por último, avaliou-se os impactos do EROI global estimado para 2049 sobre a produção total, levando em conta as observações disponíveis até 2018.

4.1. Estimando o EROI por país e EROI global

Aplicando os dados da matriz insumo-produto à equação (16), foi calculado o EROI dos países, suas estatísticas descritivas e também o EROI global para o período 1995-2018. Para verificar com mais detalhes os valores do EROI para cada país entre 1995 e 2018 e as estatísticas descritivas mensuradas, pode-se conferir os Apêndices B e C, respectivamente. Por sua vez, a

figura 3 apresenta as séries de tempo das estatísticas descritivas do EROI dos países de 1995 a 2018:

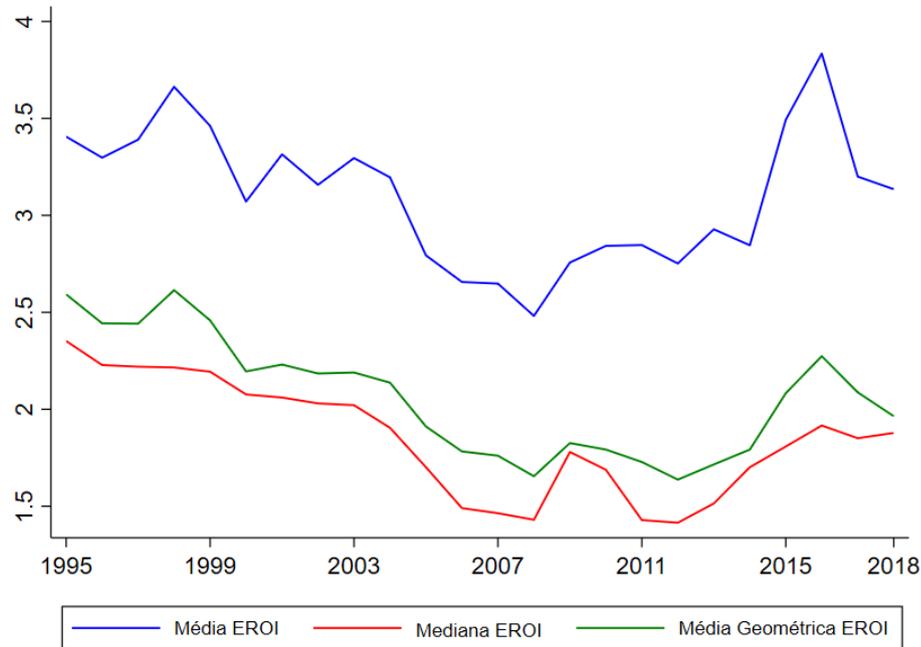


Figura 3 - Média aritmética, mediana e média geométrica do EROI dos países.
Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

Em primeiro lugar, em contraste com grande parte da literatura, o valor do EROI obtido para o período de 1995 a 2018 apresentou média igual a 3,10. Nesse caso, a média de cada ano foi obtida após encontrar o EROI para cada um dos países em cada ano para, posteriormente, calcular a média aritmética do conjunto de países em cada ano da série. Por outro lado, a média geométrica encontrada para os países foi inferior à média aritmética, sendo igual a 2,06. Portanto, é possível observar uma queda gradual na média aritmética do EROI dos países entre 1995 e 2018.

Em contrapartida, ao analisar os países individualmente, é possível observar que a maioria das economias apresentou valores de EROI baixos e com sucessivas quedas graduais ao longo dos anos. A figura 4 ilustra os valores do EROI para os respectivos países analisado para o ano de 2018:

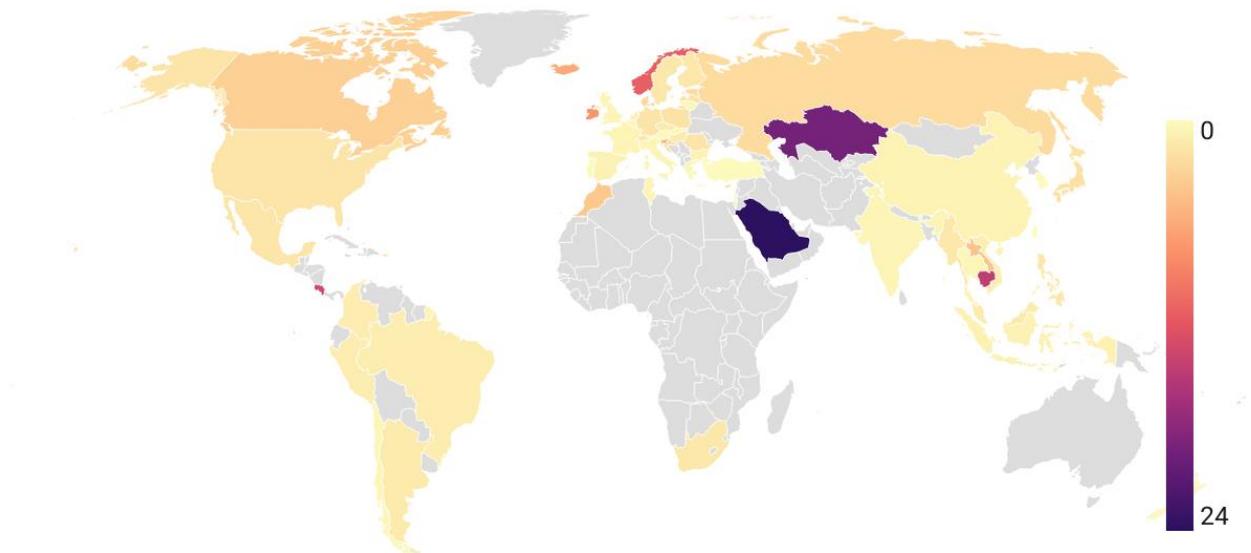


Figura 4 - Nível do EROI em 2018 das 67 economias avaliadas.
 Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

É possível notar na figura 4 que a maioria dos países apresentaram valores baixos de EROI. Para o ano de 2018, grande parte dos países apresentou EROI inferior a 5, como mostra a divisão de cores no mapa. Tomando como referência do valor 5, significa dizer que a razão foi de 5:1 ou cinco para um. Isso implica que um determinado processo de produção de energia rende 5 unidades de energia (em US\$) a partir de um investimento de 1 unidade de energia (em US\$).

Entre as economias analisadas, Taiwan, Singapura e Turquia apresentaram os menores EROI's no ano de 2018, iguais a 0,47; 0,53 e 0,57, respectivamente. Por outro lado, Arábia Saudita, Cazaquistão e Camboja apresentaram os três maiores valores de EROI para o ano de 2018, sendo iguais a 23,78; 19,32 e 14,67, respectivamente. Logo em seguida, a Costa Rica apresenta o quarto maior valor de EROI, igual a 13,48. Ademais, a figura 5 exibe a média calculada do EROI de cada país ao longo dos anos:

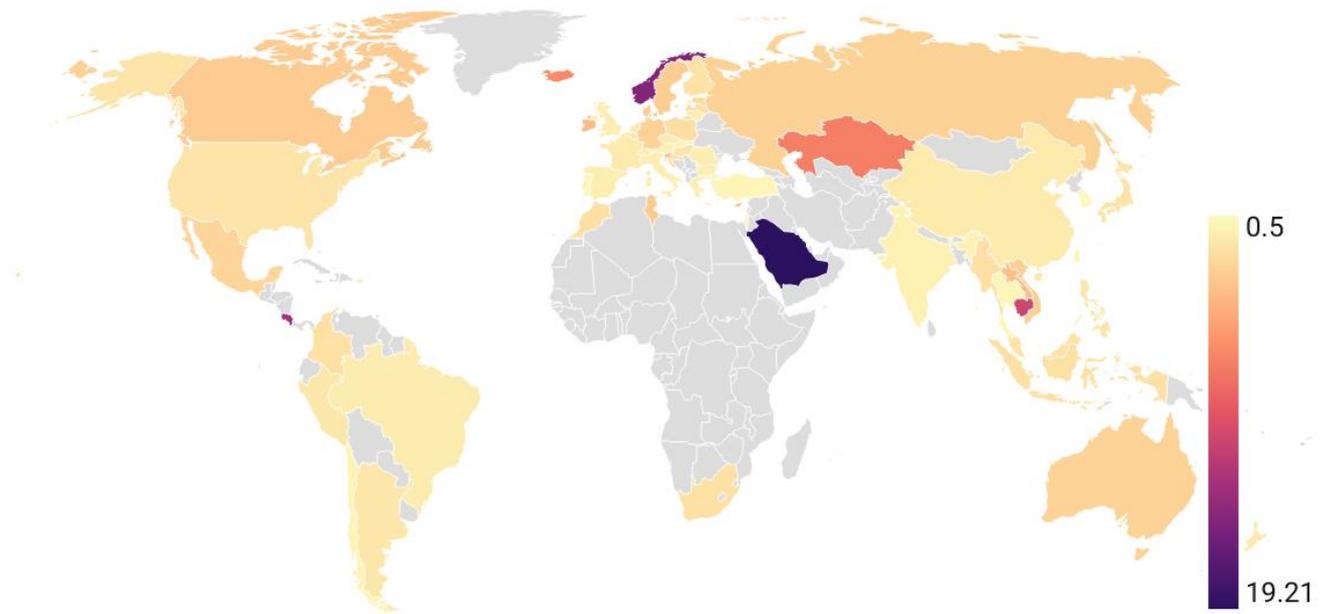


Figura 5 - Média do EROI dos países entre 1995 e 2018.
 Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

Observa-se que o comportamento da média do EROI entre 1995 e 2018 para os países analisados é similar ao comportamento dos valores obtidos para 2018. Enquanto a Arábia Saudita permaneceu no topo do ranking com o maior EROI, Hong Kong e Noruega ocupam a segunda e terceira posição, respectivamente. Enquanto a Costa Rica se manteve na quarta posição, Camboja caiu para a quinta posição. Por outro lado, as últimas colocações são ocupadas por Singapura, Coreia do Sul e Portugal.

De um modo geral, observa-se que a maioria dos valores estão em um patamar baixo e apresentam trajetória ao longo dos anos sem muitas oscilações. No entanto, os países que apresentaram EROI's maiores e ocupam as primeiras posições contém variações ao longo das séries que são capazes de refletir no comportamento da média geral. Por exemplo, o aumento gradual observado na média do EROI entre 2008 e 2009, é reflexo, principalmente, do pequeno aumento do EROI da Costa Rica, Noruega e, principalmente, Arábia Saudita. Já o aumento substancial observado em 2015 e 2016, foi puxado, principalmente, pelo crescimento do EROI da Arábia Saudita e Costa Rica²⁰.

Há na literatura uma discussão de Hall, Balogh e Murphy (2009) sobre o EROI mínimo que uma sociedade sustentável do ponto de vista energético precisa atingir, de modo que a exploração energética exercida consiga suprir a atividade econômica contínua. Os autores utilizam o conceito de EROI estendido, que significa mensurar o EROI desde a boca do poço

²⁰ Apêndice B contém as estimativas do EROI de 1995 a 2018 para todos os países.

de petróleo até o ponto de uso na demanda final, ou seja, adicionam os custos de energia para levar o petróleo do subsolo até o consumidor de modo utilizável, além do custo proporcional de energia da infraestrutura necessária para utilizar a energia, o que resulta em uma proporção de 3:1. Isso significa que é preciso alcançar um EROI mínimo de 3:1 na boca do poço para fornecer uma unidade desse óleo à sociedade de maneira útil. Ademais, o valor de 5:1 seria necessário para sustentar as atividades atuais da sociedade.

Por sua vez, Fizaine e Court (2016) utilizam duas variáveis para calcular o EROI mínimo necessário para ter um crescimento econômico positivo: o retorno médio monetário sobre o investimento do setor de energia e o nível máximo tolerável de gasto de energia. Os valores são baseados em dados dos Estados Unidos e indicam uma proporção igual a 11:1, para a economia desfrutar de um crescimento positivo. Por essa razão, é difícil fazer uma comparação com o mundo todo em termos de energia e intensidade energética, pois é possível que as comparações sejam indevidas e não reflitam a situação dos países.

Em concordância com o resultado pelas figuras, há na literatura alguns resultados que reforçam os achados do presente estudo, mesmo que em proporções mais elevadas. Stead (2021), por exemplo, estima um EROI para a Arábia Saudita igual a 40, argumentando que o petróleo saudita é de fácil extração, de modo que não é necessário fornecer muita energia no processo de extração, o que explica o EROI do petróleo saudita apresentar um valor consideravelmente alto. No entanto, Ahmed (2017) avalia com pessimismo as próximas décadas em termos de sustentabilidade energética. O autor ressalta que a questão chave não é apenas a produção de petróleo, mas a capacidade de traduzir a produção em exportações contra taxas crescentes de consumo interno.

Ebrahimi e Ghasabani (2015) estimaram um pico da produção de petróleo bruto da OPEP em 2028, de modo que alguns países membros, a exemplo da Arábia Saudita, podem passar por problemas de extração de petróleo nas próximas décadas. Isso significa que o principal ponto de inflexão pode estar eminente, que diz respeito ao impedimento do produtor de petróleo não poder aumentar a quantidade de exportações, devido à necessidade de atender a demanda interna crescente de energia no país.

Como os resultados deste trabalho consideram a energia agregada de cada país, é difícil comparar diretamente todos os resultados obtidos com a vasta literatura sobre o tema, no entanto, é possível construir relações para fins comparativos com alguns estudos. No caso da China, por exemplo, os valores encontrados neste estudo de 1995 a 2018 foram inferiores a

razão 3:1, ao contrário de estudos a respeito dos níveis de EROI calculados para a China²¹. Por exemplo, Hu *et al.*, (2011) calcularam o EROI do maior campo petrolífero da China e estimaram o EROI de 2001 igual a 10:1, em 2009 igual a 6,5:1 e em torno de 4,7:1 em 2015, ressaltando que dadas algumas imprecisões nos dados coletados e algumas externalidades, a estimativa do EROI seria ainda menor.

Nota-se que o EROI dos combustíveis fósseis convencionais da China apresenta tendências históricas decrescentes e as tendências futuras seguem a mesma direção, com destaque para o petróleo e gás natural que apresentam razão inferior a 9:1 nas estimativas (FENG; FENG; WANG, 2018; HU *et al.*, 2013). Entretanto, um resultado específico chama atenção, de que os valores estimados para Hong Kong nesta pesquisa se assemelham consideravelmente dos valores encontrados para a China na literatura. Para os Estados Unidos, outra importante economia mundial, o presente estudo encontrou um EROI com razão em torno de 2:1 entre 1995 e 2018. Em avaliação para a Califórnia, Brandt (2011) afirma que a intensidade energética na extração de petróleo aumentou consideravelmente entre 1995 e 2005, o que resultou em um declínio do EROI de 6,5:1 para 3,5:1.

Outro resultado que chama a atenção é o EROI estimado para a Noruega ao longo dos anos. Em 2018, o valor estimado correspondeu a razão 11,45:1. Em concordância com a literatura, era esperado que o país apresentasse valores do EROI substancialmente altos. Grandell, Hall e Hook (2011), ao estimar o EROI do petróleo e gás norueguês entre 1991 e 2008 encontraram uma razão igual a 40:1 para os últimos anos da base de dados utilizada. Os altos valores encontrados refletem a elevada qualidade dos campos de petróleo do Mar do Norte, sua alta lucratividade e por ser considerados relativamente novos à época. No entanto, mesmo que o EROI do setor petrolífero norueguês se configure como um dos mais favoráveis do mundo, a tendência de queda identificada ao longo do tempo sinaliza uma preocupação em termos energéticos para o país.

Para o Reino Unido, a evolução dos valores apresentou comportamento similar aos resultados encontrados por Brand-Correa *et al.*, (2017). A estimação dos autores entre 1997 e 2012 mostra uma queda gradual sem muitas variações ao longo dos anos, parecida com as estimativas obtidas neste estudo, apesar de estarem em níveis de valores mais elevados.

O fato de a metodologia utilizada considerar os valores das entradas e saídas da matriz insumo-produto em US\$, é uma motivação para que o ranking dos países contenha economias bastante distintas em termos energéticos e também de potencial econômico. Taiwan, Singapura

²¹ Valores calculados podem ser verificados no Apêndice B.

e Turquia apresentam energia provenientes de combustíveis fósseis quase em sua totalidade. Singapura, por exemplo, apresentou em 2018 uma participação da energia primária de combustíveis fósseis em cerca de 99,71%²². No entanto, a alta dependência desses recursos não são satisfeitas internamente, então, os países precisam recorrer ao mercado externo para atender a alta demanda energética por recursos fósseis. Taiwan, por sua vez, importa cerca de 98% dos combustíveis fósseis necessários para atender o suprimento total de energia do país. Isso implica que exista uma contrapartida de produção excedente de algum produto de Taiwan, que também exige energia no processo produtivo, de modo que a necessidade de importação desses combustíveis fósseis seja suprida como forma de pagamento.

Do mesmo modo, Cazaquistão também possui participação da energia primária de combustíveis fósseis quase totalmente, enquanto toda a energia da Arábia Saudita advém dos combustíveis fósseis. Por sua vez, mesmo com a escassez de dados do Camboja, têm-se que a participação de combustíveis renováveis na matriz energética do país é superior aos demais, no entanto, sua proporção é inferior em relação a esses países ao fazer essa comparação. Nessa perspectiva, os resultados descritos acima apontam que tanto os países com menor EROI quanto os países com níveis maiores de EROI apresentam combustíveis fósseis predominantemente em suas respectivas matrizes energéticas.

Para o caso brasileiro, a figura 6 destaca a evolução do EROI entre 1995 e 2018:

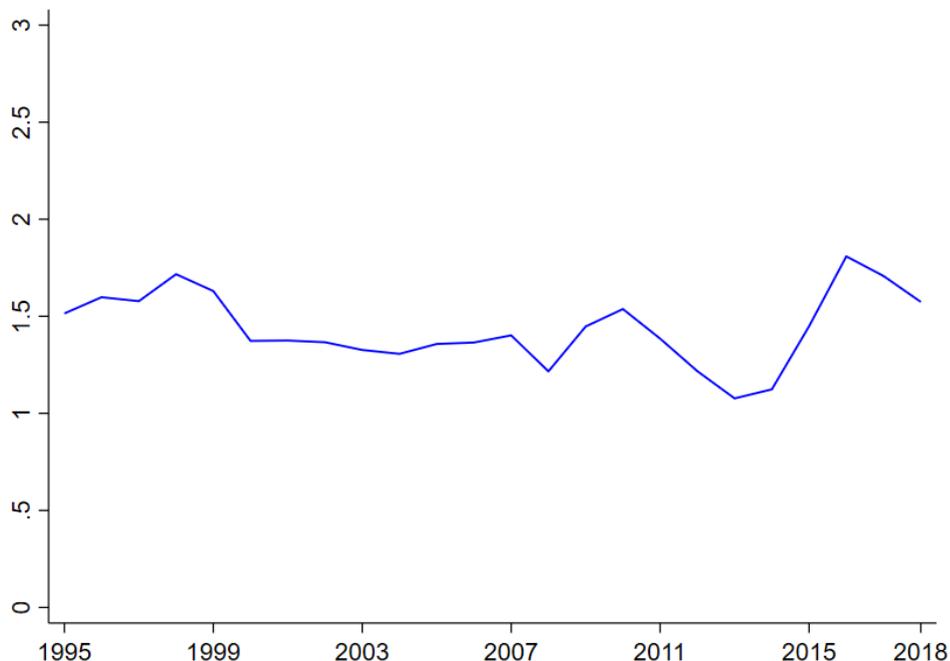


Figura 6 - EROI do Brasil entre 1995 e 2018.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

²² Para mais detalhes ver: <https://ourworldindata.org/energy/country/taiwan?country=TWN~TUR~SGP#how-much-of-the-country-s-energy-comes-from-fossil-fuels>.

Ao observar a trajetória do EROI estimado para o Brasil ao longo dos anos, o comportamento identificado se assemelha aos gráficos das médias mostradas na figura 3. A média observada para o Brasil entre 1995 e 2018 foi igual a 1,43, similar aos valores obtidos para grande parte dos países analisados. Ao considerar a existência de um EROI mínimo da sociedade a partir da discussão existente na literatura²³, os valores encontrados estão abaixo do mínimo necessário para que a economia se estabeleça como energeticamente sustentável, evidenciando que não há energia excedente no processo produtivo de energia que garanta a sustentabilidade básica do sistema. Ao contrário dos outros países mencionados acima, cerca de 47% da energia brasileira é proveniente de fontes renováveis, o que coloca o Brasil em posição de destaque no que tange o objetivo de atingir níveis satisfatórios de energia renováveis.

Entretanto, a alta composição da matriz energética de fontes de energia renováveis, em termos de EROI, pode representar um declínio da razão do retorno de energia sobre o investimento. Por sua vez, como o EROI calculado neste estudo propõe incluir os setores de energia em apenas um, não é possível determinar com clareza que o valor encontrado para o Brasil, inferior a 3, foi impulsionado pela alta composição renovável observada na matriz energética. Contudo, é um resultado preocupante, haja vista que o EROI de outros países que possuem reservas satisfatórias de petróleo foram superiores a 3, ao contrário do Brasil.

No entanto, as economias com EROI inferiores não possuem reservas de recursos fósseis ou apresentam valores bastante reduzidos, enquanto as economias com EROI's maiores, exceto Camboja, possuem reservas significativas de combustíveis fósseis, sobretudo petróleo. Portanto, apesar da tendência de declínio do EROI dos países ao longo do tempo, ainda assim países que possuem grandes reservas de recursos fósseis apresentam um EROI mais elevado que as economias não contempladas por tais recursos, o que era esperado.

Evidentemente, há um contraste entre os níveis de EROI das economias ao analisar as estimativas nacionais individualmente. Por sua vez, o EROI global apresenta comportamento similar a média geométrica dos países, no entanto, os cálculos são distintos. Para calcular o EROI global, por se tratar de matrizes, todas as entradas das matrizes dos países foram somadas, de modo que ao final do somatório fosse possível obter o cálculo do EROI representativo para a economia mundial. A figura 7 apresenta o comportamento do EROI global ao longo do tempo:

²³ Hall, Balogh e Murphy (2009), Weissbach *et. al.*, (2013), Fizaine e Court (2016).

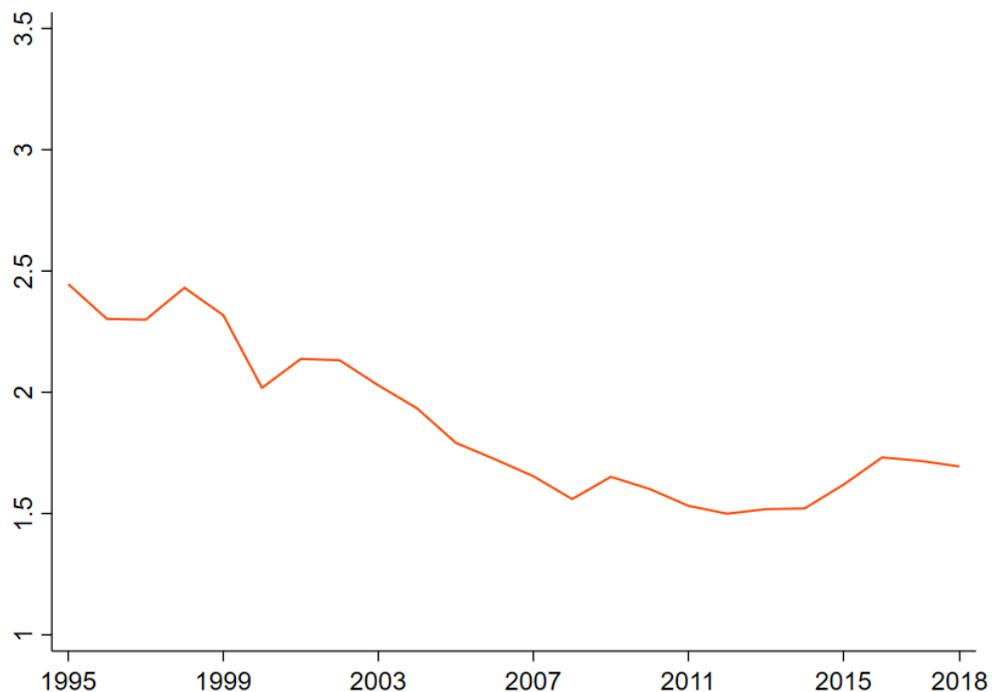


Figura 7 - EROI global entre 1980 e 2018.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

De acordo com a figura 7, é possível notar a queda gradual do EROI global ao longo do tempo, similar ao comportamento da média geométrica dos países. Nessa perspectiva, os resultados obtidos são preocupantes, pois mostram que ao longo dos anos o EROI está sempre abaixo de 3, o que sugere que globalmente a produção de energia atual não é sustentável e não há excedente energético. Sendo assim, o objetivo de calcular o EROI de todos os países selecionados e o EROI global de 1995 a 2018 foi alcançado.

Entretanto, é possível que o motivo pelo qual o EROI global calculado neste estudo seja menor em comparação com outras estimativas esteja relacionado à abrangência da medida, que considera o conteúdo energético de uma cadeia infinita de insumos, tornando-a mais completa e detalhada. Conforme Ecclesia (2022), a constatação de valores muito baixos de EROI em comparação com a maioria da literatura, pode ser explicada pela ampliação dos limites do conceito de setor energético. Nesse sentido, a combinação de diferentes setores de energia na avaliação de entradas e saídas, incluindo etapas energéticas distintas (como petróleo bruto e gasolina) em um único indicador, pode resultar em baixos níveis de EROI, pois a inclusão de insumos diretos e indiretos na conversão de energia inclui também todo o tipo de capital envolvido, mas os custos discricionários de uma produção específica de energia não são isolados.

Desse modo, os insumos de produção, como capital, trabalho e, principalmente, energia, precisam ser alocados no setor de energia para fornecer a sociedade a quantidade mínima de energia, para que o sistema econômico exerça função social, isto é, que a atividade econômica continue operando. Isso implica que, pelo fato de haver relações intersetoriais, esses insumos são deslocados de sistemas produtivos adicionais que podem elevar o bem estar, em detrimento do atendimento à demanda de energia.

Associando a literatura do EROI aos resultados encontrados neste estudo, têm-se que os níveis de EROI mais baixos indicam níveis de produtividade de energia reduzidos, o que torna a energia mais dispendiosa, ou seja, torna-se mais caro manter os mesmos padrões anteriormente estabelecidos. Além de que, atividades não essenciais que demandam muita energia, tendem a se tornarem insustentáveis ao longo do tempo. Por essa razão, espera-se que Taiwan, Singapura e Turquia apresentem maiores dificuldades ao longo do tempo em arcar com a demanda energética dos setores produtivos do país, do que Arábia Saudita, Cazaquistão e Camboja, que apresentam níveis mais elevados de EROI e, portanto, níveis de produtividade energética elevados.

Observa-se na literatura, que o cálculo do EROI global, de um modo geral, leva em conta cada tipo de energia individualmente e não de modo agregado, o que impede que sejam feitas comparações diretas com tais estudos. Capellán-Pérez *et al.*, (2019), por exemplo, estimam o EROI global em três cenários para transição completa para energias renováveis até 2060. Os autores ressaltam que é importante entender as consequências socioeconômicas e técnicas de se realizar a substituição em larga escala os combustíveis fósseis pelos renováveis. Os resultados mostram que a narrativa de crescimento econômico verde pode diminuir o EROI de 12:1 para 3:1 em meados do século, mas que se estabilizaria em 5:1 posteriormente.

Por sua vez, Brockway *et al.*, (2019) calculam o EROI global de combustíveis fósseis utilizando uma matriz insumo-produto multirregional entre 1995 e 2011. As estimações consideram os estágios inicial e final de energia. O EROI global no estágio inicial foi acima de 30:1 com tendência decrescente para os combustíveis fósseis analisados, enquanto o estágio final apresentou trajetória levemente decrescente em torno de 6,5:1, que engloba o espectro mais completo do uso de energia direta e indireta e, por essa razão, apresenta valores bastante inferiores aos estágios iniciais de energia.

Além disso, os autores afirmam que a estimacão do EROI global do estágio final dos combustíveis fósseis evidencia que a sociedade pode estar negligenciando as potenciais restrições energéticas, sobretudo de origem fóssil, mesmo que o foco atual seja a transição

energética, além de que, o EROI baseado em energias renováveis pode ser maior que o EROI de combustíveis fósseis, quando medido em seu estágio final, contrariando diversos resultados encontrados na literatura.

4.2. Tendência do EROI global

A fim de atender aos objetivos do presente estudo, a análise de tendência e as etapas posteriores contemplaram apenas a série do EROI global. Em primeiro lugar, a escolha da forma funcional da série passa por uma avaliação do comportamento da série ao longo do tempo. Sendo assim, ao trabalhar com a série sem transformação, a análise da previsão realizada posteriormente, leva a valores negativos nas estimativas, impedindo que sejam feitas considerações plausíveis sobre os resultados da previsão. Assim, ao analisar o comportamento do EROI estimado, bem como o que a literatura descreve a respeito da trajetória do EROI ao longo do tempo, entende-se que tal variável não apresenta curso linear no decorrer do tempo.

Por essa razão, é adotada a forma funcional exponencial, a qual requer a transformação logarítmica nos dados, considerando a trajetória não linear do EROI global entre 1995 e 2018. No entanto, ao modelar a tendência determinística utilizando um polinômio exponencial, é necessário linearizar os parâmetros, de forma que seja possível estimar por Mínimos Quadrados Ordinários. Portanto, a figura 8 mostra a série de tempo do EROI global com a transformação logarítmica e a linha de tendência linear:

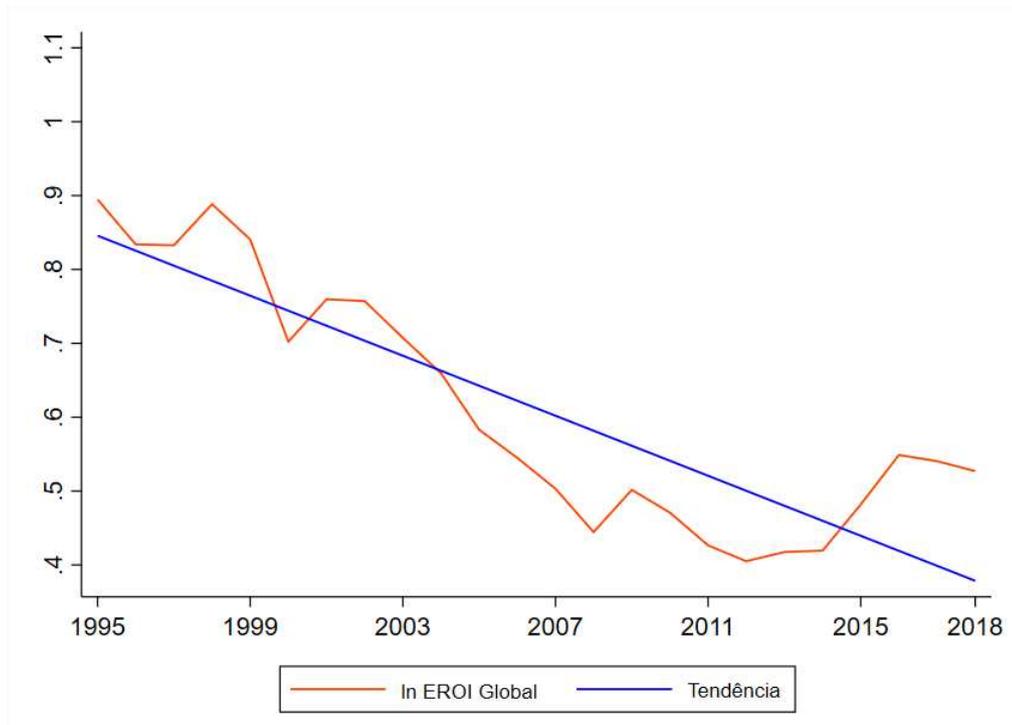


Figura 8 - Logaritmo natural do EROI global entre 1995 e 2018.
Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

Ao observar a figura 8, é possível perceber o comportamento decrescente do EROI global logaritimizado ao longo do tempo. No entanto, nota-se que entre 2015 e 2017 há uma reversão nos valores observados, com uma ascensão gradual nesses anos, mas que logo em seguida a tendência decrescente foi retomada. Em seguida, estima-se a seguinte regressão por MQO:

$$\log EROI_{Global_t} = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t \quad (27)$$

Ao estimar a regressão acima, encontra-se a seguinte expressão:

$$\log \widehat{EROI}_{Global_t} = 0,8660 - 0,02031t \quad (28)$$

A partir das estimativas mostradas na expressão (24), é possível afirmar que a série de tempo do EROI global possui uma tendência de queda, pois a inclinação da variável temporal “ t ” foi negativa, em que $\beta_1 = -0,02031$. Isso significa que, a cada ano, o EROI global reduz, em média, 2,03%.

4.3. Previsão do EROI global

Após identificar o componente de tendência da série, o passo seguinte consiste na previsão dos valores do EROI global para as próximas décadas. A previsão foi realizada 32 passos à frente, ou seja, de 2018 até o ano de 2049 e os dados utilizados na estimação também foram logaritimizados. Entretanto, como a inversa da função logaritmica é a função exponencial, após os cálculos da previsão do EROI global, foi aplicada a função exponencial nas estimativas, de modo a obter os dados do EROI estimados sem transformação logaritmica. Isso porque, para calcular os impactos do EROI global na matriz insumo produto, é preciso que a transformação nos dados seja invertida.

A suavização exponencial pelo Método de Holt exige que a equação (23) seja estimada para encontrar os dois parâmetros de suavização, especificamente α e β . Conforme descrito na seção 3.4, tanto α quanto β estão definidos no intervalo entre 0 e 1. O valor estimado pelo algoritmo de otimização para o parâmetro de suavização de nível α foi igual a 0,9986, indicando que mais peso é atribuído às observações recentes e menor peso às observações mais antigas. Dessa maneira, variações nas observações mais recentes terão maior impacto nos dados previstos.

Por sua vez, o valor estimado do componente de suavização de tendência foi igual a 0,0001, sugerindo um aprendizado lento para a tendência. Isso significa que, dificilmente haverá mudanças na inclinação da série ao longo do tempo e que a inclinação da tendência é

menos dependente das inclinações recentes da tendência. Dessa maneira, a figura 9 apresenta graficamente os resultados da previsão em uma reta de tendência decrescente, de 2018 até 2049.

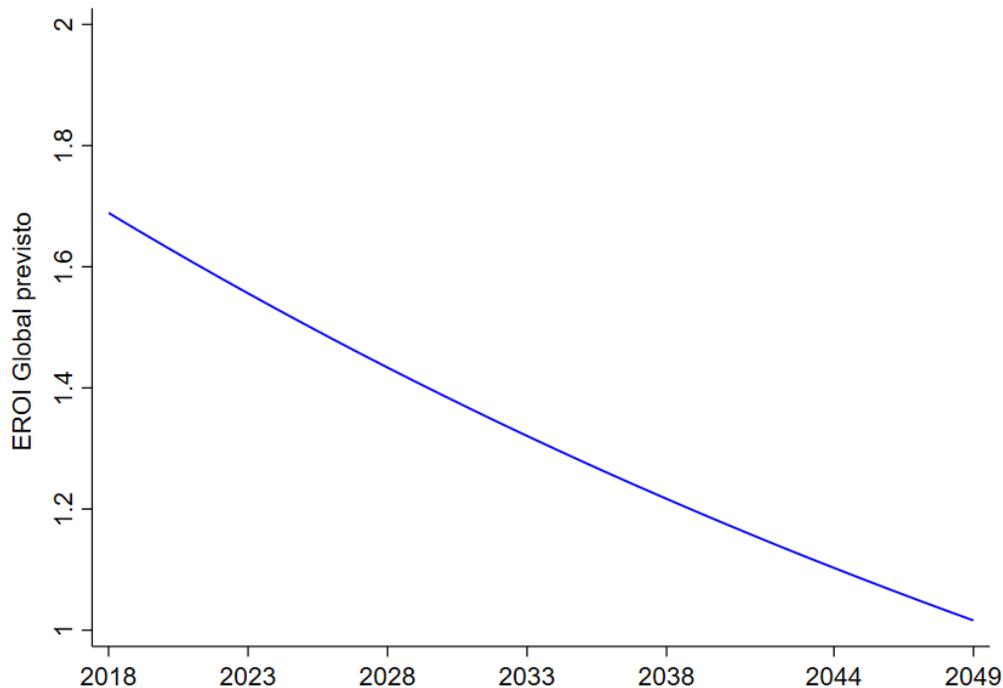


Figura 9 - Previsão do EROI global de 2018 a 2049.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

Ao analisar a figura 9, observa-se que a reta de tendência do EROI é decrescente independente do número de períodos a frente que se deseja estimar, que se estende do final das observações até k passos a frente que se deseja obter a previsão. Neste estudo, o número de passos à frente é maior que o número de observações consideradas para a realização da previsão, o que pode gerar algumas incertezas a respeito do horizonte de previsão escolhido. Entretanto, ao identificar a tendência determinística decrescente, era esperado que os valores estimados continuassem caindo ao longo do tempo e, de acordo com os parâmetros de suavização encontrados, a trajetória da série continua decrescente ao longo do tempo. Então, apesar do horizonte de previsão ser extenso, ele atende ao objetivo de estimar o valor do EROI até o ano de 2049 e captar a tendência.

Graficamente, ao combinar os gráficos do EROI global observados com as estimativas da previsão, é possível ter um panorama visual dos resultados obtidos²⁴. Assim, a figura 10 mostra o gráfico do EROI observado e previsto:

²⁴ A relação de valores do EROI global observado e previsto com mais detalhes se encontram no Apêndice D.

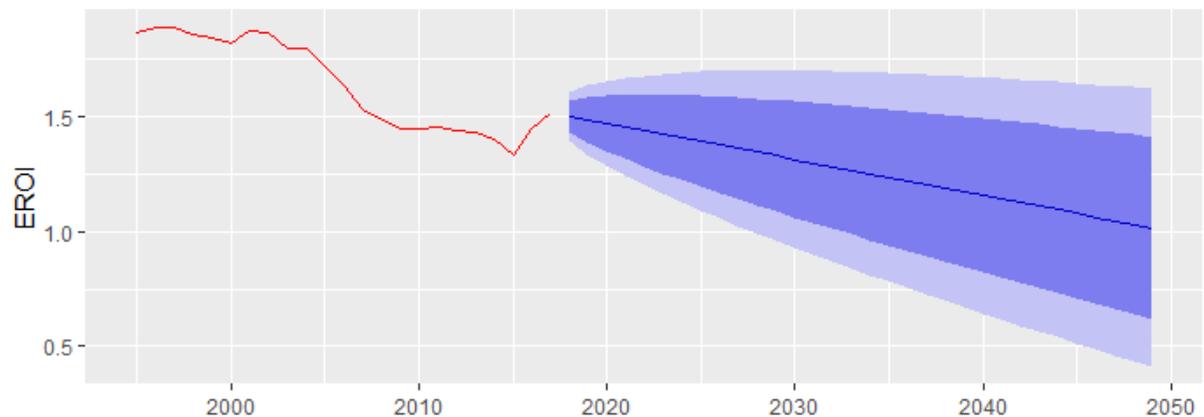


Figura 10 - EROI global observado e previsto.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

Ao observar a figura 10, alguns apontamentos são importantes. Os valores referentes ao EROI global observados estão destacados em vermelho e percebe-se a existência de tendência decrescente. Por sua vez, os valores previstos do EROI global de 2018 até 2049 estão destacados em azul, considerando intervalos de confiança de 80% (azul claro) e 95% (azul escuro). Destaca-se que a previsão é uma reta decrescente constante, pois o Método de suavização exponencial de Holt, ao considerar a presença de tendência, prevê os dados k passos a frente e os expressa de acordo com a tendência notada nas observações amostrais.

Tendo em vista as possíveis implicações do declínio do EROI, Fabre (2019) avalia o EROI de diferentes tecnologias de eletricidades em dois cenários, um considera as condições atuais de produção e o outro considera o sistema 100% renovável. Similar ao presente estudo, o autor também observa a redução do EROI em sua projeção, mesmo utilizando as fontes de energia individualmente e não agregadas. Enquanto o presente estudo encontrou um EROI igual a 1,061 para 2049, Fabre prevê que o EROI global da eletricidade atinja a razão 11:1 em 2050 no primeiro cenário, enquanto no cenário completamente renovável, a previsão indica o EROI global igual a 6:1.

Ademais, embora fosse interessante utilizar múltiplos métodos de previsão para avaliar qual deles é mais preciso na estimativa dos valores de EROI global até 2049, decidiu-se por adotar apenas o método de suavização exponencial de Holt. Este método foi escolhido pois, ao identificar a tendência presente nos dados coletados, ele atendeu aos requisitos de análise estabelecidos.

Entretanto, como as previsões da suavização exponencial pelo Método de Holt formam uma linha reta ao longo do tempo, as pequenas flutuações e mudanças observadas na série de EROI global não são captadas pelo método de previsão, o que pode resultar em estimativas menos precisas. Mesmo assim, a tendência decrescente apontada para os dados observados do

EROI global, embora não seja idêntica, é bastante semelhante, o que permite que as previsões estejam dentro de uma margem de confiança aceitável. Desta forma, os resultados obtidos são úteis e robustos o suficiente para avaliar os impactos da queda no EROI global na economia.

4.4. Impactos do valor estimado para o EROI na economia

Após estimar a previsão dos valores do EROI de 2018 a 2049, foram estimados os impactos do aumento do consumo de energia pelo setor de energia realizando aumentos sucessivos de US\$10 mil em cada etapa, até que o EROI global alcançasse o patamar da estimativa para o ano de 2049, pressupondo que os demais setores da matriz insumo-produto permanecessem com seus valores fixos. Ao todo, foram feitos 93 aumentos sucessivos, isso significa que a expressão (26) foi calculada 93 vezes até que o respectivo valor do EROI correspondesse ao EROI de 2049.

Em seguida, de posse desses valores, dois apontamentos sobre os resultados são feitos. O primeiro deles diz respeito ao impacto direto proveniente do aumento do consumo de energia pelo setor de energia na produção total de toda a economia global, que é encontrado ao subtrair a produção total de 2018 da produção total prevista para 2049. A produção total estimada para 2049 foi de cerca de US\$170,5 trilhões²⁵, enquanto a produção total de 2018 obtida foi de cerca de US\$165,3 trilhões²⁶. A figura 11 ilustra a produção total (em US\$) de 2018 e 2049:

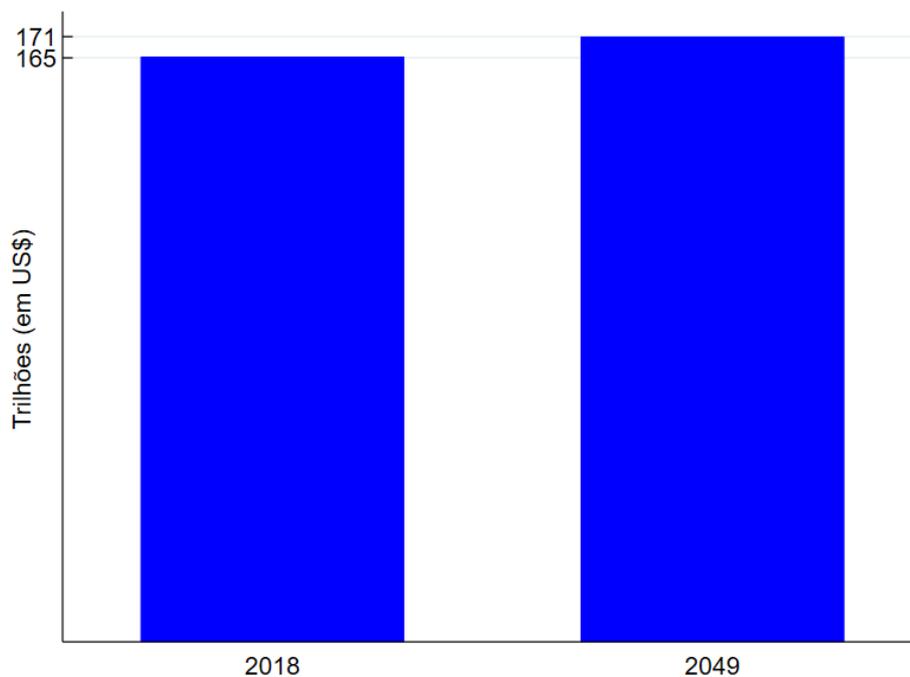


Figura 11 - Produto total global (em trilhões de US\$) em 2018 e 2049.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

²⁵ Especificamente igual a US\$170.577.555.000.000,00.

²⁶ Especificamente igual a US\$165.301.368.000.000,00.

Ao calcular a razão entre o produto total da economia entre 2049 e 2018, encontra-se um valor igual a 1.0319. Em termos percentuais, é o mesmo que dizer que houve um aumento de 3,19% na produção total. Esse percentual em termos monetários corresponde a US\$5,7 trilhões. Contudo, considerando a previsão de uma redução significativa do EROI, atingindo 1.0161 em 2049, é necessário que a produção total da economia aumente em cerca de 3,19% para atender a demanda de energia, o que representa um custo adicional de aproximadamente US\$5,3 trilhões.

Em segundo lugar, ao avaliar especificamente o setor energético, observa-se que a produção total em 2018 foi de aproximadamente de US\$10,7 trilhões, enquanto a previsão para 2049 é de US\$13,4 trilhões. Ao calcular a razão entre o produto total do setor energético entre 2049 e 2018, identifica-se um aumento expressivo na produção total do setor energético, resultando em 1,2516. Em termos percentuais, isto equivale a um crescimento de 25,16%. Portanto, diante do cenário de redução do EROI global, é necessário que a produção do setor de energia aumente em 25,16% para atender a demanda interna do setor de energia e garantir o mesmo nível de produção da economia.

Portanto, ao avaliar os efeitos econômicos do aumento do crescente consumo de energia pelo setor energético em escala global, os resultados apoiam a hipótese de uma redução na atividade econômica mundial devido à queda do EROI global, haja vista a necessidade de aumento do produto total da economia no cenário de previsão e a necessidade de aumento da produção interna do setor de energia, que impacta direta e indiretamente toda a estrutura produtiva.

5. DISCUSSÃO

Em linhas gerais, a análise realizada pelo presente estudo permitiu ampliar o escopo de pesquisa a respeito do retorno de energia sobre o investimento dos países, bem como globalmente. Alinhado as metas sustentáveis a nível mundial, por exemplo os objetivos firmados pela Agenda 2030 pela sustentabilidade, nota-se que a tendência de queda do EROI, mesmo que gradual ao longo dos anos e no longo prazo, afeta diretamente o cumprimento de tais agendas políticas sustentáveis, considerando o encadeamento produtivo existente, conforme discutido neste estudo. Portanto, a necessidade crescente de energia pode desacelerar os prazos de cumprimentos das metas sustentáveis.

Hall (2017) denota que há duas visões de mundo filosóficas sobre como o futuro da energia se desdobrará dentro dos limites da economia e da ciência. A primeira perspectiva se concentra no determinismo humano, destacando a capacidade humana de se sobressair à

natureza, especialmente no que se refere ao desenvolvimento de tecnologias capazes de superar possíveis problemas ambientais e energéticos. Por outro lado, a segunda perspectiva enfatiza a submissão do ser humano às limitações impostas pelos recursos energéticos naturais, ou seja, acredita-se que o futuro da energia será limitado por forças maiores da natureza.

Nesse aspecto, o EROI integra os dois pilares principais que atuam ao longo do tempo e que afetam a eficiência de captação de energia da natureza: os avanços tecnológicos, que tendem a aumentar a eficiência, e o esgotamento dos recursos, que tende a diminuí-la. Dado que o EROI da maioria dos combustíveis fósseis está diminuindo, a força dominante é a do esgotamento (HALL, 2022). Por essa razão, é preciso pensar o futuro da sociedade e a garantia da prosperidade econômica global inserindo a energia no centro da discussão (HALL; KLITGAARD, 2018).

A redução do consumo de combustíveis fósseis é uma das principais ações que podem ser tomadas para combater as mudanças climáticas. Isso porque a queima de combustíveis fósseis, como o petróleo, o carvão e o gás natural, geram emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, na atmosfera. Esses gases contribuem para o aquecimento global e o consequente aumento da temperatura média do planeta. Ao reduzir o consumo de combustíveis fósseis, é possível diminuir a emissão desses gases de efeito estufa e, conseqüentemente, contribuir para a redução do impacto das mudanças climáticas. Além de que, os combustíveis fósseis são fontes finitas de energia, ou seja, em algum momento no futuro irão se esgotar.

A redução da dependência em combustíveis fósseis é fundamental para mitigar as mudanças climáticas e alcançar a sustentabilidade energética global. No entanto, existem vários desafios que os países enfrentam para reduzir essa dependência, como investimentos em infraestrutura, custo de transição, intermitência na geração de energia das fontes renováveis, dependência econômica dos combustíveis fósseis, políticas públicas inadequadas, dentre outros fatores. Esses desafios são reais e complexos, mas não são insuperáveis. Ademais, a dependência de combustíveis fósseis pode representar uma ameaça à segurança energética de um país, uma vez que o preço e a disponibilidade desses recursos também são influenciados por fatores políticos e econômicos externos.

A contradição entre os objetivos globais de fazer uma transição energética para fontes de energia limpa e renovável e o uso crescente dos combustíveis fósseis é um grande desafio enfrentado pela comunidade global na busca por uma economia mais sustentável e de baixo carbono. Essa contradição é evidente, pois a transição energética requer que os países reduzam

a produção de combustíveis fósseis e busquem alternativas mais limpas e renováveis. No entanto, diversos países resistem a essa mudança e continuam investindo pesadamente em tecnologias e infraestrutura de combustíveis fósseis. Para essas nações, a transição energética representa um grande desafio, já que sua infraestrutura e investimentos estão fortemente baseados em combustíveis fósseis.

Além disso, as empresas de combustíveis fósseis possuem uma grande influência política e econômica, muitas vezes trabalhando em estreita colaboração com governos nacionais para proteger seus interesses financeiros e evitar ações regulatórias que possam afetar sua rentabilidade. Ademais, muitos países ainda dependem economicamente da exploração e produção de combustíveis fósseis, o que pode dificultar a transição energética em termos de perda de empregos e de receitas.

Para superar essa contradição, é necessário um esforço conjunto dos países, empresas, organizações da sociedade civil e indivíduos para promover a redução do uso de recursos naturais de origem fóssil. Isso inclui investir em tecnologias de energia renovável, estabelecer políticas públicas e regulamentações que incentivem a utilização de fontes de energia limpa. A transição energética é um processo complexo e desafiador, mas é essencial para garantir um futuro mais sustentável e resiliente para o planeta e para as gerações futuras. No entanto, os interesses financeiros e políticos da indústria de combustíveis fósseis muitas vezes atuam como obstáculos para a transição energética.

Dessa maneira, as regulamentações e políticas públicas são essenciais para incentivar a redução o consumo energético baseado em recursos fósseis, mas muitas vezes são complexas e variam entre os países. Algumas políticas podem beneficiar a produção e o consumo de energias renováveis, enquanto outras podem ser mais favoráveis à exploração de combustíveis fósseis. Dessa maneira, para que a transição energética ocorra, é fundamental o engajamento da sociedade civil, que muitas vezes pode não estar ciente dos benefícios das energias renováveis ou das consequências negativas da dependência de combustíveis fósseis.

Ademais, é necessário que as empresas de combustíveis fósseis se adaptem à nova realidade e se envolvam na transição energética. É necessário repensar seus respectivos modelos de negócios, além de promover tecnologias de armazenamento de energia e gerenciamento de carga, visando a migração gradual para o consumo de energia renovável. Entretanto, a tecnologia pode ter um efeito ambivalente, pois a necessidade de energia não caminha lado a lado com as tecnologias de produção disponíveis (HALL, 2022).

Desse modo, é fundamental que as políticas públicas incentivem a inovação e investimentos em tecnologias limpas e renováveis, mesmo que a tecnologia não represente a solução completa do problema. No entanto, esse cenário não é muito otimista em termos de potencial energético capaz de substituir os combustíveis fósseis, pois o estágio atual das tecnologias renováveis não são capazes de gerar um ganho energético expressivo, em comparação aos recursos fósseis (RANA *et al.*, 2020).

Hall (2017) argumenta que grande parte das decisões acerca dos possíveis caminhos da sustentabilidade são fundamentadas em análises econômicas de corporações e agências governamentais. Não obstante, os governos nacionais têm um papel fundamental a desempenhar na resolução da contradição entre a transição energética e os lucros dos combustíveis fósseis decorrentes, sobretudo, do consumo contínuo desses recursos. Isso pode ser alcançado por meio de incentivos financeiros, captura e armazenamento de carbono e regulamentações ambientais mais rigorosas. Isso pode tornar o consumo de energia renovável mais atraente financeiramente e ajudaria a superar a barreira dos altos custos iniciais associados à implantação de novas tecnologias de energia limpa.

Garantir a sustentabilidade é fundamental para o bem-estar das pessoas e do planeta, e a redução do consumo global de recursos fósseis ao longo das próximas décadas desempenha um papel importante neste processo. Apesar dos benefícios da transição energética, há diversos desafios a serem enfrentados para que essa mudança ocorra de fato. Por essa razão, os desafios globais de níveis adequados de sustentabilidade exigem soluções globais, e que nenhum país pode alcançar esses objetivos sozinho.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou mensurar os impactos do aumento do consumo de energia pelo setor de energia sobre a economia. Para isso, quatro etapas se sucederam para responder à pergunta de pesquisa e contemplar os objetivos geral e específicos. Em primeiro lugar, foi proposto um cálculo alternativo do EROI de cada país bem como um índice do EROI global utilizando uma matriz insumo-produto nacional para 67 economias. Em seguida, verificou-se a tendência determinística do EROI global para, posteriormente, realizar a previsão dos dados até 2049. Por último, de posse dos valores obtidos pela previsão, foram mensurados os impactos sobre o produto total da economia e do setor de energia provenientes desse aumento de consumo energético do setor de energia, mantendo tudo mais constante na matriz insumo-produto.

Nessa perspectiva, o declínio do EROI representa uma proporção crescente da produção de energia que será desviada para obter a energia necessária para administrar uma a atividade

econômica a níveis básicos, deixando menos recursos disponíveis para uso discricionário, que geralmente impulsionam o crescimento. Dessa maneira, as estimativas obtidas para o EROI global são preocupantes, pois ao verificar os impactos na economia a partir do valor do EROI estimado para 2049, foi identificado a necessidade de aumento da produção total da economia em cerca de 3,19% apenas para atender o aumento do consumo de energia pelo próprio setor de energia. Por sua vez, estima-se que a produção do setor de energia precise aumentar cerca de 25,16% apenas para atender a demanda interna do setor de energia, garantindo, portanto, níveis básicos de atividade econômica.

Nota-se que esses resultados encontrados são importantes e, de certa maneira, preocupantes a nível mundial, tendo em vista que o conjunto de países analisados neste estudo respondem a 92% do PIB mundial. Então, alterações na estrutura interna produtiva do setor energético afetam diretamente essas economias.

Sendo assim, a contradição entre o objetivo de alcançar níveis satisfatórios de sustentabilidade global, em contraponto com o aumento contínuo do consumo de combustíveis fósseis é um desafio significativo, mas não pode ser ignorado. É necessário um esforço global para enfrentar esse desafio e estabelecer políticas públicas que regulamentem e incentivem a adoção de fontes de energia renovável gradualmente, além de desencorajar a dependência dos combustíveis fósseis, de modo a alcançar a sustentabilidade energética global.

Para contornar esse problema, uma sugestão para análises futuras é desagregar os setores de energia, que não foi possível realizar neste estudo dada as características dos dados disponibilizados pela OCDE. Sendo assim, ainda há bastante espaço na literatura para discutir sobre questões energéticas, sobretudo a respeito do EROI. Observa-se que as tipologias de cálculos, apesar de distintas, encontram resultados interessantes que incorporam o debate. Portanto, outra questão de interesse é a discussão dos impactos de uma redução do EROI nas próximas décadas nos países da América Latina, inclusive o Brasil, tendo em vista o número reduzido de análises focalizadas para essas economias.

REFERÊNCIAS

- AGREEMENT, P. Paris agreement. In: HEINONLINE. **Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change** (21st Session, 2015: Paris). Retrived December. [S.l.], 2015. v. 4, p. 2017.
- AHMED, N. M. Failing states, collapsing systems: biophysical triggers of political violence. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017.
- AL-WAELI, A. H.; SOPIAN, K.; KAZEM, H. A.; CHAICHAN, M. T. Photovoltaic/thermal (pv/t) systems: Status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 77, p. 109–130, 2017.
- BHANDARI, K. P.; COLLIER, J. M.; ELLINGSON, R. J.; APUL, D. S. Energy payback time (epbt) and energy return on energy invested (eroi) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 47, p. 133–141, 2015.
- BOEHMKE, B. Uc business analytics r programming guide. **University of Cincinnati**, 2018.
- BRAND-CORREA, L. I.; BROCKWAY, P. E.; COPELAND, C. L.; FOXON, T. J.; OWEN, A.; TAYLOR, P. G. Developing an Input-Output Based Method to Estimate a National-Level Energy Return on Investment (EROI). **Energies**, v. 10, n. 4, p. 534, abr. 2017. <https://doi.org/10.3390/en10040534>.
- BRANDT, A. R. How Does Energy Resource Depletion Affect Prosperity? Mathematics of a Minimum Energy Return on Investment (EROI). **BioPhysical Economics and Resource Quality**, v. 2, n. 1, p. 2, 16 mar. 2017. <https://doi.org/10.1007/s41247-017-0019-y>.
- BRANDT, A. R. Oil Depletion and the Energy Efficiency of Oil Production: The Case of California. **Sustainability**, v. 3, n. 10, p. 1833–1854, out. 2011. <https://doi.org/10.3390/su3101833>.
- BROCKWAY, P. E.; OWEN, A.; BRAND-CORREA, L. I.; HARDT, L. Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources. **Nature Energy**, v. 4, n. 7, p. 612–621, jul. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0425-z>.
- BROWN, R. G. Statistical forecasting for inventory control. McGraw-Hill, 1959.
- CAPELLÁN-PÉREZ, I.; DE CASTRO, C.; MIGUEL GONZÁLEZ, L. J. Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, p. 100399, 1 nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>.
- CASTELAO, R. A.; SOUZA, C. C. de; FRAINER, D. M. Aplicações da Matriz Insumo-Produto em análises ambientais no Brasil: uma revisão sistemática de literatura. **Ciência e Natura**, , p. e17–e17, 16 jul. 2019. <https://doi.org/10.5902/2179460X36544>.

CLEVELAND, C. J.; COSTANZA, R.; HALL, C. A. S.; KAUFMANN, R. Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective. **Science**, v. 225, n. 4665, p. 890–897, 31 ago. 1984. <https://doi.org/10.1126/science.225.4665.890>.

DALE, M.; KRUMDIECK, S.; BODGER, P. Global energy modelling — A biophysical approach (GEMBA) part 1: An overview of biophysical economics. **Ecological Economics**, v. 73, p. 152–157, 15 jan. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.10.014>.

DALE, Michael; KRUMDIECK, S.; BODGER, P. Net energy yield from production of conventional oil. **Energy Policy**, Asian Energy Security. v. 39, n. 11, p. 7095–7102, 1 nov. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.021>.

DAY, J. W.; D'ELIA, C. F.; WIEGMAN, A. R.; RUTHERFORD, J. S.; HALL, C. A.; LANE, R. R.; DISMUKES, D. E. The energy pillars of society: Perverse interactions of human resource use, the economy, and environmental degradation. **Biophysical Economics and Resource Quality**, Springer, v. 3, n. 1, p. 1–16, 2018.

DEFNEY, Kenneth S. **Beyond oil: The view from Hubbert's peak**. Hill and Wang, 2006.

DIESENDORF, M.; WIEDMANN, T. Implications of trends in energy return on energy invested (eroi) for transitioning to renewable electricity. **Ecological Economics**, Elsevier, v. 176, p. 106726, 2020.

DUPONT, E.; GERMAIN, M.; JEANMART, H. Estimate of the societal energy return on investment (eroi). **Biophysical Economics and Sustainability**, Springer, v. 6, n. 1, p. 1–14, 2021.

EBRAHIMI, M.; GHASABANI, N. C. Forecasting opec crude oil production using a variant multicyclic hubbert model. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Elsevier, v. 133, p. 818–823, 2015.

ECCLESIA, M. V.; SANTOS, J.; BROCKWAY, P. E.; DOMINGOS, T. A Comprehensive Societal Energy Return on Investment Study of Portugal Reveals a Low but Stable Value. **Energies**, v. 15, n. 10, p. 3549, jan. 2022. <https://doi.org/10.3390/en15103549>.

ENDERS, W. Applied econometric time series fourth edition. **New York (US): University of Alabama**, 2015.

EPE, E. de P. E. Balanço energético nacional 2020. Ministério de Minas e Energia - MME, 2020.

EPE, E. de P. E. Balanço energético nacional 2022. Ministério de Minas e Energia - MME, 2022.

FABRE, A. Evolution of EROIs of electricity until 2050: Estimation and implications on prices. **Ecological Economics**, v. 164, p. 106351, 1 out. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.06.006>.

FAGNART, J.-F.; GERMAIN, M.; PEETERS, B. Can the Energy Transition Be Smooth? A General Equilibrium Approach to the EROEI. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1176, jan. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12031176>.

- FENG, J.; FENG, L.; WANG, J. Analysis of point-of-use energy return on investment and net energy yields from china's conventional fossil fuels. **Energies**, MDPI, v. 11, n. 2, p. 313, 2018.
- FENG, J.; FENG, L.; WANG, J.; KING, C. W. Modeling the point of use EROI and its implications for economic growth in China. **Energy**, v. 144, p. 232–242, 1 fev. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.061>.
- FREITAS, F.; SOUZA, S. D.; FERREIRA, L.; OTTO, R.; ALESSIO, F.; SOUZA, S. D.; VENTURINI, O.; JUNIOR, O. A. The brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 101, p. 146–157, 2019.
- GAGNON, N.; HALL, C. A.; BRINKER, L. A preliminary investigation of energy return on energy investment for global oil and gas production. **Energies**, Molecular Diversity Preservation International, v. 2, n. 3, p. 490–503, 2009.
- GARDNER, E. S. Exponential smoothing: The state of the art—Part II. **International Journal of Forecasting**, v. 22, n. 4, p. 637–666, 1 out. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.005>.
- GIELEN, D.; BOSHELL, F.; SAYGIN, D.; BAZILIAN, M. D.; WAGNER, N.; GORINI, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, v. 24, p. 38–50, 1 abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>.
- GOOD, C. Environmental impact assessments of hybrid photovoltaic–thermal (pv/t) systems—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 55, p. 234–239, 2016.
- GRANDELL, L.; HALL, C. A.; HOOK, M. Energy return on investment for norwegian oil and gas from 1991 to 2008. **Sustainability**, Molecular Diversity Preservation International (MDPI), v. 3, n. 11, p. 2050–2070, 2011
- GUILHOTO, J. J. M. Análise de insumo-produto: teoria e fundamentos. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.
- GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. *Econometria básica*. 5th ed. Amgh Editora, 2011.
- GUPTA, A. K.; HALL, C. A. A review of the past and current state of eroi data. **Sustainability**, Molecular Diversity Preservation International (MDPI), v. 3, n. 10, p. 1796–1809, 2011.
- HALL, C.; THARAKAN, P.; HALLOCK, J.; CLEVELAND, C.; JEFFERSON, M. Hydrocarbons and the evolution of human culture. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 426, n. 6964, p. 318–322, 2003.
- HALL, C. A. Will EROI be the Primary Determinant of Our Economic Future? The View of the Natural Scientist versus the Economist. **Joule**, v. 1, n. 4, p. 635–638, 20 dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.09.010>.
- HALL, C. A. The 50th anniversary of the limits to growth: Does it have relevance for today's energy issues? **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 15, n. 14, p. 4953, 2022.

HALL, C. A. S.; BALOGH, S.; MURPHY, D. J. R. What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? **Energies**, v. 2, n. 1, p. 25–47, mar. 2009. <https://doi.org/10.3390/en20100025>.

HALL, C. A.; CLEVELAND, C. J. Petroleum drilling and production in the united states: Yield per effort and net energy analysis. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 211, n. 4482, p. 576–579, 1981.

HALL, C. A.; KLITGAARD, K. Energy and the wealth of nations: An introduction to biophysical economics. [S.l.]: Springer, v. 511, 2018.

HALL, C. A. S.; LAMBERT, J. G.; BALOGH, S. B. EROI of different fuels and the implications for society. **Energy Policy**, v. 64, p. 141–152, 1 jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>.

HESS, C. E. E.; FENRICH, E. Socio-environmental conflicts on hydropower: The São Luiz do Tapajós project in Brazil. *Environmental science & policy*, **Elsevier**, v. 73, p. 20–28, 2017.

HEUN, M. K.; DE WIT, M. Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions. **Energy Policy**, Strategic Choices for Renewable Energy Investment. v. 40, p. 147–158, 1 jan. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.008>.

HOLT, C. Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted averages (our memorandum no. 52). **Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh USA**, v. 10, 1957.

HU, Y.; FENG, L.; HALL, C. C.; TIAN, D. Analysis of the energy return on investment (eroi) of the huge daqing oil field in china. **Sustainability**, Molecular Diversity Preservation International (MDPI), v. 3, n. 12, p. 2323–2338, 2011.

HU, Y.; HALL, C. A.; WANG, J.; FENG, L.; POISSON, A. Energy return on investment (eroi) of china's conventional fossil fuels: Historical and future trends. **Energy**, Elsevier, v. 54, p. 352–364, 2013.

HUSSAIN, J.; KHAN, A.; ZHOU, K. The impact of natural resource depletion on energy use and CO2 emission in Belt & Road Initiative countries: A cross-country analysis. **Energy**, v. 199, p. 117409, 15 maio 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117409>.

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. Forecasting: principles and practice. OTexts, 2018

JACKSON, A.; JACKSON, T. Modelling energy transition risk: The impact of declining energy return on investment (EROI). **Ecological Economics**, v. 185, p. 107023, 1 jul. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107023>.

KAMARULZAMAN, A.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. A. Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review. **Solar Energy**, v. 221, p. 559–582, 1 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.056>.

KING, C. W.; HALL, C. A. S. Relating Financial and Energy Return on Investment. **Sustainability**, v. 3, n. 10, p. 1810–1832, out. 2011. <https://doi.org/10.3390/su3101810>.

KRAUSMANN, F.; GINGRICH, S.; EISENMENGER, N.; ERB, K.-H.; HABERL, H.; FISCHER-KOWALSKI, M. et al. Growth in global materials use, gdp and population during the 20th century. **Ecological economics**, Elsevier Science, v. 68, n. 10, p. 2696–2705, 2009.

LAMBERT, J.; HALL, C.; BALOGH. Eroi of global energy resources: status, trends and social implications. **United Kingdom Department for International Development**, 2013.

LAMBERT, J. G.; HALL, C. A. S.; BALOGH, S.; GUPTA, A.; ARNOLD, M. Energy, EROI and quality of life. **Energy Policy**, v. 64, p. 153–167, 1 jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.001>.

LEONTIEF, W. W. Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States. **The Review of Economics and Statistics**, v. 18, n. 3, p. 105–125, 1936. <https://doi.org/10.2307/1927837>.

MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S. C.; HYNDMAN, R. J. **Forecasting methods and applications**. [S.l.]: John wiley & sons, 2008.

MALEK, A. B. M.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. A. Prospects, progress, challenges and policies for clean power generation from biomass resources. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 22, n. 6, p. 1229–1253, 1 ago. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01873-4>.

MAYER, A.; CASTRO-DIAZ, L.; LOPEZ, M. C.; LETURCQ, G.; MORAN, E. F. Is hydropower worth it? exploring amazonian resettlement, human development and environmental costs with the Belo Monte project in Brazil. **Energy Research & Social Science**, Elsevier, v. 78, p. 102129, 2021.

MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. **Input-Output Analysis: Foundations and Extensions**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2009.

MONTOYA, M. A.; BERTUSSI, L. A.; LOPES, R. L.; FINAMORE, E. B. Uma nota sobre consumo energético, emissões, renda e emprego na cadeia de soja no brasil. **Revista Brasileira de Economia**, SciELO Brasil, v. 73, p. 345–369, 2019.

MONTOYA, M. A.; PASQUAL, C. A.; LOPES, R. L.; GUILHOTO, J. J. et al. As relações intersetoriais do setor energético no crescimento da economia brasileira: uma abordagem insumo-produto. **Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo**, 2013.

MURPHY, D. J.; HALL, C. A. Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1185, n. 1, p. 102–118, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x>.

MURPHY, D. J.; HALL, C. A. S.; DALE, M.; CLEVELAND, C. Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels. **Sustainability**, v. 3, n. 10, p. 1888–1907, out. 2011. <https://doi.org/10.3390/su3101888>.

MURPHY, D. J.; RAUGEI, M.; CARBAJALES-DALE, M.; ESTRADA, B. R. Energy return on investment of major energy carriers: Review and harmonization. **Sustainability**, MDPI, v. 14, n. 12, p. 7098, 2022.

OECD. Input-output tables. Organisation for Economic Cooperation and Development, 2015.

POISSON, A.; HALL, C. A. S. Time Series EROI for Canadian Oil and Gas. **Energies**, v. 6, n. 11, p. 5940–5959, nov. 2013. <https://doi.org/10.3390/en6115940>.

PORSSE, A. A.; VALE, V. d. A. Insumo-produto: Introdução e modelos regionais. Núcleo de Estudos em Desenvolvimento Urbano e Regional, Universidade Federal do Paraná, 2020.

PRIETO, P. A.; HALL, C. A.; MELGAR, R. **Spain's photovoltaic revolution: the energy return on investment**. [S.l.]: Springer, 2013.

RAIMI, D.; CAMPBELL, E.; NEWELL, R.G.; PREST, B.; VILLANUEVA, S.; WINGENROTH, J. Global Energy Outlook 2022: Turning Points and Tension in the Energy Transition; Resources for the Future: Washington, DC, USA, 2022.

RANA, R. L.; LOMBARDI, M.; GIUNGATO, P.; TRICASE, C. Trends in Scientific Literature on Energy Return Ratio of Renewable Energy Sources for Supporting Policymakers. **Administrative Sciences**, v. 10, n. 2, p. 21, jun. 2020. <https://doi.org/10.3390/admsci10020021>.

RANDELL, H. The short-term impacts of development-induced displacement on wealth and subjective well-being in the brazilian amazon. World development, **Elsevier**, v. 87, p. 385–400, 2016.

RANDELL, H. Forced migration and changing livelihoods in the brazilian amazon. **Rural Sociology**, Wiley Online Library, v. 82, n. 3, p. 548–573, 2017.

RAO, N. D.; MIN, J.; MASTRUCCI, A. Energy requirements for decent living in india, brazil and south africa. **Nature Energy**, Nature Publishing Group, v. 4, n. 12, p. 1025–1032, 2019.

RAUGEI, M.; PALMER, P. Fullana-i; FTHENAKIS, V. The energy return on energy investment (eroi) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles. **Energy Policy**, Elsevier, v. 45, p. 576–582, 2012.

STEAD, C. H. An environmental, financial and economic analysis of introducing biodiesel to locomotives: An Indian Railways case study. Tese (Doutorado) — University of Leeds, 2021.

UN General Assembly. The 2030 Agenda for Sustainable Development; Resolution: Middlesbrough, UK, 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2022.

U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2019. Washington, DC. 2019. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>. Acesso em: 05 de maio de 2022.

U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2021. Washington, DC. 2021. Disponível em: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/IEO2021_Narrative.pdf. Acesso em: 05 de maio de 2022.

WEISSBACH, D.; RUPRECHT, G.; HUKU, A.; CZERSKI, K.; GOTTLIEB, S.; HUSSEIN, A. Energy intensities, erois (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants. **Energy**, Elsevier, v. 52, p. 210–221, 2013.

WINTERS, P. R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. **Management science**, INFORMS, v. 6, n. 3, p. 324–342, 1960.

ENERDATA. WORLD ENERGY PRIMARY PRODUCTION | ENERGY PRODUCTION. 2021. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-production.html>. Acesso em: 31 mar. 2022.

XU, G.; WANG, W. China's energy consumption in construction and building sectors: An outlook to 2100. **Energy**, v. 195, p. 117045, 15 mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117045>.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Setores das matrizes insumo-produto OCDE edição 2021.....	69
APÊNDICE B - EROI calculado de cada país de 1995 a 2018.....	71
APÊNDICE C - Estatísticas descritivas do EROI dos países entre 1995 e 2018.....	81
APÊNDICE D - EROI global observado e previsto.....	82

APÊNDICE A - Setores das matrizes insumo-produto OCDE edição 2021

Número	Código	Setores
1	D01T02	Agricultura, caça, silvicultura
2	D03	Pesca e aquicultura
3	D05T06	Mineração e pedreiras, produtos produtores de energia
4	D07T08	Mineração e pedreiras, produtos não produtores de energia
5	D09	Atividades de serviços de apoio à mineração
6	D10T12	Produtos alimentares, bebidas e tabaco
7	D13T15	Têxteis, produtos têxteis, couro e calçado
8	D16	Madeira e produtos de madeira e cortiça
9	D17T18	Produtos de papel e impressão
10	D19	Coque e produtos petrolíferos refinados
11	D20	Produtos químicos e químicos
12	D21	Produtos farmacêuticos, químicos medicinais e botânicos
13	D22	Produtos de borracha e plástico
14	D23	Outros produtos minerais não metálicos
15	D24	Metais básicos
16	D25	Produtos de metal fabricado
17	D26	Equipamentos de informática, eletrônicos e ópticos
18	D27	Equipamento elétrico
19	D28	Máquinas e equipamentos
20	D29	Veículos a motor, reboques e semi-reboques
21	D30	Outros equipamentos de transporte
22	D31T33	Fabricação de outros equipamentos de transporte, reparação e instalação de máquinas e equipamentos
23	D35	Fornecimento de eletricidade, gás, vapor e ar condicionado
24	D36T39	Abastecimento de água, saneamento, gerenciamento de resíduos e atividades de remediação
25	D41T43	Construção
26	D45T47	Comércio no atacado e varejo, reparação de veículos automóveis
27	D49	Transporte terrestre e transporte por dutos
28	D50	Transporte marítimo

29	D51	Transporte aéreo
30	D52	Armazenagem e atividades de apoio ao transporte
31	D53	Atividades postais e de correio
32	D55T56	Atividades de alojamento e restauração
33	D58T60	Atividades editoriais, audiovisuais e de radiodifusão
34	D61	Telecomunicações
35	D62T63	TI e outros serviços de informação
36	D64T66	Atividades financeiras e de seguros
37	D68	Atividades imobiliárias
38	D69T75	Atividades profissionais, científicas e técnicas
39	D77T82	Serviços administrativos e de apoio
40	D84	Administração pública e defesa, segurança social obrigatória
41	D85	Educação
42	D86T88	Saúde humana e atividades de trabalho social
43	D90T93	Artes, entretenimento e recreação
44	D94T96	Outras atividades de serviço
45	D97T98	Atividades das famílias como empregadoras, bens e serviços indiferenciados

Fonte: Elaboração própria baseado em OECD ICIO 2021.

APÊNDICE B - EROI calculado de cada país de 1995 a 2018

Ano	País						
-	Austrália	Áustria	Bélgica	Canadá	Chile	Colômbia	Costa Rica
1995	3.2180	1.7953	3.8666	3.3008	2.2205	1.7416	11.3174
1996	3.1342	1.7114	3.2227	3.0639	1.8941	1.9893	13.6992
1997	2.9913	1.9143	2.9561	5.6654	1.5444	1.9340	14.0521
1998	3.1402	2.0740	3.6803	5.2401	1.3433	1.8980	18.2344
1999	2.6777	2.0774	3.3875	4.6979	1.2667	3.3919	17.0022
2000	2.5804	1.9000	1.7521	2.9529	1.1471	2.4638	17.1073
2001	2.8432	1.6946	1.7052	3.1135	0.9400	2.1776	19.5270
2002	2.8181	1.5654	2.0303	2.8327	0.8321	2.1605	13.9808
2003	2.7703	1.1145	2.1157	2.9672	0.7412	2.0967	15.5211
2004	2.7337	1.1762	1.9045	2.7617	0.8372	2.0128	13.4236
2005	2.7967	1.0199	1.4840	2.7314	0.8112	2.1024	9.8792
2006	2.7707	0.8047	1.3453	2.7413	0.8634	2.1863	8.0322
2007	2.6272	0.8207	1.3381	2.8121	0.6381	2.1253	7.4467
2008	2.8227	0.6431	1.1348	2.8545	0.5408	2.1255	6.3578
2009	2.9353	0.6950	1.3740	3.0876	0.6946	2.2564	9.3600
2010	2.6842	0.7302	0.9963	2.7329	0.7031	2.3446	8.9145
2011	2.8316	0.6998	0.8230	2.6779	0.5959	2.6235	8.6890
2012	2.7199	0.6913	0.7553	2.6146	0.5873	2.5845	11.9090
2013	2.5453	0.7434	0.9428	2.7882	0.6498	2.3485	8.7459
2014	2.8553	0.6598	0.8964	3.2581	0.7232	1.8921	10.5145
2015	3.1119	0.7160	1.1556	3.7974	1.0591	1.6456	23.1418
2016	2.9857	0.7984	1.3693	3.8878	1.0950	1.5823	31.7687
2017	3.4333	0.7039	1.1938	3.4683	0.9762	1.5897	13.7323
2018	3.6629	0.6637	1.0007	3.6824	0.8340	1.5440	13.4837

Ano	País						
-	República Tcheca	Dinamarca	Estônia	Finlândia	França	Alemanha	Grécia
1995	1.7414	4.1260	2.0466	3.0535	3.3231	5.0258	2.2053
1996	1.6383	3.2854	2.0193	2.4279	2.9975	4.5416	1.8161
1997	1.3693	3.7151	2.0219	2.4652	2.6651	5.0747	1.7456
1998	1.5683	4.6910	2.1110	3.5691	2.8820	6.6464	1.5412
1999	1.5454	5.2478	2.1135	2.6096	2.7687	5.9656	1.4216
2000	1.2383	3.4232	2.0765	1.3781	1.7687	3.3198	1.2588
2001	1.2266	3.4874	2.2820	1.8794	1.7576	3.5970	1.2392
2002	1.4013	4.0384	2.4598	1.9260	1.8521	3.3106	1.7023
2003	1.3742	4.0100	2.5440	2.0750	1.8305	3.0732	1.9070
2004	1.4457	3.7351	2.6024	2.0658	1.7200	2.7987	1.7159
2005	1.2565	3.0895	2.8813	1.6663	1.2879	2.3664	1.2609
2006	1.2130	2.7166	3.0507	1.3656	1.0781	2.0601	0.9786
2007	1.3707	2.5036	2.5319	1.4546	0.9698	1.9874	0.8637
2008	1.3965	2.2612	2.1964	1.4595	0.8242	1.7313	0.7804
2009	1.6610	2.6219	2.7938	2.0812	0.8846	2.3650	0.9923
2010	1.4195	2.6153	2.4618	1.7772	0.8511	1.9768	1.3205
2011	1.2584	2.3834	2.6011	1.4148	0.8071	1.6518	1.4171
2012	1.1905	2.0871	2.3726	1.4150	0.8338	1.6057	1.1034
2013	1.2476	2.1997	2.3439	1.4505	0.8680	1.6721	1.1706
2014	1.4457	2.5301	2.4775	1.7979	1.0136	1.7990	0.9824
2015	1.7150	3.2818	2.5828	2.4942	1.1165	2.1316	1.0057
2016	2.0156	4.2160	2.9710	2.3515	1.1974	2.4765	1.1432
2017	1.7169	3.0849	2.9163	2.3563	1.0818	2.3306	0.9668
2018	1.7589	3.0288	2.9447	1.9986	1.0580	2.1466	0.8437

Ano	País						
-	Hungria	Islândia	Irlanda	Israel	Itália	Japão	Coréia do Sul
1995	2.3519	6.8521	7.2088	1.3303	2.0289	3.0267	0.9817
1996	2.2006	6.9068	6.9146	1.2083	1.9124	2.7762	0.7729
1997	2.2197	6.4550	6.7780	1.2678	1.8205	2.7419	0.9007
1998	2.1454	6.7122	7.3141	1.2814	2.2367	3.2730	0.9365
1999	2.2300	7.2166	6.0433	1.1894	2.0083	3.3859	0.9336
2000	1.6872	6.9163	5.2097	1.2208	1.3619	2.5493	0.8147
2001	1.7302	8.4200	3.4773	1.2830	1.3971	2.5755	0.8202
2002	2.0997	7.3799	4.1128	1.2070	1.4848	2.5545	0.7278
2003	2.0598	7.8017	3.5609	1.2576	1.4497	2.2960	0.7493
2004	2.2653	7.2411	2.8224	1.1861	1.4731	2.1289	0.6913
2005	1.7012	5.3278	1.9515	1.1678	1.1941	1.4516	0.7320
2006	1.3843	6.5671	2.0970	1.0710	1.0513	1.3911	0.6444
2007	1.6744	6.4622	1.5420	1.1284	1.1087	1.2513	0.6354
2008	1.7058	6.1789	1.7376	1.0491	0.9141	1.0431	0.4795
2009	1.9178	6.7130	2.3195	1.1824	1.1559	1.5336	0.4502
2010	1.6881	7.1142	2.1990	1.1052	0.8630	1.3632	0.5360
2011	1.4089	7.5881	2.4264	0.9682	0.8206	0.8495	0.4421
2012	1.3424	7.6281	2.0236	0.9210	0.8246	0.7554	0.4036
2013	1.2827	7.3064	2.0260	1.0520	0.9719	0.7142	0.4639
2014	1.5462	6.0311	2.3824	1.2240	1.0077	0.7372	0.5631
2015	1.9307	6.6887	4.5710	1.3091	1.1412	1.0856	0.7478
2016	2.4994	6.4031	5.5394	1.2536	1.3078	1.4645	0.9195
2017	2.0779	6.7187	8.3945	1.2601	1.1784	1.2337	0.7862
2018	1.8230	6.3959	7.7649	1.1983	1.0949	2.4625	0.5837

Ano	País						
-	Letônia	Lituânia	Luxemburgo	México	Holanda	Nova Zelândia	Noruega
1995	3.9013	1.0833	2.9593	3.8228	2.1714	2.7772	15.4969
1996	3.8621	0.9887	2.9616	4.0110	1.9712	2.4460	20.5178
1997	4.4297	1.0523	2.5361	3.4254	1.9451	2.1816	21.8675
1998	4.7322	1.0904	2.5552	3.3039	2.7459	2.0466	15.2700
1999	3.7695	1.2760	3.0145	3.4923	2.1805	1.8673	19.6751
2000	2.5326	1.2775	2.4631	3.2343	1.4569	1.5596	11.7954
2001	2.1782	1.2191	2.0606	3.0907	1.8061	1.5027	15.4119
2002	1.8712	1.3686	2.1064	3.1442	1.9382	1.4613	15.6262
2003	1.7505	1.4551	2.5017	3.5515	2.0599	1.6167	17.7255
2004	1.8088	1.6523	1.9984	3.1566	1.8793	1.5408	17.5179
2005	1.7042	1.3239	1.4108	2.5907	1.5562	1.3620	14.5691
2006	1.3423	1.2179	1.1617	2.6931	1.5039	1.5091	13.7736
2007	1.2345	1.4800	1.0507	2.4727	1.4522	1.2978	13.3645
2008	1.2420	1.1967	0.9042	2.1431	1.4273	1.3248	11.1822
2009	1.3776	1.4443	1.7797	2.2863	1.8408	1.2962	13.4625
2010	1.6160	1.0941	1.5911	2.2277	1.4420	1.2647	13.2984
2011	1.3012	1.4288	1.2454	2.0327	1.2473	1.1489	11.0345
2012	1.0221	1.2067	1.2848	1.9107	1.2728	1.1453	11.5360
2013	1.0417	1.2604	1.5142	1.9067	1.3375	1.1550	13.0715
2014	1.3038	1.2381	2.3920	2.0738	1.2119	1.2427	14.9982
2015	2.0951	1.2207	2.5130	2.3720	1.5774	1.3200	16.8515
2016	2.5079	1.1180	2.8551	2.1779	1.7389	1.2882	18.0478
2017	2.3539	1.2096	2.9713	2.0907	1.4637	1.1955	11.8465
2018	2.2006	0.8291	2.2545	2.1234	1.3263	1.0706	11.4505

Ano	País						
-	Polônia	Portugal	Eslováquia	Eslovênia	Espanha	Suécia	Suíça
1995	2.1207	1.0835	1.3234	2.7994	2.3364	4.1194	1.3287
1996	2.0329	1.1361	0.9443	2.9523	2.1380	2.9453	1.2263
1997	1.9955	1.0914	1.0111	2.8864	1.9743	2.9616	1.1706
1998	2.1335	1.3294	1.1949	3.4188	2.2157	3.8965	1.1149
1999	2.1250	1.0855	1.2770	3.4148	1.7290	2.9024	1.0891
2000	2.1691	0.8263	0.9592	3.7594	1.0175	3.7956	1.1072
2001	2.2899	0.8607	0.8915	3.7858	1.1173	4.2052	1.0498
2002	2.4734	0.8382	0.9161	4.1743	1.1644	4.2589	0.9946
2003	2.5192	0.8851	0.9126	4.1323	1.2778	4.1063	0.9275
2004	2.7128	0.8908	1.1119	3.0547	1.1872	4.4172	0.9172
2005	2.3972	0.7224	1.1458	2.9747	0.9636	4.0059	0.8531
2006	2.1243	0.6887	1.1817	2.8940	0.8365	3.7880	0.8420
2007	2.2237	0.6425	1.1927	2.9099	0.8807	4.2252	0.8359
2008	2.0636	0.5563	1.5131	3.4828	0.8816	3.8952	0.8310
2009	2.1748	0.6317	0.9931	4.1501	1.0515	2.6106	0.8772
2010	2.1801	0.6474	0.8394	4.1044	0.9055	2.2246	0.9173
2011	1.9612	0.5937	0.6924	4.2002	0.8862	2.0106	0.9123
2012	1.8682	0.5523	0.7168	4.2799	0.8050	1.7403	1.0674
2013	2.0155	0.5576	0.6975	4.7386	0.7894	2.2580	1.2983
2014	2.0923	0.6091	0.9663	4.8643	0.7904	2.3946	1.7446
2015	2.6105	0.7284	0.9230	5.3354	1.0133	2.8602	1.9414
2016	3.0619	0.7587	0.9875	5.6062	1.6148	3.2173	1.9162
2017	2.7072	0.6924	0.9523	5.1505	1.2858	2.3924	1.9354
2018	2.3361	0.6497	0.9185	5.7082	1.1932	1.9623	1.8780

Ano	País						
-	Turquia	Grã-Bretanha	Estados Unidos	Argentina	Brasil	Brunei	Bulgária
1995	1.8028	1.8608	2.4762	1.5075	1.5146	1.5725	1.9037
1996	1.6450	1.7213	2.2396	1.5159	1.5983	1.5889	1.5109
1997	1.6612	1.6417	2.2329	1.5936	1.5779	1.5722	1.4775
1998	1.8797	1.6835	2.8108	1.4997	1.7170	1.5505	1.5360
1999	1.0684	1.5184	2.4275	1.5486	1.6302	1.5520	1.1937
2000	0.7775	1.4076	1.7906	1.6381	1.3733	1.6367	1.2267
2001	0.7821	1.6108	2.1376	1.6988	1.3752	1.6135	1.2642
2002	0.7446	1.5435	2.0646	1.9349	1.3663	1.6173	1.2487
2003	0.7137	1.4880	1.8335	1.8359	1.3266	1.6574	1.2519
2004	0.6822	1.5449	1.6442	1.7538	1.3064	1.6647	1.2315
2005	0.6958	1.2741	1.4951	1.8982	1.3574	1.8113	1.0506
2006	0.5990	1.1785	1.4903	1.7126	1.3649	2.1073	0.8676
2007	0.6415	1.1408	1.4641	1.7719	1.4019	1.9500	0.9588
2008	0.6448	1.0092	1.1987	1.8823	1.2164	2.2985	0.8461
2009	0.7193	1.1122	1.6874	1.7481	1.4475	2.0212	1.1149
2010	0.6861	0.9351	1.4457	1.7653	1.5374	2.4302	0.9464
2011	0.6045	0.8068	1.3456	1.8386	1.3849	2.4932	1.0408
2012	0.6596	0.8217	1.3876	1.8138	1.2173	2.5569	0.8471
2013	0.6182	0.8709	1.4328	1.8539	1.0772	2.4723	1.0422
2014	0.6104	0.8829	1.5122	1.7815	1.1236	2.2583	1.1783
2015	0.6216	1.0156	2.2665	1.8081	1.4490	1.7800	1.4003
2016	0.6316	0.9995	2.4829	1.8085	1.8088	1.9663	1.5503
2017	0.5808	0.9785	2.3084	1.8508	1.7076	1.7973	1.4172
2018	0.5736	0.9743	2.1464	1.7175	1.5742	1.8795	1.1513

Ano	País						
-	China	Croácia	Chipre	Índia	Indonésia	Hong Kong	Cazaquistão
1995	2.6261	2.8193	5.8247	1.7240	2.6169	16.8091	2.0066
1996	2.4706	2.4001	5.8541	1.5861	2.0409	17.7176	2.1494
1997	2.3707	2.5012	5.9446	1.6121	2.3015	20.6102	2.0295
1998	1.7298	2.7984	7.7776	1.6649	3.8328	21.9416	1.9913
1999	1.6625	2.5934	4.6176	1.3405	2.5689	20.7924	2.1939
2000	1.6247	2.3214	3.2046	1.2686	3.2170	18.3952	3.2133
2001	1.9854	2.2009	6.0655	1.3454	2.9338	24.7260	2.1753
2002	2.1490	1.9490	5.4943	1.3321	2.0896	22.1496	2.5530
2003	1.6477	1.8456	5.8882	1.2488	1.9364	24.9905	3.1373
2004	1.5005	1.9540	10.5363	1.1348	1.8947	22.5824	4.2510
2005	1.4539	1.8852	2.9728	1.0136	2.1364	22.4363	4.9177
2006	1.2649	1.8425	2.6221	0.9396	1.8351	20.8858	4.0036
2007	1.1472	1.7686	2.9281	0.9474	1.6655	19.8838	4.6025
2008	1.1169	1.7199	1.4157	0.7740	1.8789	16.2198	5.9950
2009	1.0626	1.8023	2.0341	0.8693	1.7139	15.5679	4.2850
2010	1.0981	2.0066	2.2353	0.8430	1.8080	13.7717	5.8361
2011	1.0513	2.0611	2.0741	0.6906	2.1061	10.7374	14.3681
2012	0.9765	2.1227	2.4285	0.6746	1.9731	10.9659	8.1275
2013	1.0563	2.3063	2.6343	0.7351	1.7385	11.7130	12.9587
2014	1.0250	2.5936	2.8737	0.8969	1.6160	11.8017	17.6467
2015	1.0208	3.1703	4.1916	1.4151	1.3055	10.7795	19.2160
2016	1.1419	3.3769	4.5759	1.3953	1.1803	10.3439	17.5002
2017	1.2312	3.2218	3.0380	1.2488	1.2500	8.1421	14.8031
2018	1.1364	2.8301	2.8783	1.0469	1.2836	6.6810	19.3180

Ano	País						
-	Malásia	Malta	Marrocos	Mianmar	Peru	Filipinas	Romênia
1995	1.6403	2.1824	2.5129	1.2969	2.8545	2.4615	1.1246
1996	1.6622	2.2283	2.6378	1.2520	2.3648	2.0222	1.0687
1997	1.6869	2.4120	2.4909	1.1760	2.1144	1.9044	1.0348
1998	1.7461	2.3345	2.2797	1.2813	1.9275	2.1973	1.1962
1999	1.8279	2.3141	1.6123	1.3350	1.8533	1.9009	1.0170
2000	2.3058	2.2444	2.5604	2.2624	1.7591	1.4973	1.1150
2001	2.0358	2.4060	2.6989	2.6912	1.7108	1.4393	0.9874
2002	1.7635	0.7368	2.9046	2.9829	1.6504	1.5886	0.9420
2003	2.0213	0.5080	4.0657	2.7478	1.6020	1.5457	0.9219
2004	2.0452	0.3484	3.1540	2.8203	1.5462	1.5633	1.0311
2005	2.2530	0.3568	2.4471	2.8193	1.4600	1.3200	1.0718
2006	2.3172	0.3623	0.8647	2.6623	1.3876	1.2702	1.0425
2007	2.2205	0.3950	0.7233	2.8285	1.2838	1.4505	1.0431
2008	2.4065	0.3718	0.5361	2.8501	1.2756	1.4302	1.1770
2009	1.9008	0.4849	0.9175	2.8351	1.5252	1.7973	1.2950
2010	1.9818	0.5349	0.7740	2.1400	1.4652	1.6368	1.7789
2011	2.1190	0.4875	0.9363	1.9413	1.4189	1.4827	1.5947
2012	2.2394	0.3500	0.6344	2.0467	1.5880	1.6226	1.3804
2013	2.2932	0.5751	0.6792	1.8639	1.5094	1.7764	1.6707
2014	2.6164	0.5578	0.7621	1.8429	1.5495	1.8359	2.1077
2015	1.9768	0.6133	1.6910	1.8171	1.5611	2.2025	2.1090
2016	1.7753	0.7070	4.7835	1.6779	1.6592	2.4105	2.3749
2017	1.8016	0.6299	4.9339	2.0144	1.7063	2.2899	2.3326
2018	1.8226	0.7068	4.2359	1.9387	1.6016	1.9342	2.1391

Ano	País						
-	Federação Russa	Arábia Saudita	Singapura	África do Sul	Taiwan	Tailândia	Tunísia
1995	1.9870	17.7185	0.5910	2.3569	1.0266	1.1539	2.8419
1996	2.2322	11.8011	0.6624	2.2367	0.9778	1.1146	2.7184
1997	2.2786	12.3999	0.5650	2.2641	0.9255	1.0965	2.6992
1998	2.5431	18.6337	0.6279	2.2037	0.9432	1.1418	2.4584
1999	3.0527	14.2441	0.5878	2.2203	0.9434	1.1036	2.6140
2000	3.4545	14.7144	0.4416	2.1938	0.8949	0.9972	3.0831
2001	3.1186	16.7210	0.4501	2.1120	0.9684	0.8627	2.7887
2002	2.9121	16.6694	0.4372	2.0838	0.9369	0.8591	2.9045
2003	3.0330	17.1618	0.4703	2.1183	0.9122	0.8400	3.0115
2004	3.1648	13.5512	0.4273	2.1727	0.8217	0.8056	3.3415
2005	3.5572	11.3818	0.3264	2.0766	0.7935	0.8019	4.0504
2006	3.5464	13.9103	0.3470	1.8985	0.7716	0.7106	5.6482
2007	3.3772	16.6625	0.4574	1.8721	0.7797	0.7333	6.7831
2008	3.7174	12.8391	0.3329	1.8370	0.7325	0.6882	8.7656
2009	2.8503	26.2749	0.4376	1.8585	0.8765	0.7378	5.2995
2010	2.9736	29.6038	0.4432	2.3197	0.6985	0.7123	5.6298
2011	3.5930	24.1841	0.3724	2.4039	0.6786	0.7450	6.5949
2012	3.5751	26.7276	0.3992	1.9965	0.6926	0.7380	2.4118
2013	3.0414	30.4591	0.4312	1.9901	0.7480	0.7694	2.0576
2014	2.9208	13.5862	0.4206	1.9773	0.7544	0.8003	1.6548
2015	2.6821	27.7529	0.6564	2.0909	0.8245	0.9237	1.5767
2016	2.4772	29.1887	0.8406	2.0487	0.7562	0.8873	1.6978
2017	2.4439	21.0640	0.6668	2.1918	0.6614	0.8815	1.3232
2018	2.8727	23.7791	0.5318	1.9659	0.4748	0.8455	1.0744

Ano	País	
-	Vietnã	Resto do mundo
1995	4.6320	2.3461
1996	4.9980	2.3716
1997	5.2597	2.4047
1998	5.3463	2.2309
1999	5.6466	2.3714
2000	5.4228	2.7457
2001	4.7124	2.5422
2002	4.2880	2.7361
2003	4.0062	2.8616
2004	3.9294	2.6974
2005	3.6143	2.8310
2006	3.3228	3.0467
2007	2.8447	2.7541
2008	2.2860	3.0094
2009	1.9208	2.5966
2010	1.9123	2.7391
2011	1.9324	2.9544
2012	1.7742	3.0839
2013	1.7946	2.8208
2014	1.7012	2.6857
2015	1.6204	2.2499
2016	1.5001	2.2275
2017	1.5330	2.2223
2018	1.4921	2.2753

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

APÊNDICE C - Estatísticas descritivas do EROI dos países entre 1995 e 2018

Ano	Estatísticas descritivas		
	Média	Mediana	Média Geométrica
-			
1995	3.405963	2.351942	2.592892
1996	3.297727	2.228342	2.443209
1997	3.390505	2.219725	2.441565
1998	3.663131	2.215691	2.614493
1999	3.461627	2.193889	2.458668
2000	3.071397	2.076534	2.195212
2001	3.314806	2.060641	2.230808
2002	3.157823	2.030319	2.184603
2003	3.29558	2.021269	2.189755
2004	3.195964	1.904541	2.137419
2005	2.793733	1.701164	1.911119
2006	2.656487	1.490255	1.782659
2007	2.648131	1.464112	1.760635
2008	2.481504	1.430167	1.654855
2009	2.756982	1.779747	1.825871
2010	2.842729	1.688123	1.792198
2011	2.846921	1.428781	1.728202
2012	2.751796	1.414956	1.637377
2013	2.92831	1.514228	1.715524
2014	2.845761	1.701162	1.792287
2015	3.493259	1.80813	2.082942
2016	3.834658	1.916217	2.274098
2017	3.199949	1.850792	2.087179
2018	3.134921	1.87802	1.964421

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

APÊNDICE D - EROI global observado e previsto

Ano	EROI global	
	Observado	Previsto
-	Observado	Previsto
1995	2.4465	-
1996	2.3024	-
1997	2.2994	-
1998	2.4312	-
1999	2.3178	-
2000	2.0182	-
2001	2.1376	-
2002	2.1324	-
2003	2.0287	-
2004	1.9339	-
2005	1.7916	-
2006	1.7245	-
2007	1.6540	-
2008	1.5598	-
2009	1.6515	-
2010	1.6014	-
2011	1.5319	-
2012	1.4995	-
2013	1.5183	-
2014	1.5211	-
2015	1.6191	-
2016	1.7314	-
2017	1.7169	-
2018	1.6940	1.6890
2019	-	1.6615
2020	-	1.6345
2021	-	1.6079
2022	-	1.5818
2023	-	1.5561
2024	-	1.5308
2025	-	1.5059
2026	-	1.4814
2027	-	1.4573
2028	-	1.4336

2029	-	1.4103
2030	-	1.3874
2031	-	1.3648
2032	-	1.3426
2033	-	1.3208
2034	-	1.2993
2035	-	1.2782
2036	-	1.2574
2037	-	1.2370
2038	-	1.2169
2039	-	1.1971
2040	-	1.1776
2041	-	1.1585
2042	-	1.1396
2043	-	1.1211
2044	-	1.1029
2045	-	1.0850
2046	-	1.0673
2047	-	1.0500
2048	-	1.0329
2049	-	1.0161

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.