

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – ICSA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS**

Luiza Senra Duarte

**COMPLEXIDADE ECONÔMICA E ENERGIAS RENOVÁVEIS: UMA ANÁLISE
ECONOMÉTRICA MUNDIAL**

**Mariana
2024**

**COMPLEXIDADE ECONÔMICA E ENERGIAS RENOVÁVEIS: UMA ANÁLISE
ECONOMÉTRICA MUNDIAL**

Luiza Senra Duarte

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Ferraz

**Mariana
2024**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D812c Duarte, Luiza Senra.
Complexidade econômica e energias renováveis [manuscrito]: uma
análise econométrica mundial. / Luiza Senra Duarte. - 2024.
33 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Ferraz.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Sociais Aplicadas. Graduação em Ciências
Econômicas .

1. Sustentabilidade. 2. Economia. 3. Energia renovável. I. Ferraz,
Diogo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 330

Bibliotecário(a) Responsável: Luciana Matias Felício Soares - SIAPE: 1.648.092



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luiza Senra Duarte

Complexidade Econômica e Energias Renováveis: uma análise econométrica mundial

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Economia

Aprovada em 17 de junho de 2024

Membros da banca

Doutor - Diogo Ferraz - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Francisco Horácio Pereira de Oliveira - Universidade Federal de Ouro Preto
Eng. - Leandro Moreira Pinto - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Diogo Ferraz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/06/2024



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Ferraz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/06/2024, às 20:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0723658** e o código CRC **F107A395**.

RESUMO

A preocupação com as mudanças climáticas e a busca por alternativas sustentáveis têm impulsionado a transição para fontes de energias renováveis. O Acordo de Paris é frequentemente mencionado como marco importante para o avanço do desenvolvimento sustentável em vários países. Nesse contexto, as energias renováveis, como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa são alternativas promissoras para reduzir as emissões de CO₂ e mitigar os impactos ambientais. A Complexidade Econômica, representada pelo Índice de Complexidade Econômica (ECI), emerge como um fator relevante na transição para fontes de energia limpa e renovável. Neste sentido, o objetivo desta monografia é investigar o impacto da complexidade econômica na adoção de energias renováveis, com foco nas fontes solar, hidrelétrica, biomassa e eólica, em países ao redor do mundo. Para atingir o objetivo, foram utilizados modelos econométricos para dados em painel (i.e., *Driscoll-Kraay*), baseados em uma função Cobb-Douglas. O principal resultado foi o impacto positivo e estatisticamente significativo da complexidade econômica sobre a energia renovável. Além disso, a complexidade impactou positivamente os diferentes tipos de energia renovável (i.e., solar, eólica, hidrelétrica e geotérmica). Este resultado é importante para a formulação de políticas públicas, a fim de promover a promoção de energias renováveis e o desenvolvimento sustentável por meio da sofisticação da matriz produtiva dos países.

Palavras-Chave: Energias renováveis. Economia. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Concern about climate change and the search for sustainable alternatives have driven the transition to renewable energy sources. The Paris Agreement is often mentioned as an important milestone for advancing sustainable development in several countries. In this context, renewable energies, such as solar, wind, hydroelectric and biomass are promising alternatives for reducing CO₂ emissions and mitigating environmental impacts. Economic Complexity, represented by the Economic Complexity Index (ECI), emerges as a relevant factor in the transition to clean and renewable energy sources. In this sense, the objective of this monograph is to investigate the impact of economic complexity on the adoption of renewable energy, focusing on solar, hydroelectric, biomass and wind sources, in countries around the world. To achieve the objective, econometric models for panel data were used (i.e., Driscoll-Kraay), based on a Cobb-Douglas function. The main result was the positive and statistically significant impact of economic complexity on renewable energy. Furthermore, complexity positively impacted different types of renewable energy (i.e., solar, wind, hydroelectric, and geothermal). This result is important for the formulation of public policies, in order to promote the promotion of renewable energy and sustainable development through the sophistication of the countries' productive matrix.

Keywords: Renewable energies. Economy. Sustainability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
	2.2 Energias Renováveis.....	7
	2.3 Complexidade econômica e desenvolvimento sustentável.....	10
3	MÉTODO.....	16
	3.1 Modelo Econométricos	18
4	RESULTADOS	20
5	CONCLUSÃO.....	29
6	REFERÊNCIAS:	30

1 INTRODUÇÃO

Diversos países enfrentam o duplo desafio de crescimento econômico sem impactar o meio ambiente. Em consequência disso, a preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de encontrar alternativas sustentáveis têm impulsionado a transição para fontes de energias renováveis. Conferências internacionais foram realizadas com o objetivo de conter a degradação ambiental, bem como promover a adoção de medidas sustentáveis. Neste sentido o Acordo de Paris, firmado em 2015 e implementado em 2016, foi um marco importante para a promoção do desenvolvimento sustentável em 195 países signatários. Em outros termos, este acordo representa um compromisso mundial sobre as alterações climáticas e prevê metas para a redução de emissão de gases do efeito estufa (UNCC, 2019).

Os gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), têm a capacidade de absorver e reemitir radiação infravermelha, o que contribui para o aumento da temperatura média do planeta. Este fenômeno é conhecido na literatura especializada como aquecimento global (IPCC, 2018). A utilização intensiva de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, tem sido apontada como um dos principais impulsionadores do aumento das emissões de CO₂, o que resulta em impactos negativos no meio ambiente (Lotz *et al.*, 2018; Dogan, 2019).

Estudos, como o de Gozgor e Can (2016), analisaram o impacto das emissões de CO₂ decorrentes da produção de bens e consumo de energia. Segundo os autores, os principais determinantes desta emissão são a geração de energia e o crescimento econômico. Nesse contexto, a busca por soluções sustentáveis no setor energético tem se destacado, impulsionada pela preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. As energias renováveis, provenientes de fontes naturais como a energia solar, eólica, hidrelétrica, biomassa e geotérmica, têm se mostrado promissoras na redução das emissões de CO₂ e na mitigação dos impactos ambientais (IRENA, 2020).

Nesse cenário, a complexidade econômica emerge como um fator relevante na transição para fontes de energia limpa e renovável. Representada pelo Índice de Complexidade Econômica (ECI), essa medida reflete a diversidade e a sofisticação da estrutura produtiva de um país (Hidalgo *et al.*, 2011). Estudos têm destacado o papel da

complexidade econômica na transição para fontes de energia mais limpa e renovável, indicando que os países com uma estrutura produtiva mais diversificada e sofisticada possuem maior capacidade de adotar e desenvolver tecnologias de energias limpas (Shahzad *et al.*, 2020a).

Neste contexto, a complexidade econômica emerge como um fator crucial na transição energética, a fim de promover fontes de energias limpas e renováveis. O objetivo deste estudo é investigar o impacto da complexidade econômica na adoção de energias renováveis, com foco nas fontes solar, hidrelétrica, biomassa e eólica, em países ao redor do mundo. Além disso, propõe-se os seguintes objetivos específicos: analisar a relação entre complexidade econômica e a transição para energias renováveis; avaliar o papel das políticas públicas na promoção de energias sustentáveis. Esta pesquisa visa contribuir para o campo da sustentabilidade e da economia, fornecendo uma compreensão sobre o papel da complexidade econômica na transição para fontes que influenciam a adoção de energias limpas. Espera-se, assim, que os resultados desta pesquisa possam colaborar para a promoção de um futuro mais sustentável.

Além desta introdução, esta pesquisa está dividida em 3 seções principais. A próxima seção se dedicará a uma revisão bibliográfica, explorando as relações entre energias renováveis e complexidade econômica. Analisaremos estudos relevantes que abordam a interseção desses temas, destacando a importância da diversificação econômica na transição para fontes de energia limpa. Na seção seguinte, dedicada à metodologia, na qual detalharemos a abordagem escolhida para analisar o impacto da complexidade na adoção de energias renováveis durante o período de 2015 a 2021, em uma amostra mundial, abordando nações de diversas regiões geográficas e que reportam informações sobre geração de energia renovável. Posteriormente, serão apresentados os resultados da análise, fornecendo insights sobre a relação entre complexidade econômica e a adoção de energias renováveis ao longo do período estudado.

Por fim, na seção de conclusão, consolidamos as descobertas da revisão bibliográfica e dos métodos aplicados. Além disso, discutimos as implicações práticas dos resultados, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre a relação entre complexidade econômica e a transição para energias renováveis. Espera-se que este estudo forneça insights para formuladores de políticas, pesquisadores e demais interessados no desenvolvimento sustentável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento sustentável é um desafio para diversos países do mundo. Dentro desse panorama, a promoção de energia renovável emerge como um dos pilares fundamentais para catalisar essa sustentabilidade. Nesse contexto, o presente trabalho tem como foco a relação entre a geração de energias renováveis e a sofisticação da estrutura produtiva (Ceretta; Sari; Ceretta, 2020).

O arcabouço teórico deste estudo se orienta em torno da compreensão da energia renovável como peça-chave para a sustentabilidade, e destaca o papel da Complexidade econômica nesse cenário. A próxima seção se dedica a elucidar o conceito de energias renováveis. Posteriormente, será apresentado o conceito de complexidade econômica, visando evidenciar a relevância desses elementos para o processo de desenvolvimento sustentável. A compreensão integrada desses conceitos é vital para a construção de estratégias e políticas que impulsionam efetivamente a transição para um modelo mais sustentável e resiliente (Corrêa; Cario, 2021).

2.2 Energias Renováveis

A classificação das fontes de energia em renovável e não renovável é uma distinção fundamental. As fontes de energia não renovável caracterizam-se pela sua reposição natural leva muitos séculos ou milênios sob condições muito peculiares, tornando praticamente inviável devido aos altos custos envolvidos. Vale ressaltar que o termo “não renováveis” não significa que essas fontes não se renovam na natureza, mas sim que elas não podem ser substituídas em escalas de tempo humano. Em contrapartida, a energia renovável é extraída de fontes naturais, não emite gases tóxicos e se regenera. Estas fontes são derivadas de fontes naturais inesgotáveis dentro de uma escala de tempo (Goldemberg; Lucon 2007).

O uso de energias renováveis está crescendo, evidenciando sua importância na mitigação das alternativas climáticas. Isso se deve ao papel crucial que desempenham na redução das emissões de dióxido de carbono, uma vez que não emitem gases durante a geração de energia. (colocar gráfico de emissão de CO₂). As energias renováveis estão

gradualmente ganhando espaço, substituindo as tradicionais fontes fósseis e iniciando uma transição em direção a um sistema energético mais sustentável (ANEEL, 2008). Este movimento é crucial para enfrentar a urgência climática, o relatório “World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C” da IRENA destaca a urgência de acelerar a implementação de fontes de energia e combustíveis renováveis.

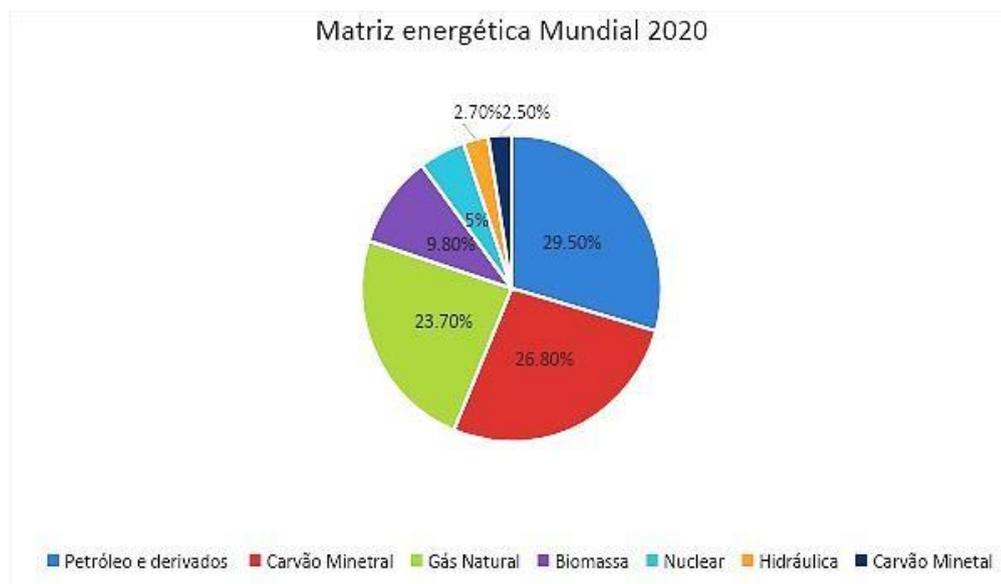
Diversas fontes de energia renováveis desempenham um papel significativo na matriz energética global. A energia solar, por exemplo, é obtida a partir da conversão da radiação solar em energia elétrica ou energia térmica por meio de painéis solares. Ao analisar a capacidade total acumulada da fonte solar, países como China, Estados Unidos e Japão lideram o ranking mundial. A energia eólica, que é capturada a partir do vento por meio de turbinas eólicas, a fim de gerar eletricidade, é amplamente adotada em nações como Dinamarca, Alemanha e Estados Unidos, que possuem parques eólicos em diversas regiões (Corrêa; Cario, 2021).

A energia hidrelétrica é gerada a partir do movimento da água em rios ou quedas d'água, utilizando turbinas hidráulicas para gerar eletricidade. Além disso, a energia geotérmica é obtida através do calor proveniente do interior da Terra, capturado em reservatórios subterrâneos de água ou vapor, e utilizada para acionar turbinas conectadas a geradores elétricos, convertendo a energia térmica em eletricidade. Finalmente, a energia de biomassa, derivada de materiais orgânicos como resíduos agrícolas, florestais e de processamento de biomassa, é produzida por meio de processos de combustão, sendo utilizada para a geração de eletricidade, calor ou biocombustíveis. Essas fontes renováveis desempenham um papel crucial no panorama energético mundial, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e promovendo a sustentabilidade ambiental (Ceretta; Sari; Ceretta, 2020).

Estudos realizados por organizações como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), a Associação Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008) e a Agência Internacional de Energias (IEA, 2021) destacam a importância da substituição das fontes de energia não renovável pelas renováveis. Conforme o Relatório de Avaliação do IPCC de 2021, a temperatura média global da Terra aumentou aproximadamente 1,1 grau Celsius desde o período pré-industrial (IPCC, 2021). Essa elevação da temperatura é atribuída à queima de combustíveis fósseis, a qual é a principal causa do aumento do acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera, o que contribui para

o aquecimento global e as mudanças climáticas. No Gráfico 1 é possível observar a matriz energética mundial.

Figura 1 Matriz energética mundial



Fonte: IEA (2020).

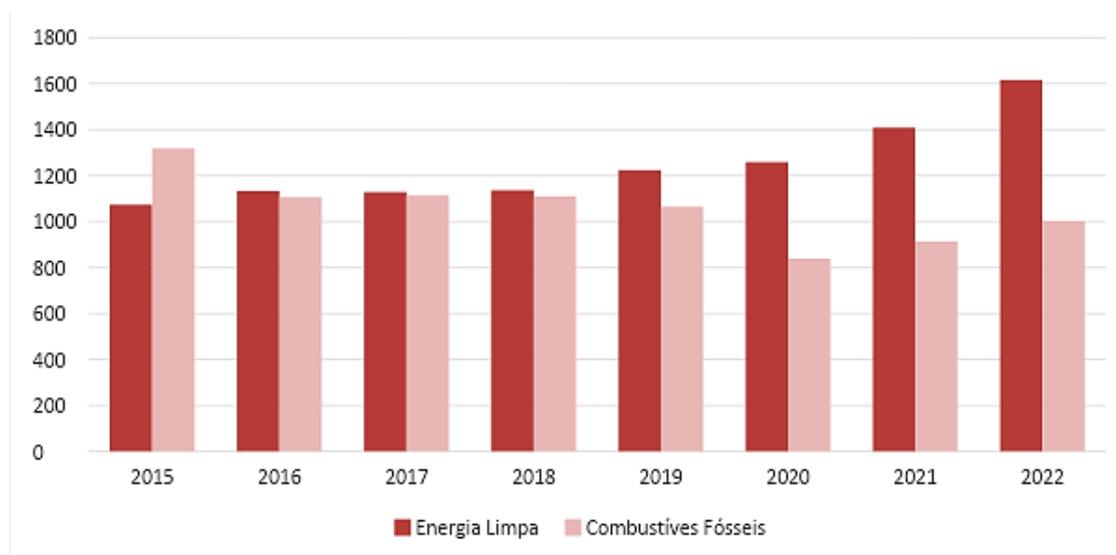
Com base na análise da Figura 1 apresentado, é possível afirmar que na matriz energética mundial é predominante composta por petróleo e seus derivados, representando 29.50% do total, seguidos pelo carvão mineral com 26.80% e o gás natural com 23.80%. Estas constituem as principais fontes de energia na matriz global. Em contrapartida, fontes como biomassa (9.80%), nuclear (5%), hidráulica (2,70%) e outras fontes (2,50%) ocupam uma parcela minoritária na composição da matriz energética.

Neste sentido, ao substituir os combustíveis fósseis pelas energias renováveis, é possível limitar as emissões de gases de efeito estufa, o que contribui para mitigar as consequências das mudanças climáticas (IPCC, 2014). Além disso, a adoção de energias renováveis promove a diversificação da matriz energética, tornando o sistema energético mais resiliente e seguro (IRENA, 2021). O aproveitamento correto das fontes renováveis é um excelente modo de substituir as “energias sujas” e evitar danos ao planeta.

Essa transição para as energias renováveis é impulsionada pelo avanço tecnológico e pelo compromisso global com a sustentabilidade (IRENA, 2020). Países como Alemanha, China, Estados Unidos, Dinamarca e muitos outros estão investindo em projetos de energia renovável, visando reduzir sua dependência de fontes não renováveis e

promover uma economia mais limpa e sustentável (REN21).

Figura 2 Investimento global em energia limpa e em combustíveis fósseis



Fonte: IEA (2020)

O Figura 2, extraído do site da Agência Internacional de Energia (EIA), oferece uma visão abrangente do investimento global em energias limpas e combustíveis fósseis no período de 2015 a 2022. A coluna que representa o investimento em energia limpa revela uma tendência de crescimento. Contrapondo esse crescimento, ao observar a coluna referente ao investimento em combustíveis fósseis, nota-se uma redução nos últimos 5 anos.

Essa observação revela uma clara inversão nos padrões de investimento globais, indicando uma mudança na alocação de recursos. O aumento no investimento em energias limpas destaca uma crescente priorização da transição para fontes mais sustentáveis. A dinâmica em que o investimento em energia limpa cresce enquanto o investimento em combustíveis fósseis diminui aponta para uma transformação nos valores e estratégias de investimento em busca de soluções mais alinhadas com a sustentabilidade (Ceretta; Sari; Ceretta, 2020).

2.3 Complexidade econômica e desenvolvimento sustentável

A complexidade econômica desempenha papel crucial na análise do desenvolvimento econômico, abrangendo diversos aspectos relacionados ao conhecimento

disponível e à capacidade produtiva de um país. A Complexidade Econômica indica que a sofisticação da produção de um país pode ser medida pela análise dos produtos exportados e pela diversidade dos produtos. Isto porque, a diversificação representa as habilidades necessárias para produzir bens tecnológicos. Hidalgo *et al.*, (2011) ao compreender a complexidade econômica permite avaliar o impacto do conhecimento e da capacidade de produção sobre o desenvolvimento de um país.

Hidalgo *et al.*, (2011) destacam que a complexidade de uma economia está relacionada à multiplicidade de conhecimento na rede de interações entre várias áreas produtivas da economia. Países complexos são aqueles que geram bens de alta tecnologia como, por exemplo, aviões, carros, maquinário, produtos farmacêuticos, turbinas, painéis solares, entre outros. Desta forma, quanto maior tecnologia adotada nos produtos, maior será o índice de Complexidade Econômica. Neste sentido, diversas economias emergentes (i.e., Brasil, Índia, Rússia, África do Sul, entre outras) buscam a diversificação econômica por meio de políticas industriais. Esta política tem como objetivo reduzir a dependência da matriz econômica dos produtos com baixo valor agregado (i.e., commodities agrícolas ou minerais).

Uma forma de representar a Complexidade Econômica ocorre por meio do Índice de Complexidade Econômica (ECI), o qual é apresentado como um indicador que reflete a capacidade de um país produzir bens tecnologicamente avançados. Este índice avalia tanto a ubiquidade quanto a diversificação dos produtos presentes na pauta exportadora de um país. Considerando o nível de produção, o Produto Interno Bruto (PIB) também quanto e quais tipos de produtos os países são aptos a exportar, o ECI oferece uma perspectiva abrangente sobre a complexidade da estrutura produtiva (Ceretta; Sari; Ceretta, 2020).

Hidalgo *et al.*, (2011) utiliza o Índice de Vantagem Comparativa revelada (RCA) apresentado por Balassa (1965) para calcular a eficiência de cada país ao gerar um bem determinado:

$$RCA_{ept} = \frac{x_{ept}}{\sum_p^y y^p x_{ept}} \div \frac{\sum_e^y y^e x_{ept}}{\sum_e^y y^e \sum_p^y y^p x_{ept}}$$

Em que x retrata as exportações do bem p pelo país e no tempo t . Se $RCA > 1$, a economia é vista como uma exportadora efetiva do bem em questão, indicando uma

vantagem competitiva na produção e no comércio desse bem em comparação com outras

economias. Por outro lado, se o $RCA < 1$, representa que a economia não possui uma vantagem comparativa significativa na produção e exportação desse bem. A análise do RCA pode oferecer insights valiosos sobre a competitividade de um país em determinados setores e suas capacidades de exportação.

As abordagens de Hidalgo *et al.*, (2011) para medir a complexidade dos produtos e das economias baseiam-se nas informações presentes nos índices de RCA (Índice de Vantagem Comparativa Revelada) de cada produto em cada país, para calcular índices de diversificação dos países e ubiquidade dos produtos.

O número de produtos com RCA exportados por um país reflete no grau de diversificação de sua estrutura produtiva, quanto maior a variedade de produtos com RCA exportados, maior a diversificação de economia desse país. A ubiquidade da produção de cada exportado por diversos países, sua produção é considerada mais comum. Formalmente:

$$Diversidade = \sum_p M_{ep} \quad (2)$$

$$Ubiquidade = \sum_p M_{ep} \quad (3)$$

Em que $M_{ep} = 1$, caso o país e exporta o produto p com RCA, e o caso contrário se $M_{ep} = 0$.

Hidalgo *et al.*, (2011) evidenciaram uma correlação negativa entre ubiquidade e diversificação, o que sugere que países com maior diversificação também a produzem produtos menos ubíquos. Um país com baixa diversificação que produz bens pouco ubíquos, pode ser considerado mais sofisticado do que um país com diversificação semelhante, mas que produz bens mais ubíquos. Combinando ambas medidas é possível obter uma análise mais exata da sofisticação do produto. Os índices de Complexidade do Produto (ICP) e Complexidade Econômica (ECI) são calculados considerando a diversidade e ubiquidade. Eles oferecem uma medida da complexidade da estrutura produtiva de um país. Formalmente:

$$ICP = \frac{1}{Ubiquidade} \sum M_{EP} * ECI_{e,N-1}$$

$$ICE = \frac{1}{Diversidade} \sum M_{ep} * ICO_{p,N-1}$$

De modo que, N indica o número de conexões entre os indicadores iniciais de diversificação e ubiquidade, visto que, ICO é o indicador de complexidade do produto e ECI é o indicador de complexidade econômica. Diversos estudos têm demonstrado a relação entre a complexidade da estrutura produtiva com crescimento econômico (Hidalgo *et al.*, 2011), desenvolvimento humano (Hartmann, 2017) e o desenvolvimento sustentável.

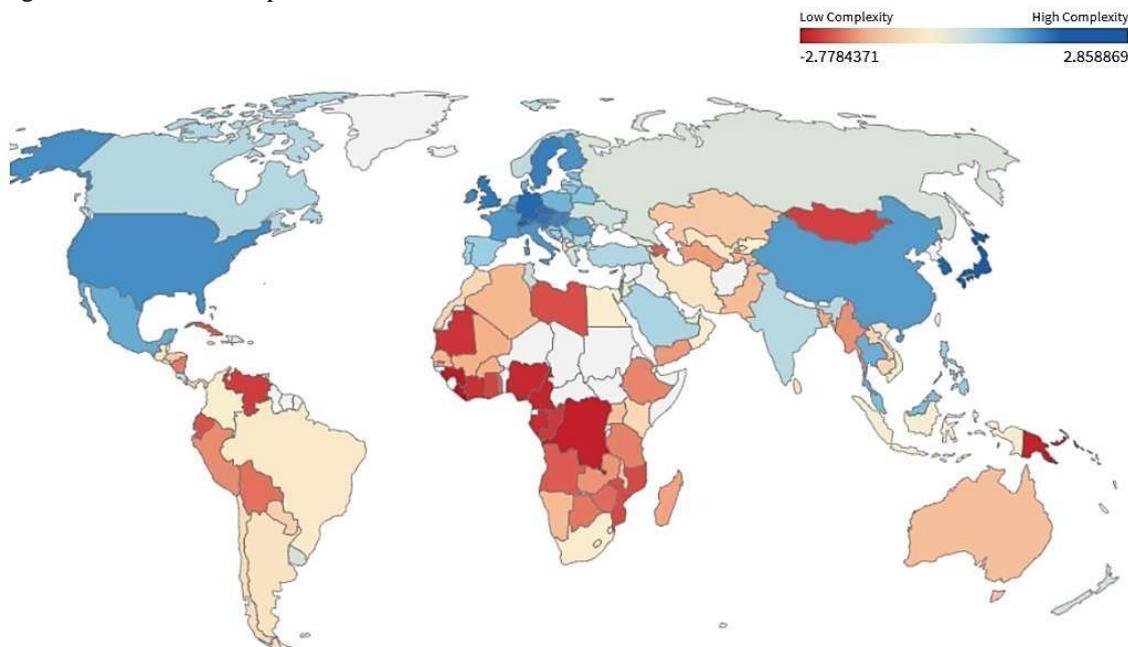
A complexidade econômica emerge como um fator relevante na explicação do crescimento econômico, uma vez que a sofisticação na produção e a acumulação da habilidade em um país criam condições propícias para enfrentar crises internacionais. Além disso, o acúmulo de habilidade contribui para melhores condições no mercado de trabalho, resultando em maior renda e redução da desigualdade social (Hartmann, 2017).

Estudos recentes avançam na compreensão da importância da complexidade econômica para o desenvolvimento sustentável. Um exemplo notável é o trabalho de Can e Gozgor (2016b), que incorporaram o Índice de Complexidade Econômica como um determinante das emissões de CO₂. Segundo esses autores, a complexidade econômica pode influenciar diretamente a sustentabilidade ambiental. A explicação reside no fato de que a complexidade econômica indica o desenvolvimento de setores mais complexos e diversificados, capaz de criar produtos e serviços ambientais amigáveis.

Ao reconhecer a interligação entre complexidade econômica e sustentabilidade, Can e Gozgor (2016a) destacam a importância de orientar o desenvolvimento econômico em direção a setores mais inovadores e ecologicamente sustentáveis. Esta abordagem não só promove a diversificação econômica, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais, alinhando o crescimento econômico com princípios de preservação ambiental.

A Figura 3 oferece uma representação visual abrangente do Índice de Complexidade Econômica (ECI) em escala global. A escolha da paleta de cores evidencia aspectos fundamentais nas estruturas produtivas dos países, proporcionando uma clara demarcação da sofisticação econômica. Países representados em tons de azul indicam uma estrutura produtiva mais avançada. Em contraste, os países marcados em vermelho evidenciam uma estrutura produtiva menos complexa, sendo mais propensos a exportar commodities agrícolas, minerais, entre outros. A presença de países com coloração verde-claro indica uma estrutura produtiva de disparidades econômicas globais.

Figura 3 - Índice de Complexidade Econômica



Fonte: Atlas of Economic Complexity (2023)

De acordo com Shahzad *et al.*, (2020b), há relação entre a diversidade de produtos de exportação e as emissões de dióxido de carbono em economias em desenvolvimento e desenvolvidas. Em geral, uma maior diversificação de produtos pode levar a mudanças no padrão de emissão de carbono de um país. Por exemplo, se um país diversifica sua produção para setores mais intensivos em emissões de carbono, como indústria pesada, pode resultar em um aumento geral nas emissões de CO₂. Por outro lado, se diversificação incluir setores mais limpos, isso poderia reduzir as emissões de CO₂.

Desta forma, a Complexidade Económica surge como um indicador valioso para avaliar o avanço em direção a metas sustentáveis. Esta revisão de literatura destaca a relevância da sofisticação da estrutura produtiva no desenvolvimento econômico, especialmente diante dos atuais desafios de degradação ambiental e da crescente demanda por energia. Nesse contexto desafiado, destaca-se a urgência em desenvolver abordagens explicativas capazes de abordar a complexa interação entre produção, consumo de recursos e impactos ambientais, buscando estratégias inovadoras para enfrentar os desafios presentes e futuros (Ceretta; Sari; Ceretta, 2020).

3 MÉTODO

Este capítulo apresenta os detalhes sobre a base de dados utilizada e os procedimentos metodológicos desta monografia. A pesquisa se fundamentou na análise de índices provenientes de uma amostra mundial. Essa abordagem permitiu uma análise ampla e global, a fim de analisar nações de diversas regiões geográficas que reportaram informações sobre geração de energia renovável. A delimitação temporal desta pesquisa tem como objetivo capturar eventos, tendências e analisar mudanças ao longo do período abordado. As variáveis utilizadas como base no modelo econométrico foram extraídas das bases de dados do Banco Mundial (2021), Atlas de complexidade econômica (2021) e EIA (Energy Information Administration).

O período submetido a análise abrange os anos de 2015 a 2021. A região e o período examinado foram escolhidos a partir da disponibilidade de dados encontrados. A escolha desse intervalo temporal é fundamentada não apenas na crescente preocupação global, mas também no aumento do interesse acadêmico em questões ambientais.

O modelo econométrico foi utilizado como ferramenta analítica para este estudo, que é respaldado pela natureza interdisciplinar, utilizando métodos estatísticos para analisar relações econômicas. A econometria é uma disciplina que visa estudar a aplicação da Matemática e dos métodos estatísticos à análise dos dados (Tinbergen, 1974). Neste contexto, a econometria se destaca como uma abordagem sólida e abrangente para investigar a interação entre complexidade econômica e a adoção de energias renováveis, proporcionando, assim, uma base metodológica consistente para a condução deste estudo.

O embasamento teórico para esta pesquisa se fundamenta nas contribuições de Gujarati e Porter (2011) e Wooldridge (2009), proporcionando um alicerce conceitual sólido para a aplicação de métodos econométricos avançados. A escolha metodológica adotada neste trabalho consiste no uso de dados em painel, permitindo a análise da mesma unidade ao longo do tempo em um corte transversal.

As variáveis utilizadas neste trabalho podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1- Variáveis utilizadas na análise

Variáveis	Descrição	Fonte
Energia Renovável	Energia produzida por fontes renováveis.	<i>Energy Information Administration</i> (EIA, 2023)
Energia Solar	Energia do sol convertida em eletricidade.	<i>Energy Information Administration</i> (EIA, 2023)
Energia Eólica	Energia do vento transformada em eletricidade.	<i>Energy Information Administration</i> (EIA, 2023)
Energia Hidrelétrica	Energia da água em movimento convertida em eletricidade.	<i>Energy Information Administration</i> (EIA, 2023)
Energia de Biomassa	Energia de materiais orgânicos renováveis.	<i>Energy Information Administration</i> (EIA, 2023)
Energia Geotérmica	Energia obtida a partir do calor do interior da Terra, convertida em eletricidade.	<i>Energy Information Administration</i> (EIA, 2023)
Índice de Complexidade Econômica	Índice que mostra a Complexidade Econômica atribuída aos países de acordo com a cesta de produtos que ele produz.	<i>Atlas of Economic Complexity</i> (2023)
Consumo de Eletricidade	Consumo médio de eletricidade de um país.	<i>Energy Information Administration</i> (EIA, 2023)
Investimento Estrangeiro	Fluxo de investimento estrangeiro no país.	<i>World Bank</i> (2023)
PIB per capita	Produtos e serviços divididos pela população.	<i>World Bank</i> (2023)
Consumo de combustíveis Fósseis	Consumo médio de combustíveis fósseis.	<i>Energy Information Administration</i> (EIA, 2023)

Fonte: Elaborado pela autora

Nesta monografia, a variável dependente é a energia renovável, que engloba fontes de energias regeneráveis, tais como solar, eólica, hidrelétrica, geotérmica e de biomassa, caracterizadas por não se esgotarem com o uso. As análises aqui conduzidas examinam o papel dessas fontes na matriz energética, considerando sua importância crescente na busca por alternativas sustentáveis e de baixa emissão de carbono. A variável de interesse foi a sofisticação de estrutura econômica, que utilizou como proxy o Índice de Complexidade Econômica (*Economic Complexity Index – ECI*). Esta variável avalia a diversificação e sofisticação dos produtos exportados por um país. Além disso, o consumo de eletricidade, o investimento estrangeiro, o PIB per capita e o consumo de combustíveis fósseis também são considerados como variáveis de controle e são analisados em relação ao papel das energias renováveis no desenvolvimento econômico e social.

O objetivo deste trabalho consiste em realizar uma análise das variáveis, buscando compreender as teses que mensuram a influência da complexidade econômica sobre a produção de energia renovável. Portanto, propõe um modelo econométrico, em que a complexidade econômica é adotada como *proxy* para a estrutura produtiva, enquanto a energia renovável é a variável dependente. Além disso, outras variáveis foram utilizadas como controle no modelo, a saber, investimento estrangeiro, consumo de combustíveis fósseis e o consumo de eletricidade.

Esta abordagem oferece uma perspectiva temporal abrangente, possibilitando a análise da evolução de uma unidade ao longo de diferentes períodos. Além disso, apresenta vantagens práticas, tais como maiores variabilidades nos dados, redução de colinearidade entre variáveis, incremento da eficiência estatística e proporciona maior grau de liberdade para análise estatística mais robustas, conforme destacado por Gujarati e Porter (2011). A metodologia empregada busca explorar a diversidade e complexidade de dados, seguindo uma estrutura que atenda às exigências particulares deste estudo.

3.1 Modelo Econométricos

O método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) para dados empilhados é adotado como abordagem inicial. Essa estratégia envolve o empilhamento das observações, tratando os dados como uma entidade única e desconsiderando suas características de corte transversal e séries temporais, conforme descrito por Gujarati e Porter (2011). No entanto, é crucial reconhecer os desafios inerentes a esse modelo. Ao tratar todas as observações de maneira uniforme, o MQO pode negligenciar a heterogeneidade inerente aos dados.

A heterogeneidade, que se refere às diferenças sistemáticas entre diferentes unidades transversais, como países ou empresas, pode ser obscurecida por este método. Isso, por sua vez, pode resultar em estimativas enviesadas e inconsistentes (Gujarati e Porter, 2011). Apesar dessas limitações, a opção pela utilização do modelo de regressão por MQO para dados empilhados visa quantificar o fenômeno em estudo, avaliar a capacidade do modelo proposto e explorar possível presença de multicolinearidade.

Em seguida, a técnica de Mínimos Quadrados com variáveis dummy para Efeitos Fixos (MQVD) foi utilizada. Esta é uma abordagem econômica utilizada para lidar com a heterogeneidade entre unidades de corte transversal em um conjunto de dados em painel.

Nesse modelo, cada unidade de corte transversal é associada a uma variável dummy específica, representando um intercepto fixo para cada variável independente analisada. A inclusão dessas variáveis dummy permite capturar as particularidades individuais de cada unidade, controlando-as ao longo do tempo.

Nos dados do painel, a mesma unidade transversal é monitorada ao longo do tempo, incorporando tanto uma dimensão espacial quanto temporal, como destacado por Greene (2008). A análise do painel pode ser feita por meio de dois modelos básicos: o modelo de efeitos fixos e aleatórios. Conforme Torres-Reyna (2007) os modelos de efeitos fixos buscam controlar as variáveis que variam entre as unidades transversais, ou seja, os valores dos interceptos para cada regressão. Essa abordagem contribui para um controle mais preciso das especificidades individuais de cada unidade ao longo do tempo, aprimorando a robustez da análise estatística.

O modelo geral de efeitos fixos é:

$$Y_{it} = \beta_1 X_{it} + \beta_2 W_{it} + \alpha_i + u_{it}$$

Sendo, α_i é o intercepto para cada país, y_{it} é a variável dependente, x_{it} representa uma variável independente, β_1 é o coeficiente da variável independente e u_{it} é o termo de erro, sendo i o país e t o tempo (ano).

O modelo de efeitos aleatórios, embora compartilhe as premissas fundamentais do modelo de efeitos fixos, se diferencia pela consideração dos efeitos individuais como variáveis aleatórias. Isso implica que a interceptação varia de maneira aleatória entre os indivíduos, enquanto permanece constante ao longo do tempo. Além disso, os parâmetros de resposta são mantidos constantes para todos os indivíduos e em todos os períodos, conforme discutido por Greene (2008).

Desta forma tem-se o modelo de efeito aleatório:

$$Y_{it} = \beta_{1i} + \beta_2 X_{it} + \beta_3 W_{it} + \omega_{it}$$

Sedo que:

$$\omega_{it} = \alpha_i + \mu_{it}$$

Onde ω_{it} é formado por α_i elemento de corte transversal dos indivíduos e u_{it} que é o elemento da série temporal e do corte transversal (Gujarati e Poter, 2011). Com isso assume que os erros individuais não estão correlacionados entre si e não correlacionados entre outras unidades de corte transversal e das séries temporais.

Em seguida passamos pelo Teste de Hausman (1978), o qual é uma ferramenta

estatística utiliza na econometria, para análise de dados em painel, para decidir entre modelos fixos (EF) e efeitos aleatórios (EA), é crucial para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos. O objetivo é verificar se os estimadores de efeitos aleatórios são consistentes em relação aos efeitos fixos, considerando a presença de correlação entre efeitos individuais e as variáveis explanatórias. (resultado do teste)

Após coletar e analisar as variáveis, a partir de uma matriz de correlação e regressão linear. Com a intenção de buscar estimativas que meçam a influência da complexidade sobre a produção de energia, com isso é utilizado um modelo econométrico que analise esta relação. Para isso, procedeu-se à função Cobb-Douglas adaptada para o problema de pesquisa.

$$\ln y_{\text{produção de energia}} = \beta_{0i} + \beta_1 \ln(\text{complexidade})_{it} + \beta_2 \ln(\text{IED})_{it} \\ + \beta_3 \ln(\text{consumo de eletricidade})_{it} + \beta_4 \ln(\text{combustível fóssil})_{it} + u_{it}$$

Em que: $y_{\text{produção de energia}}$ é a produção de energia renovável. β_{0i} é o intercepto do modelo específico it para cada unidade. As variáveis independentes incluem o logaritmo natural do índice de complexidade econômica ($\ln(\text{complexidade})_{it}$), do fluxo do investimento direto ($\ln(\text{IED})_{it}$), do consumo de eletricidade ($\ln(\text{consumo de eletricidade})_{it}$), do uso de combustível fóssil ($\ln(\text{combustível fóssil})_{it}$), e u_{it} é o termo de erro.

Devido à não linearidade e com o intuito de eliminar qualquer viés do modelo e suavizar a variância das variáveis, aplicamos o modelo *log-log*, como sugerido por Wooldridge (2009). Essa escolha estratégica não apenas contribui para eliminar viés, mas também oferece a vantagem de interpretar os coeficientes como elasticidades. Este modelo econométrico foi desenvolvido para oferecer estimativas e interpretações significativas no que se refere à relação entre complexidade econômica e a produção de energia.

4 RESULTADOS

Nesse tópico, serão apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo econômico desenvolvido nesta monografia. Foi utilizada uma amostra de países, abrangendo um período de sete anos, 2015 a 2021. As variáveis foram analisadas para investigar o impacto da complexidade econômica sobre a energia renovável. Este capítulo oferece uma análise detalhada dos resultados, destacando padrões, tendências e relações

significativas entre variáveis estudadas.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise estatística descritiva realizada sobre o conjunto de dados. Essa análise proporciona uma visão geral dos dados, ajudando a entender sua distribuição, centralidade e variabilidade. Ao analisar os resultados, observamos uma ampla variação no nível de cada variável entre os países estudados. Observa-se que, para a energia renovável, a média é de 65645,72 unidades, com desvio padrão de 201169,8, indicando a variação nos níveis de energia renovável entre os países estudados. Em contraste, a energia solar mostra uma distribuição mais concentrada em torno da média de 6421,423 unidades, com desvio padrão de 22016,68. A energia eólica apresenta uma variação significativa, com média de 16812,32 unidades e desvio padrão de 52430,71. Similarmente, a energia hidrelétrica exibe uma ampla variação, com média de 46770,12 unidades, desvio padrão de 143406,2.

Tabela 2- Estatística Descritiva

Variável	Obs	Média	Desvio Padrão.	Min	Max
Energia Renovável	630	65645,72	201169.8	0	2095909
Energia Solar	556	6421.423	22016.68	1	260500
Energia Eólica	487	16812,32	52430.71	1	466474
Energia Hidrelétrica	554	46770,12	143406.2	12	1355209
Biocombustíveis	458	6836.648	14218.88	1	111100
Energia Geotérmica	117	4761.197	5513.015	1	18831
ECI	609	0.309409	0.997279	-1.86	2.55
Consumo de Eletricidade	616	275.0425	862.7678	0.2	8259.1
Investimento Estrangeiro	616	1.93E+10	6.24E+10	0	5.11E+11
Combustível Fóssil	518	1694.929	4586.575	7.3	36318.71

Fonte: Elaborado pela autora

No caso da bioenergia, observa-se uma variação moderada, com média de 6836,648 unidades, desvio padrão de 14218,88. A energia geotérmica mostra uma variação baixa, com média de 4761,197 unidades, desvio padrão de 5513,015. Os índices de complexidade econômica revelam uma variação considerável, com médias de 0,309409 e desvio padrão de 0,997279. Em contrapartida, o consumo de eletricidade, investimento estrangeiro, mostram uma variação considerável, enquanto o consumo de combustíveis fósseis mostra uma amplitude considerável.

A Tabela 3 apresenta a matriz de correlação das variáveis do modelo econométrico. Destaca-se que a variável Energia Renovável possui correlação de 21,37% com o Índice de Complexidade Econômica. Esta correlação é estatisticamente significativa ao nível de

1%. Note ainda que a variável Energia Solar possui correlação de 29,40% com o Índice de Complexidade Econômica. Esta correlação é estatisticamente significativa ao nível de 1%. Da mesma forma, a variável Energia Eólica possui correlação de 24,71% com Índice de Complexidade Econômica. Esta correlação é estatisticamente significativa ao nível de 1%. Note ainda que a variável Energia Hidrelétrica possui correlação de 14,76% com Índice de Complexidade Econômica. Esta correlação é estatisticamente significativa ao nível de 1%. Note ainda que a variável Energia Biocombustível possui correlação positiva de 33,14% com Índice de Complexidade Econômica.

Tabela 3- Matriz de Correlação

Correlação	Renovável	Solar	Eólica	Hidrelét.	Biocomb.	Geot.	ECI	Eletric.	IDE	Fóssil
Renovável	1									
Solar	0.7776*	1								
Eólica	0.8387*	0.88*	1							
Hidrelét.	0.8946*	0.72*	0.764*	1						
Biocomb.	0.7593*	0.69*	0.783*	0.6758*	1					
Geot.	0.0624	0.048	0.218	-0.0657	0.1668	1				
ECI	0.2137*	0.29*	0.247*	0.1476*	0.3314*	-	1			
Eletric.	0.8914*	0.86*	0.927*	0.8716*	0.7547*	0.1702	0.2370*	1		
IDE	0.5568*	0.52*	0.662*	0.4525*	0.5991*	0.354*	0.2761*	0.6490*	1	
Fóssil	0.8661*	0.83*	0.903*	0.8543*	0.7356*	0.1814	0.1901*	0.9923*	0.6354*	1

Fonte: Elaborado pela Autora

Os resultados econométricos para a Energia Renovável no mundo, conforme demonstrados, revelam *insights* relevantes sobre os determinantes da transição energética em nível global. A Tabela 4 revela que o modelo obteve R^2 igual a 0,573, ou seja, a variabilidade das variáveis explicativas explica 57,3% da variabilidade da energia renovável. Ademais, o teste F foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. Note que o Índice de Complexidade Econômica foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. O ECI impactou positivamente a energia renovável nos países. Em outros termos, o aumento de 1% na complexidade econômica aumenta em 14,85% a energia renovável nos países analisados. Desta forma, a complexidade econômica é um determinante relevante para explicar o aumento da participação da energia renovável nos países.

Tabela 4 - Resultados Econométricos para a Energia Renovável

VARIÁVEIS	Energia Renovável			
	OLS	FE	RE	DK - Autoc.
LN_eci100	14.85** (6.274)	-61.97*** (13.63)	-40.84*** (12.18)	14.85*** (1.803)
LN_ Consumo Eletricidade	2.555*** (0.196)	-1.220*** (0.246)	0.526*** (0.165)	2.555*** (0.103)
LN_ Combustível Fóssil	-1.612*** (0.174)	0.194 (0.125)	0.0953 (0.127)	-1.612*** (0.121)
LN_ Investimento Estrangeiro	0.107 (0.370)	-0.129 (0.208)	-0.151 (0.231)	0.107 (0.431)
Constante	-63.43** (30.21)	303.2*** (62.71)	199.0*** (56.22)	-63.43*** (8.360)
Observação	492	492	492	492
R ²	0.573	0.123		0.573
Number of cod		71	71	
Company FE		YES	NO	
Year FE		YES	NO	YES
Number of groups				71
Country FE				YES

Fonte: Elaborado pela autora

Robust standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Note ainda que o consumo de energia elétrica foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. O aumento de 1% no consumo de energia elétrica aumenta em 2,555% a energia renovável nos países analisados. Por outro lado, o consumo de energia fóssil apresentou um impacto negativo significativo ao nível de 1%, indicando que é inversamente proporcional. Isso sugere que um aumento de 1% no consumo fóssil reduz em 1,612% a energia renovável.

A Tabela 5 mostra que o modelo apresentado obteve R² igual a 0,526, ou seja, a variabilidade das variáveis explicativas explica 52,6% da variabilidade da energia solar. Ademais, o teste F foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. Note que o Índice de Complexidade Econômica foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. O ECI impactou positivamente a energia solar nos países. Em outros termos, o aumento de 1% na complexidade econômica aumenta em 82,06% a energia solar nos países analisados. Desta forma, a complexidade econômica é um determinante relevante para explicar o aumento da participação da energia renovável nos países.

Tabela 5- Resultados Econométricos para a Energia Solar

VARIÁVEIS	Energia Solar			
	OLS	FE	RE	DK - Autoc.
LN_ECI100	82.06*** (8.865)	31.93 (39.47)	70.97*** (19.20)	82.06*** (7.009)
LN Consumo de Eletricidade	1.396*** (0.214)	5.094*** (0.716)	1.824*** (0.284)	1.396*** (0.194)
LN Combustível Fóssil	-0.374* (0.209)	-0.639* (0.333)	-0.681*** (0.257)	-0.374 (0.254)
LN Investimento Estrangeiro	0.389 (0.569)	0.490 (0.553)	0.491 (0.555)	0.389 (0.293)
Constante	-386.5*** (44.41)	-173.6 (181.7)	-338.2*** (89.15)	-386.5*** (27.74)
Observations	457	457	457	457
R ²	0.526	0.128		0.526
Number of cod		68	68	
Company FE		YES	NO	
Year FE		YES	NO	YES
Number of groups				68
Country FE				YES

Fonte: Elaborado pela autora
 Robust standard errors in parentheses
 *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Note ainda que o consumo de energia elétrica foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. O aumento de 1% no consumo de energia elétrica aumenta em 1,396% a energia solar nos países analisados. Por outro lado, o consumo de energia fóssil apresentou um impacto negativo não significativo.

A Tabela 6 mostra que o modelo apresentado obteve R² igual a 0,386, ou seja, a variabilidade das variáveis explicativas explica 38,6% da variabilidade da energia eólica. Ademais, o teste F foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. Note que o Índice de Complexidade Econômica foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. O ECI impactou positivamente a energia renovável nos países. Em outros termos, o aumento de 1% na complexidade econômica aumenta em 63,11% a energia eólica nos países analisados. Desta forma, a complexidade econômica é um determinante relevante para explicar o aumento da participação da energia renovável nos países.

Tabela 6 - Resultados Econométricos para a Energia Eólica

VARIÁVEIS	Energia Eólica			
	OLS	FE	RE	DK - Autoc.
LN_ECI100	63.11*** (12.18)	-38.26* (23.20)	6.612 (18.37)	63.11*** (5.903)
LN_Consumo de Eletricidade	1.274*** (0.211)	2.391*** (0.373)	1.485*** (0.226)	1.274*** (0.0563)
LN_Combustível Fossil	-0.436** (0.214)	-0.0979 (0.179)	-0.257 (0.172)	-0.436*** (0.0913)
LN_Investimento Estrangeiro	2.652** (1.126)	0.221 (0.296)	0.236 (0.300)	2.652*** (0.582)
Constante	-358.3*** (58.41)	167.4 (106.7)	-34.71 (84.69)	-358.3*** (27.32)
Observations	428	428	428	428
R ²	0.386	0.109		0.386
Number of cod		62	62	
Company FE		YES	NO	
Year FE		YES	NO	YES
Number of groups				62
Country FE				YES

Fonte: Elaborado pela autora

Robust standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Note ainda que o consumo de energia elétrica foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. O aumento de 1% no consumo de energia elétrica aumenta em 1,274% a energia renovável nos países analisados. Por outro lado, o consumo de energia fóssil apresentou um impacto negativo significativo ao nível de 1%, indicando que é inversamente proporcional. Isso sugere que um aumento de 1% no consumo fóssil reduz em 0,436% a energia renovável.

A Tabela 7 mostra que o modelo apresentado obteve R² igual a 0,523, ou seja, a variabilidade das variáveis explicativas explica 52,3% da variabilidade da energia eólica. Ademais, o teste F foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. Note que o Índice de Complexidade Econômica foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. O ECI impactou negativamente a energia hidrelétrica nos países. Em outros termos, o aumento de 1% na complexidade econômica diminui em 38,50% a energia hidrelétrica nos países analisados. Desta forma, a complexidade econômica é um determinante relevante para explicar o aumento da participação da energia hidrelétrica nos países.

Tabela 7- Resultados Econométricos para a Energia Hidrelétrica

VARIÁVEIS	Energia Hidrelétrica			
	OLS	FE	RE	DK - Autoc.
LN_ECI100	-38.50*** (8.308)	-23.27*** (8.174)	-26.55*** (7.813)	-38.50*** (1.830)
LN_Consumo de Eletricidade	2.434*** (0.223)	0.474*** (0.135)	0.749*** (0.111)	2.434*** (0.157)
LN_Combustível Fossil	-1.400*** (0.187)	-0.0432 (0.0680)	-0.0448 (0.0676)	-1.400*** (0.127)
LN_Investimento Estrangeiro	0.501 (1.042)	-0.0597 (0.113)	-0.0570 (0.115)	0.501 (0.989)
Constante	170.5*** (44.07)	116.1*** (37.57)	129.8*** (35.96)	170.5*** (25.00)
Observations	451	451	451	451
R ²	0.523	0.047		0.523
Number of cod		66	66	
Company FE		YES	NO	
Year FE		YES	NO	YES
Number of groups				66
Country FE				YES

Fonte: Elaborado pela autora

Robust standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Note ainda que o consumo de energia elétrica foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. O aumento de 1% no consumo de energia elétrica aumenta em 2,434% a energia hidrelétrica nos países analisados. Por outro lado, o consumo de energia fóssil apresentou um impacto negativo significativo ao nível de 1%, indicando que é inversamente proporcional. Isso sugere que um aumento de 1% no consumo fóssil reduz em 1,40% a energia renovável.

A Tabela 8 mostra que o modelo apresentado obteve R² igual a 0,394, ou seja, a variabilidade das variáveis explicativas explica 39,4% da variabilidade dos biocombustíveis. Ademais, o teste F foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. Note que o Índice de Complexidade Econômica foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. O ECI impactou positivamente nos biocombustíveis nos países. Em outros termos, o aumento de 1% na complexidade econômica diminui em 81,48% os biocombustíveis nos países analisados. Desta forma, a complexidade econômica é um determinante relevante para explicar o aumento da participação dos biocombustíveis nos países.

Tabela 8- Resultados Econométricos para Biocombustíveis

VARIÁVEIS	Biocombustíveis			
	OLS	FE	RE	DK - Autoc.
LN_ECI100	81.48*** (11.23)	17.33 (26.42)	48.29** (19.53)	81.48*** (7.341)
LN_Consumo de Eletricidade	0.836*** (0.251)	1.489*** (0.428)	1.074*** (0.216)	0.836*** (0.0540)
LN_Combustível Fossil	-0.163 (0.256)	-0.222 (0.190)	-0.274 (0.175)	-0.163** (0.0520)
LN_Investimento Estrangeiro	0.977* (0.516)	0.377 (0.348)	0.372 (0.346)	0.977*** (0.199)
Constante	-397.7*** (54.65)	-88.32 (121.5)	-228.8** (89.83)	-397.7*** (31.18)
Observations	383	383	383	383
R ²	0.394	0.041		0.394
Number of cod		57	57	
Company FE		YES	NO	
Year FE		YES	NO	YES
Number of groups				57
Country FE				YES

Fonte: Elaborado pela autora

Robust standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Note ainda que o consumo de energia elétrica foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. O aumento de 1% no consumo de energia elétrica aumenta em 0,836% os biocombustíveis nos países analisados. Por outro lado, o consumo de energia fóssil apresentou um impacto negativo significativo ao nível de 1%, indicando que é inversamente proporcional. Isso sugere que um aumento de 1% no consumo fóssil reduz em 0,163% de biocombustível.

A Tabela 9 mostra que o modelo apresentado obteve R² igual a 0,071, ou seja, a variabilidade das variáveis explicativas explica 7,1% da variabilidade de energia geotérmica. Ademais, o teste F foi estatisticamente significativo ao nível de 1%. Note que o Índice de Complexidade Econômica foi estatisticamente significativo ao nível de 5%. O ECI impactou positivamente nos biocombustíveis nos países. Em outros termos, o aumento de 5% na complexidade econômica diminuiu em 47,10% da energia geotérmica nos países analisados. Desta forma, a complexidade econômica é um determinante relevante para

explicar o aumento da participação da energia geotérmica nos países.

Tabela 9- Resultados Econométricos para a Energia Geotérmica

VARIÁVEIS	Energia Geotérmica			
	OLS	FE	RE	DK - Autoc.
LN_ECI100	47.10 (43.19)	-91.49 (61.93)	-59.52 (51.72)	47.10** (16.54)
LN_Consumo de Eletricidade	-0.776 (0.783)	1.069 (0.823)	0.721* (0.431)	-0.776 (0.505)
LN_Combustivel Fossil	1.144* (0.674)	-0.000761 (0.161)	-0.0106 (0.158)	1.144** (0.464)
LN_Investimento Estrangeiro	-2.120 (2.677)	-1.201 (0.779)	-1.228 (0.762)	-2.120 (1.595)
Constante	-157.3 (215.3)	455.2 (288.0)	310.3 (239.9)	-157.3 (93.95)
Observations	110	110	110	110
R ²	0.071	0.055		0.071
Number of cod		17	17	
Company FE		YES	NO	
Year FE		YES	NO	YES
Number of groups				17
Country FE				YES

Fonte: Elaborado pela autora

Robust standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Note ainda que o consumo de energia fóssil apresentou um impacto positivo significativo ao nível de 5%. Isso sugere que um aumento de 5% no consumo fóssil aumenta em 1,144% a energia geotérmica.

Em resumo, os modelos econométricos demonstraram que a Complexidade Econômica é um importante preditor da energia renovável nos países. Em outros termos, a sofisticação da estrutura produtiva pode ser utilizada como estratégia de desenvolvimento sustentável, a fim de promover a transição energética dos países. Países com uma matriz produtiva tecnológica são capazes de aumentar a participação da energia renovável em detrimento dos combustíveis fósseis.

A Tabela 10 resume os coeficientes R² dos modelos econométricos. O R² é uma medida estatística que indica o grau de variação da variável dependente que pode ser explicado pelas variáveis independentes no modelo estatístico. Quanto mais próximo de 1 for o valor de R², maior é a capacidade do modelo de explicar a variação da variável

dependente com base nas variáveis independentes incluídas.

Tabela 10- Resultados Econométricos de R²

VARIÁVEIS	R ²
Energia Renovável	0.573
Energia Solar	0.526
Energia Eólica	0.386
Energia Hidrelétrica	0.523
Biocombustíveis	0.394
Energia Geotérmica	0.071

Fonte: Elaborado pela autora

Desta forma, os dados da Tabela 10 demonstram que as variáveis independentes explicaram 57,3% da variabilidade da energia renovável. A energia solar possui um R² de 0.526, indicando que 52.6% da variação na energia solar é explicada pelas variáveis independentes incluídas no estudo. A energia eólica, por sua vez, apresenta um R² de 0.386, o que sugere que 38.6% da variação na energia eólica pode ser explicada pelas variáveis independentes utilizadas no modelo. Em relação à energia hidrelétrica, o R² é de 0.523, indicando que 52.3% da variação na energia hidrelétrica pode ser explicada pelas variáveis independentes analisadas. Para os biocombustíveis, o R² é de 0.394, o que significa que 39.4% da variação nos biocombustíveis pode ser explicada pelas variáveis independentes consideradas no estudo. Por fim, a energia geotérmica possui um R² de 0.071, indicando que apenas 7.1% da variação na energia geotérmica pode ser explicada pelas variáveis independentes incluídas no modelo, sugerindo a influência significativa de outros fatores não considerados.

5 CONCLUSÃO

Ao longo desta monografia, explorou-se a interseção entre a complexidade econômica e a adoção de energias renováveis em uma amostra de países ao redor do mundo. Esta pesquisa buscou investigar o papel da complexidade econômica na adoção de energias renováveis em uma amostra de países, abrangendo o período de 2015 a 2021. Por meio de uma análise importante que contribuem para o atendimento dos determinantes

dessa transição energética.

Os resultados obtidos revelam que a complexidade econômica desempenha um papel significativo na adoção de energias renováveis. Países com uma estrutura produtiva diversificada e sofisticada tendem a adotar mais prontamente fontes de energia limpa e renovável. Além disso, os resultados evidenciam a influência do consumo de energia elétrica e do consumo de energia fóssil na adoção de energias renováveis. O aumento do consumo de energia elétrica está associado a uma maior adoção de fontes de energia renovável, enquanto o aumento do consumo de energia fóssil tende a inibir essa transição.

Embora este trabalho tenha apresentado contribuições na área da complexidade econômica e desenvolvimento sustentável, algumas limitações foram observadas. Primeiramente, a utilização de outras *proxies* para a sofisticação produtiva, como o Índice de Diversificação de Exportações, poderia fornecer uma visão alternativa entre a estrutura econômica do país e a adoção de energias renováveis. Em segundo lugar, a análise centrada em grupos de países em desenvolvimento pode não capturar completamente as variações dentro desses grupos, levando a generalizações. Em terceiro lugar, a análise de não linearidade entre complexidade econômica e energia renovável que não foram abordados neste estudo. Reconhecer essas limitações é fundamental para garantir a precisão e a relevância dos resultados e abrir caminho para a investigações mais aprofundadas e abrangentes nesta área em constante evolução.

Esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre a relação entre complexidade econômica e adoção de energias renováveis, fornecendo insights valiosos para o desenvolvimento de políticas e estratégias que visam promover um futuro mais sustentável e resiliente.

6 REFERÊNCIAS:

ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3 ed. Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 10 out. 2021.

BALASSA, Bela. Trade Liberalization and “Revealed” Comparative Advantage. The Manchester School of Economic and Social Studies, 33(2):99-123, Manchester, Wiley Online Libery, 1965.

CERETTA, Paulo Sergio; SARI, Jorge Fernando; CERETTA, Franciane Cougo da Cruz. Relação entre emissões de CO₂, crescimento econômico e energia renovável. **Desenvolvimento em Questão**, v. 18, n. 50, 2020.

CORRÊA, Lucas; CARIO, Silvio Antonio Ferraz. As transições entre paradigmas tecno-econômicos e as janelas de oportunidade: o emergente caso das energias renováveis. **Pesquisa & Debate Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados em Economia Política**, v. 33, n. 1 (59), 2021.

DOGAN, Eyup; TASPINAR, Nigar; GOKMENOGLU, Korhan K. Determinants of ecological footprint in MINT countries. **Energy & Environment**, v. 30, n. 6, p. 1065-1086, 2019.

ECI. Índice de Complexidade Econômica. **Atlas of Economic Complexity**. 2023. Recuperado de <https://atlas.cid.harvard.edu/>.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista Usp**, n. 72, p. 6-15, 2007.

GOZGOR G., & CAN M. The Impact of Energy Consumption and CO₂ Emissions on Economic Growth: Fresh Evidence from BRICS Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016a.

GOZGOR, Giray; CAN, Muhlis. Export product diversification and the environmental Kuznets curve: evidence from Turkey. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 21594-21603, 2016b.

GREENE, William. Functional forms for the negative binomial model for count data. **Economics Letters**, v. 99, n. 3, p. 585-590, 2008.

GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C. **Econometria básica-5**. Amgh Editora, 2011.

HARTMANN, Dominik et al. Linking economic complexity, institutions, and income inequality. **World development**, v. 93, p. 75-93, 2017.

HIDALGO, César A. et al. The product space conditions the development of nations. **Science**, v. 317, n. 5837, p. 482-487, 2014.

UNCC. "Climate Action and Support Trends." United Nations Climate Change. Secretariat: 34, 2019.

IEA. World Energy Investment 2023, **IEA, Paris**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>, Licença: CC BY 4.0

IPCC, Painel Intergovernamental Sobre Mudanças. Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) sobre os impactos do aquecimento

global de 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais e respectivas trajetórias de emissão de gases de efeito estufa, no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça da mudança do clima, do desenvolvimento sustentável e dos esforços para erradicar a pobreza: sumário para formuladores de políticas. **Incheon, República da Coreia: Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas**, v. 28, 2018.

IRENA Renewable Power Generation Costs in 2020. **International Renewable Energy Agency**. 2020.

LOTZ, T., NISSEN, C., & GODOY, R. Carbon Dioxide Emissions and Economic Growth: An Assessment Based on Production and Consumption Emission Inventories. **Ecological Economics**. 2018.

LOTZ, T., NISSEN, C., & GODOY, R. Carbon Dioxide Emissions, Consumption, and Economic Growth in Brazil, China, India, and the United States. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**. 2018.

SHAHZAD, U. et al. The Role of Economic Complexity in the Adoption of Renewable Energy Sources: A Global Analysis. **Energy Policy**. 2020a.

SHAHZAD, Umer et al. Export product diversification and CO₂ emissions: Contextual evidences from developing and developed economies. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 124146, 2020b.

TINBERGEN, Jan. Ragnar Frisch's role in econometrics: A sketch. **European Economic Review**, v. 5, n. 1, p. 3-6, 1974.

TORRES-REYNA, Oscar. Introdução à análise de dados usando Stata. **Princeton: Universidade de Princeton**, 2007.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change Convenção. 21^o **Conference of the Parties**. Acordo de Paris, 2015.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introductory Econometrics: A Modern Approach**. Mason, Cengage Learning. 2009.