

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

Iago Gomes Gonçalves¹
Ian Michael Trotter²

Resumo

Este estudo investigou os impactos do aumento do consumo de energia pelo setor energético na economia global. Os indicadores de retorno sobre o investimento em energia (EROI) foram calculados para países selecionados do banco de dados da OCDE e globalmente para o período de 1995 a 2018. Uma matriz de entrada-saída foi usada para identificar as entradas diretas e indiretas usadas pelo setor de energia na produção de energia. A série temporal do EROI global foi analisada e feita uma previsão até 2049. Os resultados indicaram que a maioria dos países apresentou valores de EROI baixos, com declínios graduais ao longo dos anos, assim como o EROI global. Essas estimativas sugerem que a produção atual de energia não é sustentável e que é necessário alocar mais insumos, principalmente energia, no setor energético para atender a demanda mínima da sociedade e manter o funcionamento do sistema econômico. A análise dos dados observados e a projeção para 2049 mostram a continuidade da tendência de queda do EROI. Em relação à produção total, projeta-se um aumento de 3,19% entre 2018 e 2049, indicando a necessidade de aumentar a produção econômica nessa proporção para atender à demanda de energia. Especificamente para o setor de energia, a produção total está projetada para aumentar em 25,16% entre 2018 e 2049. Isso significa que o setor de energia precisa aumentar sua produção em 25,16% para atender a demanda interna e manter o mesmo nível de produção da economia como um todo.

Palavras chave: EROI. Consumo de energia. Insumo-Produto.

Abstract

This study investigated the impacts of the increase in energy consumption by the energy sector on the global economy. Energy Return on Investment (EROI) indicators were calculated for selected countries from the OECD database and globally for the period 1995 to 2018. An input-output matrix was used to identify the direct and indirect inputs used by the energy sector in energy production. The time series of the global EROI was analyzed and a forecast was made up to 2049. The results indicated that most countries showed low EROI values, with gradual declines over the years, as did the global EROI. These estimates suggest that current energy production is not sustainable and that it is necessary to allocate more inputs, especially energy, in the energy sector to meet society's minimum demand and maintain the functioning of the economic system. Analysis of the observed data and the projection to 2049 showed a continuing downward trend in the EROI. Relative to total production, an increase of 3.19% is projected between 2018 and 2049, indicating the need to increase economic production by that proportion to meet energy demand. Specifically for the energy sector, total production is projected to increase by 25.16% between 2018 and 2049. This means that the energy sector needs to increase

¹ Doutorando em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa. E-mail: iago.g.goncalves@ufv.br.

² Doutor em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa. Professor Efetivo da Universidade Federal de Viçosa. E-mail: ian.trotter@ufv.br.

its production by 25.16% to meet domestic demand and maintain the same level of output as the economy as a whole.

Keywords: EROI. Energy consumption. Input-Output.

Área 9: Meio ambiente, recursos naturais e sustentabilidade.

Classificação JEL: O13, Q43, Q56.

1 INTRODUÇÃO

A energia é um fator fundamental para a prosperidade humana e é indissociável da atividade econômica. A adoção da Agenda 2030 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) dos países, a garantia de energia limpa, acessível e moderna para todas as pessoas até 2030 (UN GENERAL ASSEMBLY, 2015).

Conforme International Energy Outlook (2021), há sinais inconfundíveis de que uma nova economia energética está emergindo. 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 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 (DEFFEYES, 2006; 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.

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 e do Brasil.

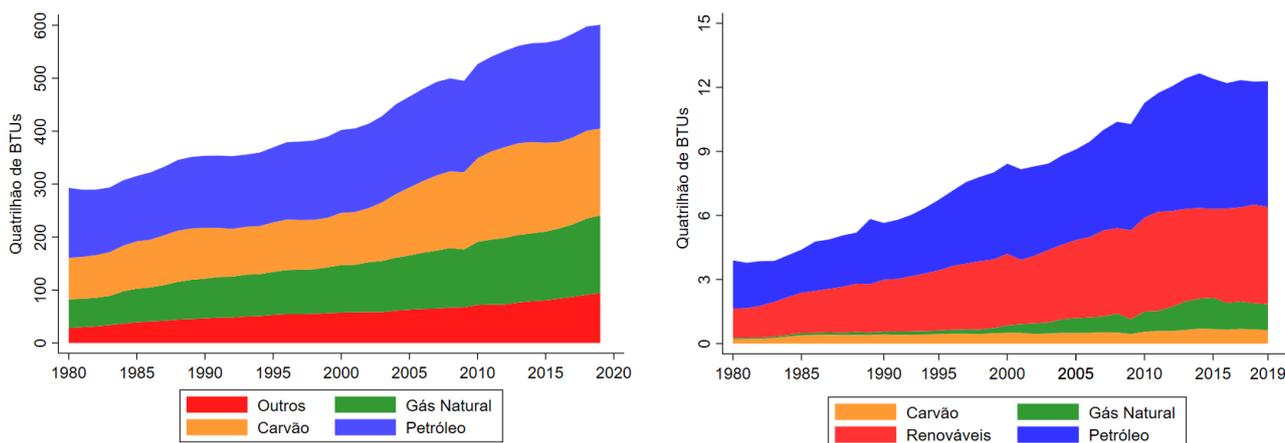


Figura 1 - Consumo mundial e brasileiro de energia em quadrilhão de BTUs entre 1980 e 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor com dados da U.S. Energy Information Administration (EIA).

É possível observar no gráfico à esquerda da 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 à proporção que tais combustíveis fósseis ocupam no consumo total e a tendência crescente de consumo. Constata-se que a tendência crescente de consumo de energia no Brasil ao longo das últimas décadas acompanhou a tendência mundial, como observado no gráfico a direita na figura 1. No Brasil, aproximadamente 45% da matriz energética é formada por fontes renováveis, o que é muito superior ao padrão encontrado em outros países, fazendo com que o setor energético do Brasil seja um dos mais sustentáveis em termos de emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2022).

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).

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. 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).

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 década. 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). 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 é essencial em análises de eficácia pela qual os recursos energéticos são explorados (HALL; LAMBERT; BALOGH, 2014).

Usualmente, o resultado do EROI 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.

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, 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. 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. Outro ponto de avanço deste estudo se refere a ampliação do horizonte temporal de análise, se dispondo 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 reduzido 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.

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, 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).

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.

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 nações foram estabelecidas utilizando recursos fósseis indiscriminadamente, mas que veem sua capacidade de desenvolvimento freada, sobretudo, pela alta dependência desses recursos. 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).

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).

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.

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).

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) 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.

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 estimaram 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 resultados mostraram que o uso indireto de energia representou, em média, 11% do consumo de energia entre 1995 e 2006. Considerando que houve uma tendência de queda do EROI no período analisado e se uma extrapolação da tendência foi apropriada, o EROI tende a cair para 1:1 em três décadas.

Brockway *et al.*, (2019) estimaram 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 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.

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. Destaca-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.

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.

3. METODOLOGIA

3.1. FONTE DOS DADOS

As tabelas de entradas e saídas 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. As informações financeiras estão 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), 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.

3.2. MODELO EMPÍRICO

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.

3.2.1. Calculando o EROI e Tendência

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. Conforme destaca Guilhoto (2011), os setores compram e vendem uns para os outros, interagindo diretamente com um número pequeno de setores, mas que 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.

As transações entre setores estão dispostas em uma matriz com n linhas e n colunas, chamada de transações interindustriais ou consumo intermediário, a qual fornece uma imagem da economia focada nas relações intersetoriais, normalmente identificada como matriz “z”. 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.

Miller e Blair (2009) destacam que a matriz inversa de Leontief ou matriz de requisitos totais, $(I - A)^{-1} = B$, elucidada a dependência de cada uma das saídas brutas dos valores de cada uma das demandas finais. Portanto, se estabelece como a equação básica do modelo de insumo-produto, em que 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 .

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: $\Delta x = (I - A)^{-1} \Delta y$, 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, 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 , 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. Isso significa que, o aumento da demanda por energia pelo próprio setor de energia também demanda insumos de outros setores em uma cadeia infinita.

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. 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 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.

A definição de energia 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:

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

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

Em seguida, como o objetivo na segunda 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 determinística. Desse modo, ao considerar que não há componentes sazonais e cíclicos na série, como o objetivo é modelar a tendência pelo método de regressão, ajusta-se Y_t em função do tempo, de modo que: $Y_t = f(t) + \varepsilon_t$, em que Y_t indica a série de interesse $f(t)$ assume a forma do polinômio que melhor se ajusta a série e ε_t é o ruído branco.

3.2.2. Previsão e Impactos Econômicos

Em terceiro lugar, a previsão é um elemento importante da análise econômica, considerado para muitos, o mais importante. 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. O Método de Holt, que é uma extensão do modelo de Suavização Exponencial Simples (SES), permitiu a previsão dos dados considerando a existência de tendência na série, mas sem sazonalidade (HOLT, 1957).

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.

Para 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.

O valor dos parâmetros α e β podem ser definidos de maneira subjetiva, 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).

Quanto mais próximo de 1 o valor de α , maior é o peso atribuído às observações mais recentes, o que é considerado aprendizado rápido. 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. O valor ótimo atribuído a β é obtido por meio da minimização de erros no conjunto de treinamento.

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:

$$\Delta z = B * diag(u) \quad (2)$$

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.

4. RESULTADOS

A descrição dos resultados foi dividida em quatro etapas. 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.

Aplicando os dados da matriz insumo-produto à equação (1), foi calculado o EROI dos países, suas estatísticas descritivas e também o EROI global para o período 1995-2018. A figura 2 apresenta as séries de tempo das estatísticas descritivas do EROI dos países de 1995 a 2018:

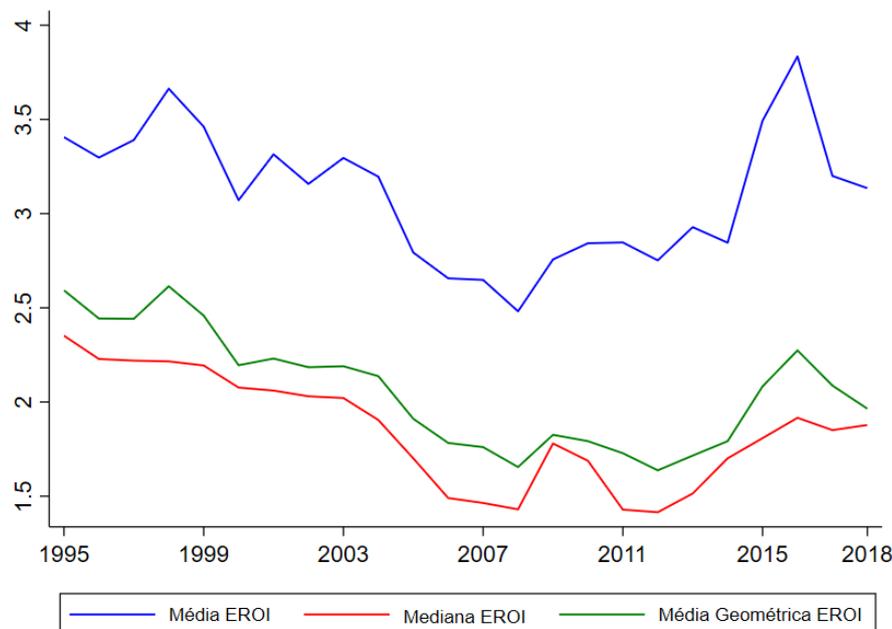


Figura 2 - Média aritmética, mediana e média geométrica do EROI dos países.

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

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. 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 3 exibe a média calculada do EROI de cada país ao longo dos anos:

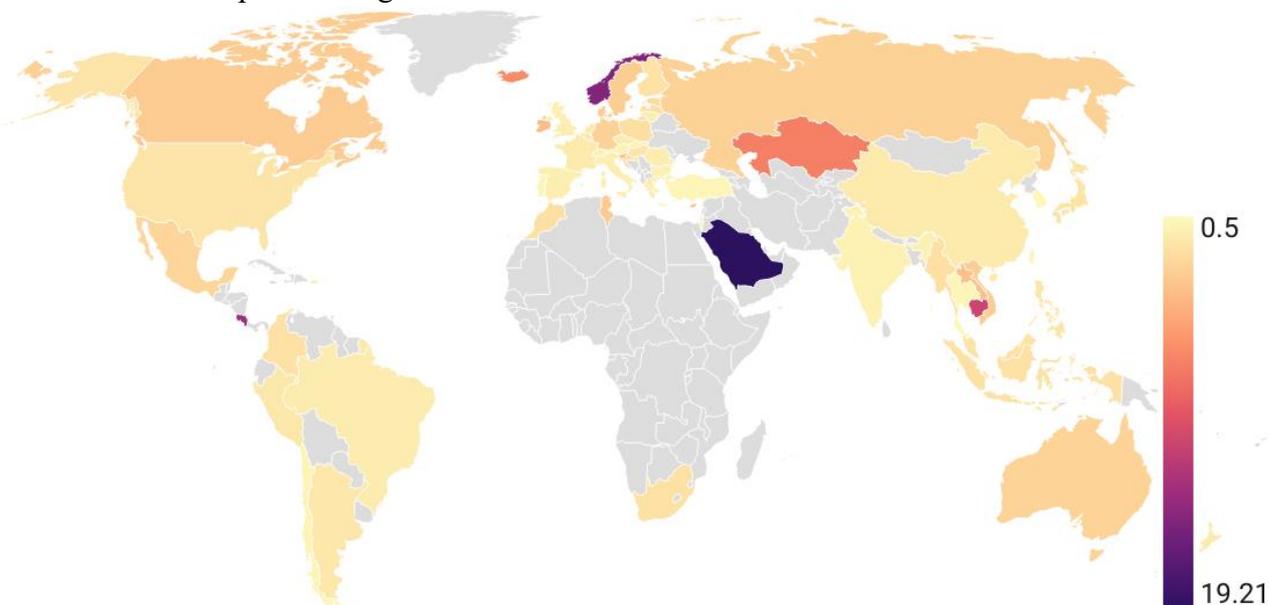


Figura 3 - Média do EROI dos países entre 1995 e 2018.
Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

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 Rica. Para o caso brasileiro, a figura 4 destaca a evolução do EROI entre 1995 e 2018:

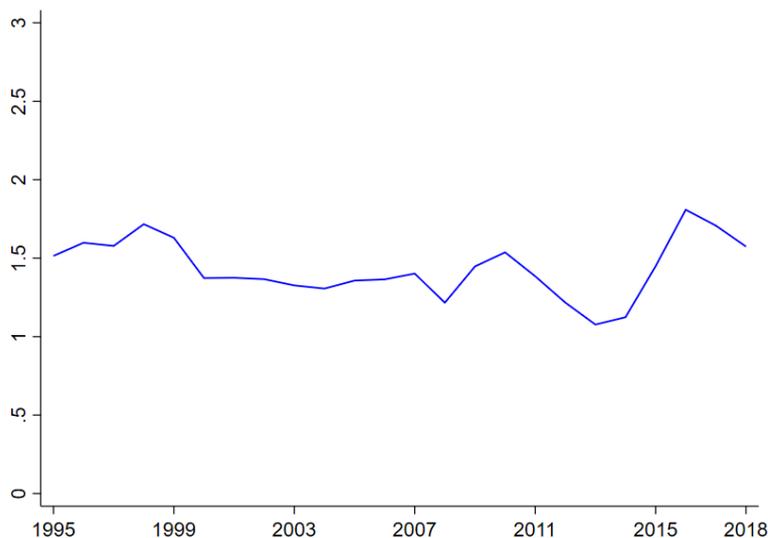


Figura 4 - EROI do Brasil entre 1995 e 2018.
Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

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 2. 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 literatura, 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.

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.

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 5 apresenta o comportamento do EROI global ao longo do tempo:

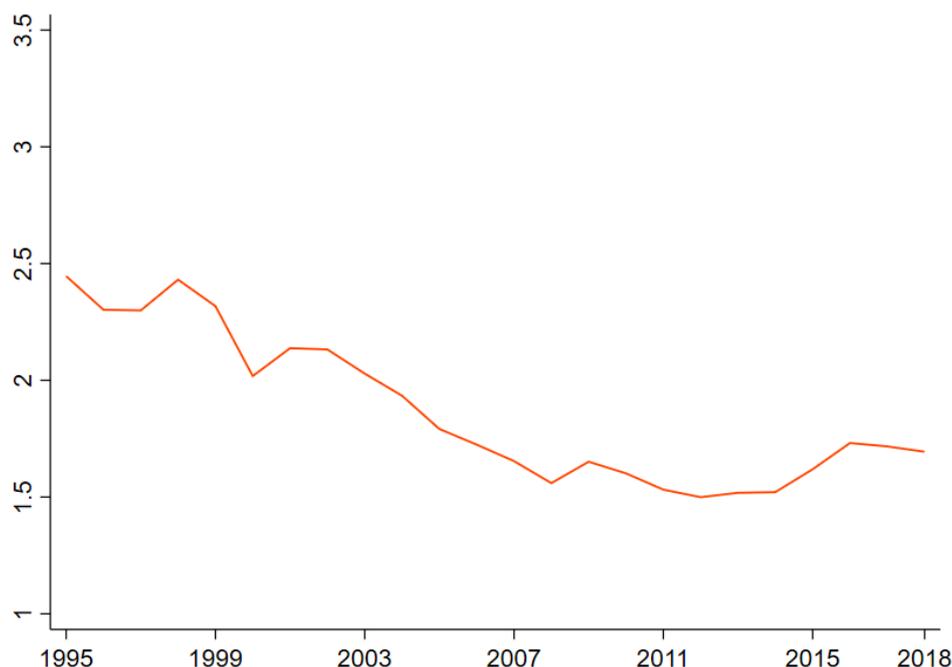


Figura 5 - EROI global entre 1980 e 2018.

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

De acordo com a figura 5, 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. 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.

Ecclesia (2022) constata que 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.

Em seguida, a análise de tendência e as etapas posteriores contemplaram apenas a série do EROI global. 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 6 mostra a série de tempo do EROI global com a transformação logarítmica e a linha de tendência linear:

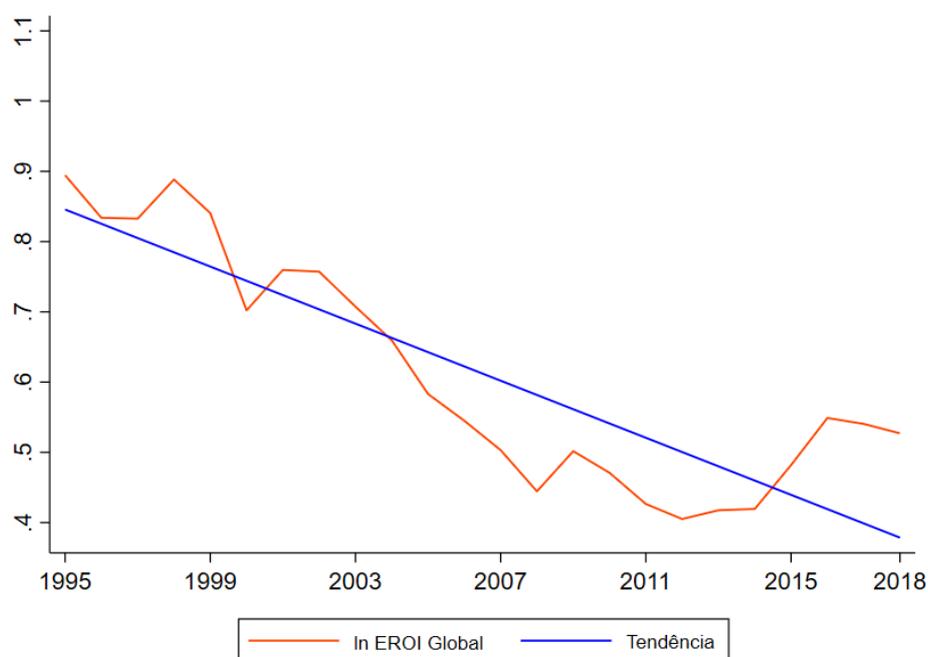


Figura 6 - Logaritmo natural do EROI global entre 1995 e 2018.

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

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 logaritmizados. Entretanto, como a inversa da função logarítmica 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 logarítmica. Isso porque, para calcular os impactos do EROI global na matriz insumo produto, é preciso que a transformação nos dados seja invertida. Gráficamente, ao combinar os gráficos do EROI global observados com as estimativas da previsão, é possível ter um panorama visual dos resultados obtidos. Assim, a figura 7 mostra o gráfico do EROI observado e previsto:

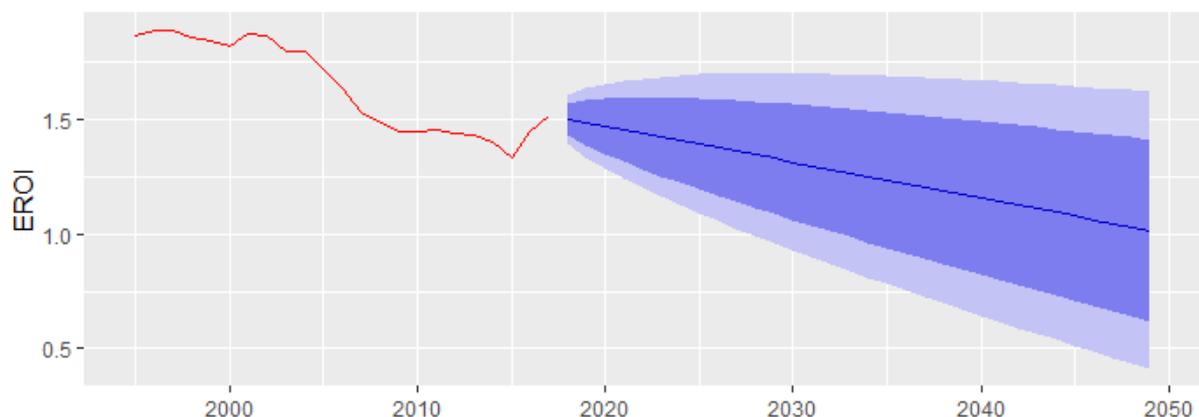


Figura 7 - EROI global observado e previsto.

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

Ao observar a figura 7, alguns apontamentos são importantes. Os valores referentes ao EROI global observados estão destacados em vermelho e percebe-se a existência de tendência decrescente. 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 à frente e os expressa de acordo com a tendência notada nas observações amostrais. Entretanto, como as previsões formam uma linha reta ao longo do tempo, as pequenas flutuações na série de EROI global não são captadas, 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.

Por último, 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 (2) 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 trilhões, enquanto a produção total de 2018 obtida foi de cerca de US\$165,3 trilhões. A figura 8 ilustra a produção total (em US\$) de 2018 e 2049:

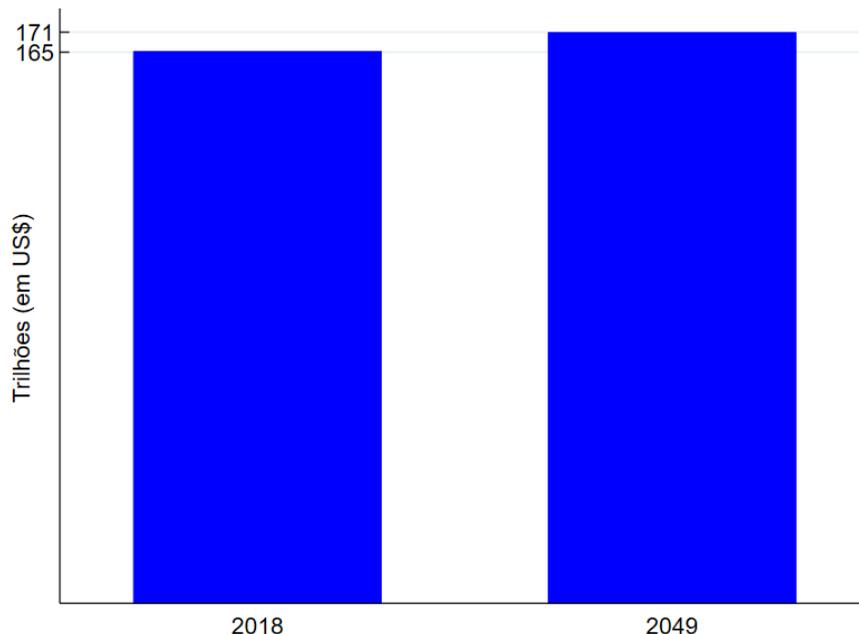


Figura 8 - Produto total global (em trilhões de US\$) em 2018 e 2049.
 Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos resultados da pesquisa.

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. Considerando a previsão de uma redução significativa do EROI, atingindo 1.0161 em 2049, é necessário que a produção total da economia aumente 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 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 previsto e a necessidade de aumento da produção interna do setor de energia, que impacta 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, incluindo o Brasil, 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.

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. 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 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.

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

Este estudo 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 respectivos objetivos. 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.

Sendo assim, 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.

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.

A fim de 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

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- COURT, V.; FIZAINE, F. Long-term estimates of the energy-return-on-investment (EROI) of coal, oil, and gas global productions. **Ecological Economics**, 138, 145-159. 2017.
- 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. 2011.
- DEFNEY, Kenneth S. **Beyond oil: The view from Hubbert's peak**. Hill and Wang, 2006.
- 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.

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.

ENERDATA. WORLD ENERGY PRIMARY PRODUCTION | ENERGY PRODUCTION. 2021. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-production.html>. Acesso em: 31 mar. 2023.

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.

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.

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.

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.

GUILHOTO, J. J. M. Análise de insumo-produto: teoria e fundamentos. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

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.

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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

KING, C. W.; HALL, C. A. S. Relating Financial and Energy Return on Investment. **Sustainability**, v. 3, n. 10, p. 1810–1832, out. 2011.

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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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. 2023.

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 2023.

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 2023.