

O PAPEL DA PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (P&D) NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: UMA ANÁLISE COMPARATIVA PARA OS PAÍSES DA OCDE

Lindomayara França Ferreira¹
Jamaika Prado²
Rosa Livia Gonçalves Montenegro³

Resumo: O presente artigo teve por objetivo investigar as principais condições que incentivaram a adoção de energias renováveis (ER) dos 42 (quarenta e dois) países membros e associados da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), a partir da Análise Comparativa Qualitativa (QCA) para os anos 2000, 2010 e 2019. O principal resultado desse trabalho constatou a relevância dos investimentos à Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para a transição energética das nações. Ademais, observou-se a associação entre a P&D com outras condições (emissões de dióxido de carbono, renda *per capita* e inovação ambiental), que impulsionaram a expansão das ER, nos respectivos anos. É válido ressaltar que países como a Dinamarca e a Nova Zelândia obtiveram resultados promissores, atribuídos às metas de descarbonização estabelecidas nos acordos de cooperação climática. Concluiu-se que a adoção de alguns instrumentos foi fundamental para que houvesse promoção da competitividade e do desenvolvimento de tecnologias renováveis.

Palavras-chave: Investimento em P&D. Transição energética. Análise multivariada.

THE ROLE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT (R&D) IN THE ENERGY TRANSITION: A COMPARATIVE ANALYSIS FOR OECD COUNTRIES

Abstract: This article aimed to investigate the main conditions that encouraged the adoption of renewable energies (RE) in the 42 (forty-two) member and associated countries of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), based on the Qualitative Comparative Analysis (QCA) for the years 2000, 2010 and 2019. The main result of this work verified the relevance of investments in Research and Development (R&D) for the energy transition of nations. Furthermore, an association was observed between R&D and other conditions (carbon dioxide - emissions, per capita income, and environmental innovation), which boosted the expansion of RE, in the respective years. It is worth noting that countries such as Denmark and New Zealand have achieved promising results, attributed to the decarbonization targets established in climate cooperation agreements. It was concluded that the adoption of some instruments was essential for the promotion of competitiveness and the development of renewable technologies.

Keywords: Investment in R&D. Energy transition. Multivariate analysis.

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós-graduação em Economia, Juiz de Fora/MG, Brasil, lindomayara@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7014-4294>.

² Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós-graduação em Economia, Juiz de Fora/MG, Brasil, jamaika.prado@estudante.ufjf.br, <https://orcid.org/0000-0002-5305-0592>.

³ Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós-graduação em Economia, Juiz de Fora/MG, Brasil, rosa.livia@ufjf.br, <https://orcid.org/0000-0001-8383-5131>.

EL PAPEL DE LA INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO (I&D) EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA: UN ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LOS PAÍSES DE LA OCDE

Resumen: Este artículo tuvo como objetivo investigar las principales condiciones que alentaron la adopción de energías renovables (ER) en los 42 (cuarenta y dos) países miembros y asociados de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), con base en el Análisis Comparativo Cualitativo (QCA) para los años 2000, 2010 y 2019. El principal resultado de este trabajo verificó la relevancia de las inversiones en Investigación y Desarrollo (I&D) para la transición energética de las naciones. Además, se observó una asociación entre la I&D y otras condiciones (por ejemplo, emisiones de dióxido de carbono, renta per cápita e innovación ambiental), lo que impulsó la expansión de las ER, en los respectivos años. Cabe señalar que países como Dinamarca y Nueva Zelanda han logrado resultados prometedores, atribuidos a las metas de descarbonización establecidas en los acuerdos de cooperación climática. Se concluyó que la adopción de algunos instrumentos era fundamental para la promoción de la competitividad y el desarrollo de tecnologías renovables.

Palabras clave: Inversión en I&D. Transición energética. Análisis multivariable.

Introdução

Diante das mudanças climáticas antropogênicas e dos desafios de escassez dos recursos naturais, a transição energética têm sido cada vez mais viabilizada por diferentes países (Newell, 2018; Gutierrez, 2021; Umar; Safi, 2023). De acordo com dados do relatório REN21 (2022a), pelo quarto ano consecutivo houve um crescimento no investimento global em energias renováveis (ER), chegando a um total de US\$ 366 bilhões de dólares, em 2021. No entanto, no cerne do debate geopolítico, a recuperação econômica pós pandemia COVID-19 ampliou os investimentos e subsídios em combustíveis fósseis com um montante superior aos de ER⁴ a fim de atender a rápida demanda. Não obstante, no final de 2021, o aumento dos preços globais de *commodities* a partir da invasão da Ucrânia pela Federação Russa, resultou na desaceleração das cadeias de fornecimento de ER no âmbito global (REN21, 2022a).

Apesar disso, o WEF⁵ (2021) destaca que em menos de uma década os custos das tecnologias renováveis têm apresentado um declínio mais acentuado em relação aos custos das tecnologias tradicionais. Em especial, a energia solar ficou 89% mais barato e a eólica 70%, de 2010 a 2021, enquanto o preço de energia a partir do carvão

⁴ Cerca de 7% do PIB global (REN21, 2022).

⁵ *World Economic Forum*

caiu apenas 2% (REN21, 2022b). O que sugere a importância de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e da curva de aprendizado para a maturidade e competitividade das tecnologias renováveis (Sun; Kim, 2017; Hayat et al., 2023), a fim de promover uma mudança estrutural no setor energético (Qadir et al., 2021; UMAR; SAFI, 2023).

Além dos aspectos de natureza climática e segurança energética (SUN; KIM, 2017), um outro aspecto favorável no processo de transição consiste na geração de empregos promovido pelo setor. De acordo com dados do IRENA (2022), nos Estados Unidos foi gerado mais de 900 milhões de empregos⁶, na China mais de 5 milhões e no Brasil mais de 1 milhão, em 2021. O que ressalta seu potencial para promover o desenvolvimento econômico em diferentes economias.

Sinalizado como uma “janela de oportunidade” (LEMA et al., 2020), o processo de transição energética caracteriza-se tanto pela incerteza tecnológica quanto pela incerteza de mercado, o que requer uma atuação mais incisiva por parte do Estado (NEWELL, 2018; DELEIDI et al., 2020) – dado a presença do efeito “*carbon lock-in*” incorporadas nas sociedades modernas, isto é, do aprisionamento das indústrias ao uso intensivo em combustíveis fósseis. Nesse aspecto, dentre os inúmeros desafios, a disponibilidade de financiamento em P&D para as energias renováveis são apontados como um dos principais gargalos ainda não solucionado (Sun; Kim, 2017; Gadir et al., 2021; Umar; Safi, 2023), especialmente, em países com menor grau de desenvolvimento e de capacidade científica-tecnológica.

De acordo com Mazzucato (2013), os investimentos em inovações são cumulativos e os seus resultados dependem das inovações que foram feitas no passado, além disso, devido às vantagens do pioneirismo é provável que os países líderes que estão surgindo nessa nova trajetória tecnológica continuem a ser líderes por um longo período. No entanto, no contexto dos retardatários, Lema et al. (2020) destacam que há múltiplos caminhos possíveis para o desenvolvimento, dentre estes a criação de uma trajetória única capaz de promover um *catch-up*, isto é, o emparelhamento com os países desenvolvidos.

Alguns estudos têm se concentrado nas combinações de fatores que podem promover um ambiente atrativo para a expansão das energias renováveis. No caso dos asiáticos, Hess e Mai (2014) destacam que além do produto interno bruto (PIB)

⁶ Somatório de todas as tecnologias renováveis: biocombustíveis, solar, eólica, hidrelétrica, biomassa, geotérmica e outras.

per capita, as políticas de inovações e a força da indústria de combustíveis fósseis podem apresentar interferências no processo de transição energética – no primeiro caso fomentá-lo, enquanto no segundo caso, atrasá-lo. De acordo com [Faic \(2021\)](#) na Bélgica, Dinamarca, Alemanha, Itália, República Tcheca, Polônia, Espanha e Suécia, o apoio governamental para P&D e a presença de dependência de importação afetam a inovação em ER positivamente, quando combinadas com outras condições.

Em nível estadual, Wurster e Hagemann (2018) identificaram que além do potencial técnico para os estados federais da Alemanha economicamente mais desenvolvidos, como as condições naturais ou geográfica favoráveis, o aspecto político-partidário dos governos estaduais desempenha um papel importante na expansão da produção de ER. No contexto da Áustria, Bélgica e Alemanha, Wurster e Hagemann (2020) identificaram que as combinações de alto potencial de expansão em renováveis, associado com baixa prosperidade financeira, poderá levar a uma expansão bem-sucedida em relação às tecnologias solar e eólica, devido ao apoio financeiro externo.

Apesar dos grandes desafios econômicos, políticos e sociais intrínsecos ao processo de transição energética mundial, o presente artigo propõe investigar as principais condições de incentivo ao relativo crescimento da adoção de energias renováveis de um país. Diferentes fatores têm sido apontados como essenciais para uma transição bem-sucedida, assim, espera-se que dentre esses, um ambiente de inovação promovido pela disponibilidade de financiamento e o desenvolvimento de um *mix* de políticas articuladas, possibilitem a transição das economias para um novo paradigma tecnológico verde.

Desse modo, para uma melhor compreensão dessas condições, utiliza-se uma lente analítica estática para os anos 2000, 2010 e 2019, de acordo com os países que compõem a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE)⁷. A partir das noções de “necessidade” e “suficiência”, será possível observar as condições que estimulam a expansão de energias renováveis, nos três respectivos períodos. Ademais, três hipóteses serão testadas no trabalho, a saber:

- **Hipótese 1:** *Países com elevada renda per capita apresentam vantagens no processo de transição energética, sendo este uma condição necessária, mas não é uma condição suficiente.*

⁷ Países membros e países colaboradores, como o Brasil, por exemplo.

- **Hipótese 2:** *O financiamento para P&D é uma condição necessária para o processo de transição energética, mas não é uma condição suficiente.*
- **Hipótese 3:** *A difusão da inovação é uma condição necessária para o processo de transição energética, mas não é uma condição suficiente.*

Conforme esperado, a partir do método de Análise Comparativa Qualitativa *Fuzzy-set* (*fsQCA*) os principais resultados deste trabalho sinalizam a importância do fomento para a P&D e o incentivo para a difusão da inovação. Deste modo, a principal contribuição do artigo consiste na possibilidade de investigar as interações entre os estímulos à adoção de tecnologias renováveis, por parte dos 42 (quarenta e dois) países da amostra. Em outras palavras, os resultados permitirão identificar quais configurações levam à resultados bem-sucedidos, a partir das distintas capacidades tecnológicas ambientais entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento (Montenegro et al., 2018; Lema et al., 2020).

O artigo está estruturado em cinco seções, incluindo a presente consideração inicial. A segunda seção propõe discutir sobre os aspectos políticos e de financiamento para inovação em energias renováveis, ampliando o debate para os países da OCDE. A terceira seção, apresentará a base de dados utilizada e os procedimentos metodológicos da técnica estatística de multivariada. As discussões e os resultados obtidos com a técnica *fsQCA* será exposta na quarta seção. Por fim, na quinta seção, serão tecidas as considerações finais do trabalho.

Transição energética: Política, Financiamento e inovação

Desde a década de 1980, houve um crescente interesse sobre os desafios contemporâneos para a mitigação das mudanças climáticas e má administração dos recursos naturais. Em 1988, desmistificando a falsa dicotomia de que para promover crescimento econômico faz-se necessário o uso excessivo dos recursos naturais, o Relatório de *Brundtland* na Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) destacou a importância de promover o desenvolvimento sustentável (Brundtland, 1991), i.e., o desenvolvimento de um novo sistema sociotécnico em que tanto a tecnologia quanto as organizações sociais apresentam um papel crucial para o desenvolvimento de um novo paradigma verde (Geels, 2014; Newell, 2018).

O paradigma verde consiste em mudanças disruptivas direcionadas para tecnologias e modos de produção mais sustentáveis (Freeman, 1992 apud Lema et al., 2020). Para Mazzucato (2013), o atual sistema industrial deve ser radicalmente transformado em um novo modelo ambientalmente sustentável. Assim, a emergência de um novo paradigma tecnoeconômico verde trás possibilidades e oportunidades de uma nova trajetória tecnológica capaz de transformar os setores existentes e/ou criar novos (Newell, 2018).

Em uma perspectiva multinível da inovação (Geels, 2014) os grandes desafios sociais devem ser entendidos como sistêmicos (Loorbach, 2017). A alteração dos regimes insustentáveis existentes tem promovido novas configurações sociotécnicas que potencialmente oferecem uma “janela de oportunidades” (Gibbs; O’Neill, 2016; Newell, 2018). Indispensável para alcançar um futuro mais limpo, as transições são compreendidas como mudanças orientadas para o longo prazo, no qual reúne o esforço de diferentes agentes (público, privado e terceiro setor) em torno de tecnologias específicas ou subsistemas (por exemplo, mobilidade, energia e agricultura), i.e., sistemas sociotécnicos (Sedlacek et al., 2020). Dentro desse arcabouço e tendo em vista a importância da transformação do setor, as transições energéticas visam combinar objetivos ambientais, de segurança energética e de competitividade econômica (Qadir, 2021).

A fim de viabilizar esse novo modelo de desenvolvimento sustentável, após o Protocolo de Quioto na década de 1990, a Conferência das Partes⁸ (COP) na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) estabeleceu metas de combate as mudanças climáticas. Considerado como uma atividade de elevados níveis de emissões de CO₂, dentre as principais medidas de mitigação da COP destaca-se a substituição de combustíveis fósseis por uso de energias renováveis, definida como transição energética de baixo carbono (Guimarães, 2016). Para Huh et al. (2019), a transição energética refere-se, sobretudo, a um processo de transformação de um sistema centralizado e orientado com a oferta de combustíveis fósseis para um novo sistema com gestão da demanda, ampliação do apoio às energias renováveis e melhoria da eficiência energética.

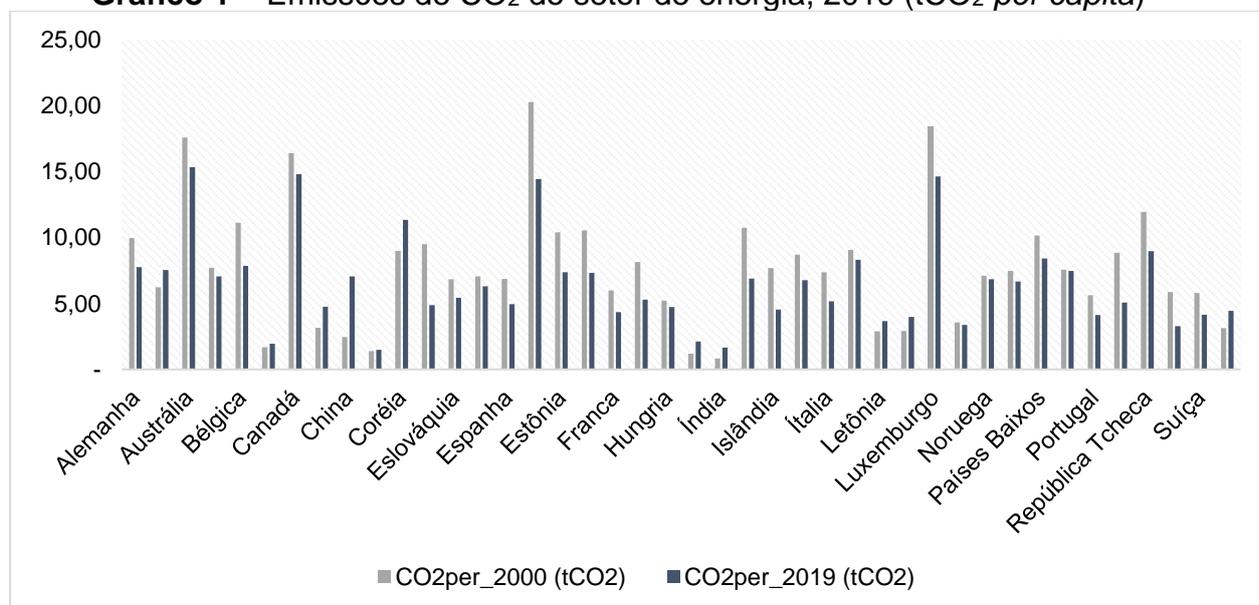
Indo além de uma “simples” mudança tecnológica, a transição energética refere-se à uma mudança sociocultural que tem impactos profundos nas instituições,

⁸ A COP realizada em Paris no ano de 2015 foi a vigésima primeira, portanto COP21.

rotinas e crenças incumbentes (Loorbach et al., 2017). No qual, a atuação do Estado se faz primordial para gerir, permitir ou facilitar essa transformação, seja com incentivos diretos (como o financiamento para P&D e subsídios) ou indiretos (como mudanças nas políticas vigentes, normas e regulamentações) (Newell, 2018; QADIR, 2021).

Ao longo das duas últimas décadas (2000-2020), os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) tornou explícito a necessidade do avanço da transição energética. Entretanto, dos 135 países com compromissos líquidos zero, 84 apresentaram metas de energias renováveis, dos quais apenas 36 países estabeleceram metas para uma transformação energética em 100% de fontes renováveis (REN21, 2022b).

Gráfico 1 – Emissões de CO₂ do setor de energia, 2019 (tCO₂ per capita)



Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados da IEA (2022).

Conforme ilustra o Gráfico 1, o setor energético registrou em 2019 uma participação ainda significativa dos níveis de emissões de dióxido de carbono (CO₂) em muitos países da OCDE. Com uma variação positiva de mais de 50% entre as duas últimas décadas (2000-2019), destacam-se os níveis de emissões da China, Indonésia e Chile. Em contraste, os países Dinamarca, Suécia, Reino Unido e Islândia com uma redução de mais de 40% nos níveis de emissões.

No caso dos Estados Unidos, houve uma redução de 29% dos níveis emissões de CO₂, parte desses resultados podem ser atribuídos ao conjunto de ações que tem sido implementadas no país. Em 2021, por exemplo, em colaboração com a ONU

foram estabelecidas duas metas principais em um ambicioso plano de “revolução de energia limpa”⁹: i) a redução de emissões em 50% até 2030 e, ii) as emissões líquidas zero até 2050 (Mathias et al., 2021). No caso coreano, houve um aumento nos níveis de emissões de mais de 26%, sendo está uma das principais economias emissoras. No entanto, há um plano de descarbonização da economia até 2050 em vigência, a proposta consiste em reduzir o financiamento do carvão e, consecutivamente incentivar a adoção de tecnologias renováveis no setor (REN21, 2022a). No caso do Canadá, em 2021, a criação da lei de responsabilidade líquida de emissões zero firmou o compromisso estabelecido com a ONU para emissões zero até 2050 (CHN, 2019), no qual já é perceptível seus efeitos sobre os níveis de emissões, com uma redução de quase 10%.

Assim, apresentando como pano de fundo os desafios das mudanças climáticas antropogênicas e segurança energética¹⁰ (Qadir, 2021), o setor tem passado por profundas transformações em um contexto mundial, embora em escalas e progressos diferentes (Guimarães, 2016). Caracterizado por desafios socioeconômicos, se por um lado essa transformação energética gera altos custos e incertezas (Mazzucato, 2013; Deleidi et al., 2020), por outro lado, promove desenvolvimento econômico, segurança no abastecimento e a descarbonização do setor (REN21, 2022a).

Cabe ressaltar que tanto as inovações quanto as iniciativas de finanças verdes têm um papel primordial para o processo de transição energética (SUN; KIM, 2017). Segundo Newell (2018), o financiamento é cada vez mais central nos debates sobre o “desinvestimento” em combustíveis fósseis, pois embora os custos gerais relacionados as tecnologias renováveis tenham diminuído significativamente nos últimos anos – tornando-o mais competitivo em relação as tecnologias convencionais –, ainda assim há uma escassez de investidores dispostos a assumir os riscos desse tipo de investimento (Qadir, 2021). Reconhecendo o elevado potencial das finanças verdes para alcançar as metas estabelecidas pela ONU, Umar e Safi (2023) destacam que o financiamento reduz significativamente as emissões de CO₂ nos países da OCDE, assim como as inovações e as regulamentações mais rígidas, no entanto, o

⁹ Com um pacote bipartidário de US\$ 1,2 trilhão.

¹⁰ Diante das crises de petróleo, da recente invasão da Ucrânia e de seus respectivos efeitos nas *commodities*.

crescimento econômico e as importações aumentam as emissões de carbono entre os países da OCDE.

Assim, as perspectivas de expansão das fontes renováveis de energia demandam não só um sistema de financiamento direcionado, como também a integração das metas entre as políticas públicas no âmbito energético, tecnológico e ambiental (Jannuzzi, 2005; Mazzucato, 2018; Lema et al., 2020). No entanto, destaca-se que nem todas os instrumentos de financiamento possuem o mesmo impacto nas fontes de energias renováveis, de tal modo que “alguns atores financeiros direcionam seus investimentos para um subconjunto de tecnologias, enquanto outros distribuem seus investimentos de maneira mais uniforme em um amplo *portfólio* de tecnologias concorrentes, criando direções de tecnologia”¹¹ (Mazzucato; Semieniuk, 2008, p. 2). É, entretanto, complexo definir quais serão os “vencedores” e “perdedores” desse novo paradigma, no entanto algumas economias podem apresentar uma transição energética sustentável mais bem-sucedidas do que outras, devido à sua multiplicidade de recursos (como os aspectos geográfico, ambiental, social, econômico, político e tecnológico).

Descrição dos países que compõem a OCDE

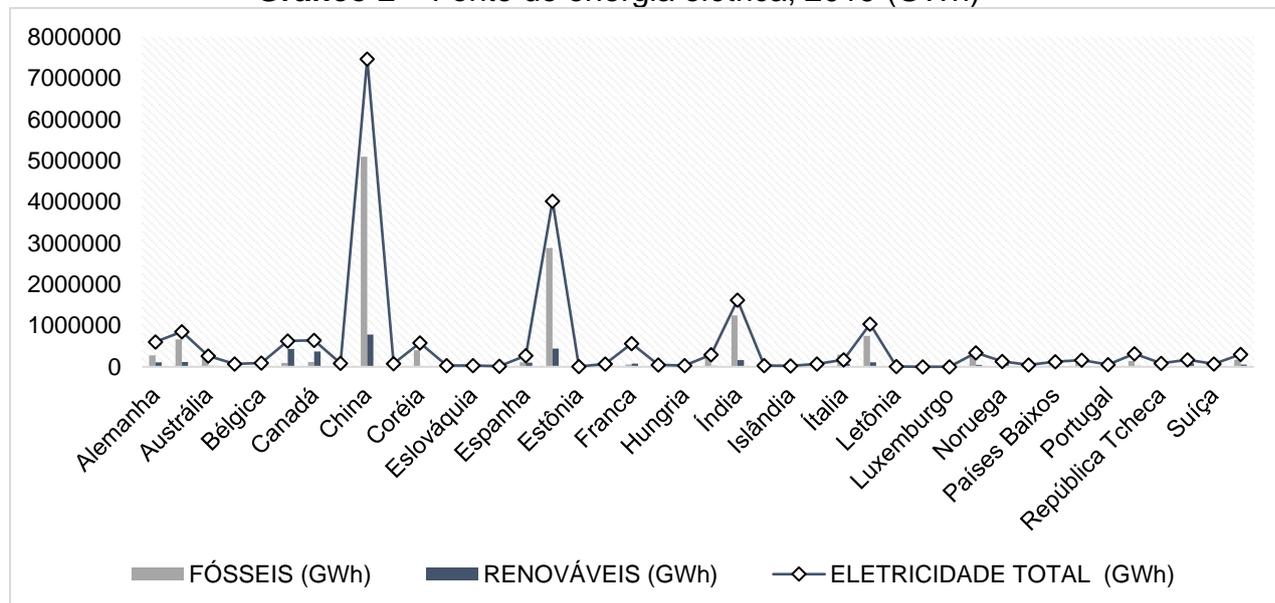
No que se refere ao contexto da transição energética nos países membros da OCDE, percebe-se ainda uma predominância das tecnologias convencionas como principal fonte de energia elétrica, i.e., combustíveis fósseis. Conforme ilustra o Gráfico 2, entre os 42 (quarenta e dois) países da amostra, apenas o Brasil e o Canadá apresentam uma maior participação de ER em relação à fonte de eletricidade por combustíveis fósseis, para o ano de 2019.

Contudo, em resposta ao aumento da demanda elétrica, entre o período de 2010 e 2019, houve um decréscimo das ER de 2,86% em detrimento a um crescimento de 18,56% em combustíveis fósseis na matriz elétrica brasileira. Esse resultado sinaliza uma desaceleração das ER, muitas vezes, por estratégias de políticas desenvolvidas em nome da “urgência” como, por exemplo, a adoção de termelétricas na crise do Amapá em 2020 (ANEEL, 2020). Enquanto no Canadá, o período de 2010 e 2019, registrou um decréscimo de 22,10% do uso de

¹¹ Tradução livre.

combustíveis fósseis e um crescimento de 8,06% em ER, o que sinaliza a transformação do setor em direção a uma economia mais sustentável

Gráfico 2 – Fonte de energia elétrica, 2019 (GWh)



Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados da IEA (2022).

Assim, tendo em vista a importância e as implicações por trás desse debate, estudos recentes têm se concentrado nas discussões das possíveis combinações de fatores que podem promover um ambiente atrativo para a expansão das energias renováveis (ver Hess e Mai, 2014; Wurster e Hagemann, 2018; 2020). No entanto, devido às particularidades de cada economia e/ou região, é possível identificar múltiplas combinações que têm auxiliado no desbloqueio da transição energética. Desse modo, a fim de atender ao objetivo proposto neste artigo, destaca-se três hipóteses a serem testadas:

Hipótese 1: *Países com elevada renda per capita apresentam vantagens no processo de transição energética, sendo este uma condição necessária, mas não é uma condição suficiente.*

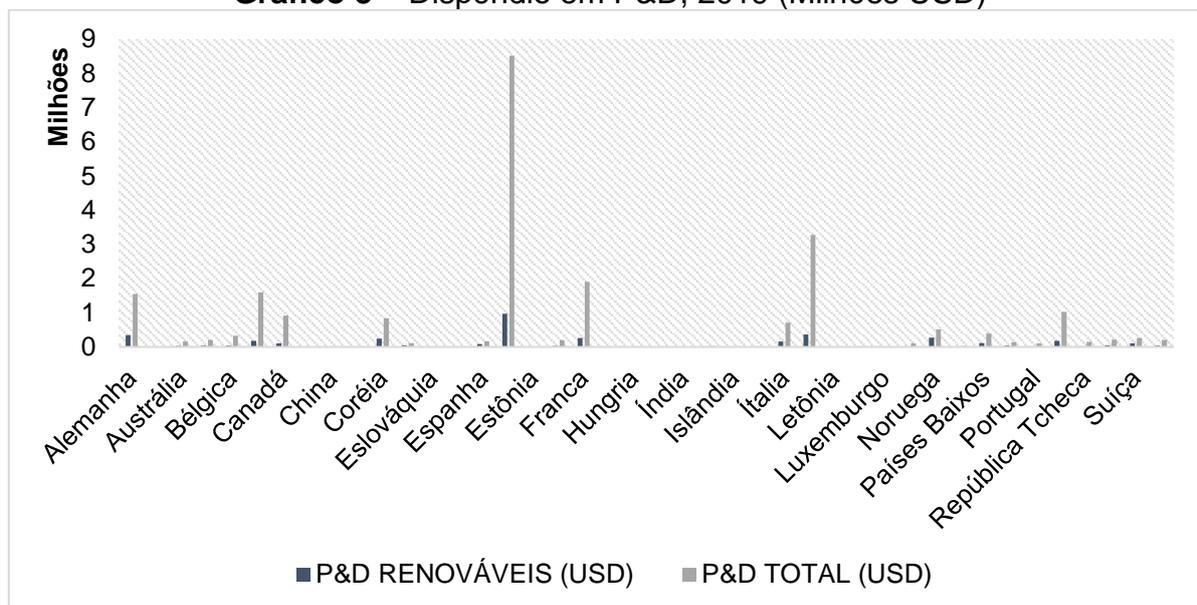
Por um lado, os países economicamente bem-sucedidos apresentam vantagens no processo de transição, devido não só a disponibilidade de recursos para várias iniciativas de financiamento – como apoiar pesquisas ou fornecer subsídios diretos para produção e infraestrutura energética –, mas também devido ao conhecimento científico-tecnológico acumulado com as tecnologias convencionais (Wurster; Hagemann, 2020); por outro lado, esses países podem apresentar desafios

com as indústrias e as atividades “*carbon lock-in*”, i.e., apresentar resistência de atores-chave para sua economia, especialmente os intensivos em combustíveis fósseis (Hess; Mai, 2014; Qadir et al., 2021). Em concordância Wurster e Hagemann (2020) destaca que embora algumas indústrias abram possibilidade para desenvolver novas tecnologias energéticas ambientalmente sustentáveis, atores ligados às indústrias tradicionais poderão atuar como bloqueios para os esforços da transição – como as indústrias de aço e carvão na Estíria (Áustria), na Flandres (Bélgica) e na Renânia (Alemanha).

Hipótese 2: *O financiamento para P&D é uma condição necessária para o processo de transição energética, mas não é uma condição suficiente.*

Um outro aspecto sinalizado como essencial para o desbloqueio das transições, consiste no papel do financiamento destinado para pesquisas no setor, que é majoritariamente de fonte pública, sobretudo, pela sua natureza disruptiva e a incerteza associada às tecnologias de estágios iniciais (Mazzucato, 2013; DELEIDE et al., 2020) que muitas vezes são disponibilizadas por um gasto em larga escala de capital, trabalho e conhecimento (Sun; Kim, 2017).

O Gráfico 3 ilustra o dispêndio em P&D para as energias renováveis nos países da OCDE, em 2019. Percebe-se que os Estados Unidos com um dos maiores PIB *per capita*, também apresenta um dos maiores dispêndios em P&D para as tecnologias renováveis. Contudo, um decréscimo em 2019, de mais de 60% em relação ao desembolso em 2010.

Gráfico 3 – Dispendio em P&D, 2019 (Milhões USD)

Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados da IEA (2022).

Os países que apresentaram uma taxa de crescimento, entre 2010 e 2019, foram: Japão (65,68%) França (8,41%), Noruega (150,35%) e Brasil (10,97%). Com destaque para a Noruega que apresenta uma participação significativa do dispendio em P&D de renováveis com relação ao dispendio total de P&D. Sendo essa, uma das economias pioneiras a discutir sobre neutralidade de carbono (CHN, 2019).

Assim, a disponibilidade do financiamento para P&D e o direcionamento deste pode ser um instrumento condutor para uma transição bem-sucedida. Se por um lado, o financiamento para P&D promove a competitividade das tecnologias renováveis em relação as tecnologias convencionais (REN21, 2022b). Por outro lado, o financiamento para P&D pode provocar um efeito *crowding-out* (efeito substituição), gerando a inibição do setor privado e a dependência da atuação do Estado (Mazzucato, 2013; Faic, 2021).

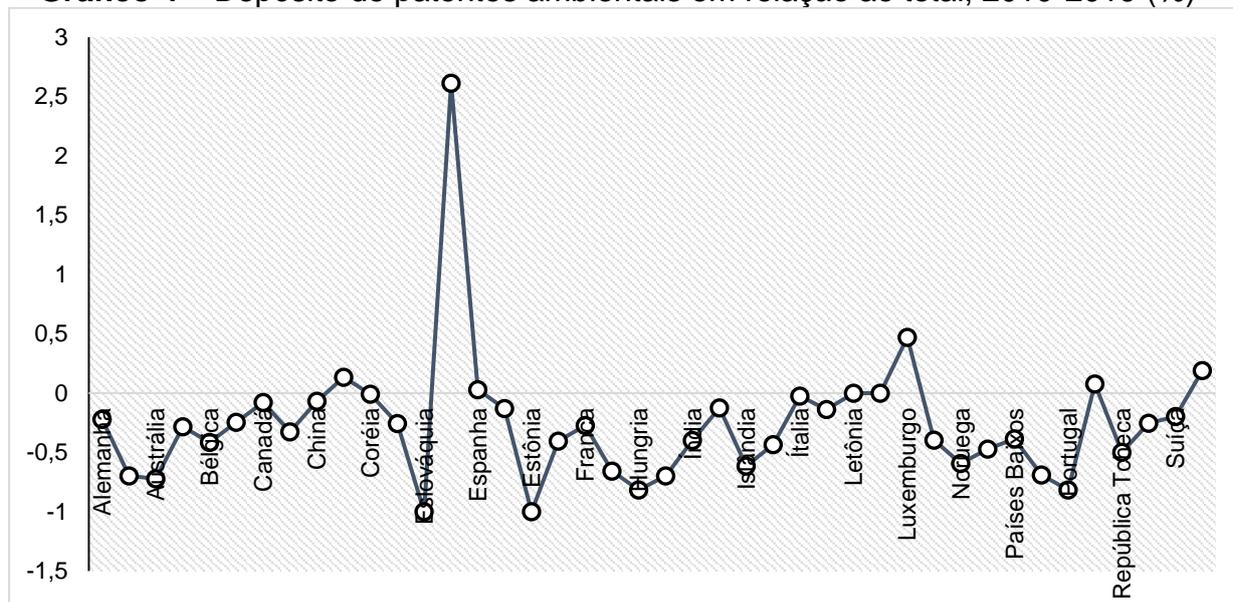
Hipótese 3: *A difusão da inovação é uma condição necessária para o processo de transição energética, mas não é uma condição suficiente.*

Considerada como uma *proxy* para inovação, o desenvolvimento de patentes também pode ser identificado na literatura como um dos principais fatores impulsionadores da transição energética, dado que países com elevada capacidade científica-tecnológica tendem a apresentar condições de pioneirismo na transição e,

consequentemente, usufruir dos benefícios por um longo período excedente (Sun; Kim, 2017). Assim, conforme ilustra o Gráfico 4, dentre os quarenta e dois países da amostra apenas Colômbia, Eslovênia, Espanha, Luxemburgo, Reino Unido e Turquia apresentaram um crescimento no número de depósitos de patentes ambientais, entre 2010 e 2019. Contudo, em termos absolutos, percebe-se que o maior número de depósitos de patentes, em relação ao total de 2019, foi nos Estados Unidos com 10.391.18 e na China com 1.826.39, ambos com patentes ambientais.

De acordo com dados do IRENA (2022), nos Estados Unidos a tecnologia energética de maior participação nos depósitos de patentes foi de energia solar fotovoltaica, com um total de 57.376 acumulado em 2019. Seguido de energia eólica *onshore*, com um total de 23.063 acumulado em 2019. No caso chinês, patentes de energia solar fotovoltaica e térmica lideram o número de patentes do setor. Com um total de 148.182 patentes fotovoltaicas acumulada em 2019, seguida de térmica com um total de 69.344 acumulada em 2019.

Gráfico 4 – Depósito de patentes ambientais em relação ao total, 2010-2019 (%)



Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados da OECD (2022).

Embora haja os efeitos de transbordamentos de conhecimento entre as tecnologias limpas, para que esse conhecimento seja resultado em patente faz-se necessário mais de uma década (Popp, 2010). Além disso, caracterizando-se como uma *proxy* de inovação de alto grau de incerteza, nem toda patente resultará em uma tecnologia comercializável (Faic, 2021). Contudo, o desenvolvimento de patentes pode elevar as capacidades domésticas e apresentar um ganho marginal inicial para

os países que a desenvolvem, especialmente para os países sem experiência ou conhecimento na fabricação de componentes (Qadir et al., 2021).

Assim, diante dessa contextualização teórica em que destaca a importância de um ambiente econômico, da disponibilidade de financiamento para P&D e do papel da inovação para a difusão, maturidade e competitividade das tecnologias renováveis, espera-se examinar posteriormente, com a técnica multivariada de Análise Comparativa Qualitativa (QCA), as três hipóteses descritas nesta subseção e, portanto, atender ao objetivo proposto.

Estudos Empíricos

A partir de uma análise comparativa qualitativa (QCA) para 18 (dezoito) países asiáticos, os autores Hess e Mai (2014) identificaram que, embora os países em desenvolvimento na Ásia sejam considerados os principais contribuintes para as emissões globais de CO₂, o crescimento econômico e o aumento na demanda por eletricidade têm provocado atrasos e bloqueios no processo de transição energética desses países. No entanto, apresentando como justificativa os acordos de cooperação para a responsabilidade climática, os países com menor disponibilidade de financiamento podem receber apoio dos países mais ricos. Ainda nesse aspecto, os autores chamam atenção para as políticas de inovação que impulsionam as tecnologias renováveis, assim como, a força da indústria de combustíveis fósseis ao promover mobilização política contra às políticas da transição; o que poderiam explicar uma relativa estagnação em direção a transição energética.

Segundo Faict (2020), a ausência de apoio governamental para P&D e a presença da dependência de importação de energia, são condições necessárias para a ausência de inovação em energias renováveis na Bélgica, Dinamarca, Alemanha, Itália, República Tcheca, Polônia, Espanha e Suécia. Além disso, a presença da capacidade de absorção, de incentivos fiscais, do financiamento direto do governo e da dependência da importação de energia apresentam poder explicativo para a presença de inovação em energia renovável quando combinadas com outras condições relevantes, como a implementação no mercado ou o desempenho de *clusters*.

No contexto estadual, em 16 (dezesesseis) estados federais da Alemanha foi possível identificar combinações que impulsionaram a expansão das energias

renováveis, entre 2004 e 2014. Com intensas disparidades regionais, os estados apresentaram aspectos que vão além do seu potencial técnico, dentre esses se destaca a orientação ideológica de um partido político. De acordo com os resultados dos autores, há um papel relevante do apoio dos partidos verdes no processo de transição, porém suas motivações vão além da “pegada verde”, i.e., na maioria dos casos os benefícios econômicos gerados pela expansão das renováveis são tidos como os principais fatores. Assim, embora na Alemanha alguns estados apresentassem limitações devido aos seus aspectos econômicos, como um baixo PIB *per capita*, ainda assim conseguiram promover a expansão, utilizando-a como parte de uma estratégia de desenvolvimento (Wurster; Hagemann, 2018).

Nos países Áustria, Bélgica e Alemanha, os estados federais economicamente pobres conseguiram alcançar maior sucesso no processo de transição. De acordo com Wurster e Hagemann (2020), os seus aspectos econômicos não foram um pré-requisito para obter apoio no âmbito nacional, no entanto, a expansão das renováveis – especialmente, eólica e fotovoltaica – foi apresentado como uma forma de promover o desenvolvimento econômico local. Em outras palavras, o processo de transição em estado mais pobres pode não só auxiliar nas metas nacionais de descarbonização, como também proporcionar um efeito econômico redistributivo; porém para que isso ocorra faz-se necessário a presença de um potencial técnico, i.e., a combinação de características geográficas, tecnológicas, políticas e sociais.

Em relação aos “submercados”, Lu et al. (2022) investigaram os fatores contribuintes e os resultados das políticas desenvolvidas em 20 (vinte) países líderes no mercado de energia solar fotovoltaica (PV). Os autores identificaram que PIB alto/baixo, baixo nível de penetração de PV, alto investimento em ER e alto gasto em P&D contribui para políticas baseadas em P&D tecnológico mais bem-sucedidas que incluem financiamento de P&D e programas de demonstração. Os resultados ainda apontam que a China tem promovido principalmente o desenvolvimento da PV aumentando o investimento em P&D e raramente recorre às políticas baseadas no mercado.

Em linhas gerais, essas experiências têm apontado à importância das políticas governamentais de incentivos para a transição energética, pois embora as transições industriais sejam impulsionadas pela inovação de mercado, no contexto da transição sociotécnica se faz necessário políticas mais incisivas e direcionadas, i.e., políticas capazes de corrigir não apenas às externalidades ambientais provocadas pelo setor,

mas também, políticas capazes de estimular tanto o lado da demanda quanto da oferta.

Metodologia

Com a finalidade de investigar as principais condições de incentivo ao relativo crescimento da adoção de energias renováveis de um país, no presente trabalho utiliza-se a técnica multivariada de Análise Comparativa Qualitativa (QCA). Por sua vez, a técnica estática comparativa tem sido útil para identificar fatores que juntos são capazes de promover o avanço da transição energética (ver Hess e Mai, 2014; Wurster e Hagemann, 2018; 2020). Assim, essa seção se subdivide em duas subseções, a primeira seção apresentará os procedimentos da técnica multivariada, enquanto a segunda subseção descreverá as variáveis utilizadas.

Procedimentos da técnica estatística de multivariada: Análise Comparativa Qualitativa (QCA)

Desenvolvida por Ragin (1987), a Análise Comparativa Qualitativa (QCA) é uma técnica estatística de multivariada, fundamentada na teoria dos conjuntos e apropriada para a análise de pequenos conjuntos de dados (N) (Betarelli Junior; Ferreira, 2018). As múltiplas combinações de fatores são analisadas para tratar de forma sistemática as associações produzidas por uma configuração específica (Ragin; Rihoux, 2004; Mendel; Korjani, 2012).

A técnica de QCA permite avaliar o pertencimento (ou não pertencimento) de casos de uma estrutura de dados em um determinado conjunto, i.e., examina as causas em conjunto de forma síncrona para explicar os possíveis resultados. Essa ocorrência simultânea é denominada de “caminhos” (Mingoti, 2007; Hess; Mai, 2014; Betarelli Junior; Ferreira, 2018). Além disso, a respectiva técnica propõe identificar as configurações de um conjunto de variáveis explicativas (condição) e interpretar as relações em termos de “necessidade” e “suficiência” para produzir um resultado almejado (Schneider; Wagemann, 2012; Betarelli Junior; Ferreira, 2018).

Para Betarelli Junior e Ferreira (2018), as propriedades de “necessidade” e “suficiência” são essenciais para analisar as relações entre os conjuntos. Ainda segundo os autores, uma condição pode ser considerada “suficiente” sempre que a

condição (X) estiver presente para um resultado (Y) em todos os casos e, portanto, não haverá caminhos que a condição está presente e o resultado ausente. No caso da propriedade de “necessidade”, o resultado (Y) não pode ser realizado sem a presença da condição (X) e, portanto, nenhum caso com o resultado presente poderá exibir uma condição ausente. Desse modo, uma relação será condição “suficiente” e “necessária” se $X \rightarrow Y$.

No QCA os casos são analisados de forma comparativa sem perder seus aspectos qualitativos. A operacionalização do QCA se subdivide em duas técnicas: i) os conjuntos *crisp* (*crisp set* - *csQCA*), em que todos os casos são definidos para um conjunto binário, com apenas duas categorias de informações 0 (zero) ou 1 (um) e, ii) os conjuntos *fuzzy* (*fuzzy set* - *fsQCA*), em que possuem graus de pertencimento que variam entre 0 e 1, pois permitem o uso de variáveis contínuas (Ganter; Hecker, 2014). Para o presente trabalho será adotado a operacionalização do tipo *fsQCA*, especialmente por fornecer meios mais ajustados para acomodar complementariedades complexas e relacionamento não lineares entre as condições causais. No entanto, cabe ressaltar que a causalidade (ou não causalidade) deve ser interpretada em conjunto com a teoria (Betarelli Junior; Ferreira, 2018).

Um dos principais atributos do *fsQCA* consiste na capacidade de lidar facilmente com um número médio de casos que é muito limitado para uma análise estatística, porém muito grande para um estudo de caso comparativo (Wurster; Hagemann, 2020). Em linhas gerais, a partir da álgebra *Booleana* o *fsQCA* identifica quais combinações de atributos são pertinentes as condições disponíveis. Contudo, por não assumir assimetria causal deve-se evitar comparações inversamente, pois os “caminhos” que resultam em casos de progressos não são necessariamente os mesmos nos casos de estagnações e/ou atrasos (Hess; Mai, 2014).

É oportuno ressaltar que as análises do *fsQCA* referem-se à extensão das relações entre conjuntos, denominadas de medidas de consistência e de cobertura (Ragin, 2006). De acordo com Betarelli Junior e Ferreira (2018), a cobertura avalia o grau em que uma condição (ou combinação) causal conta para um resultado, que pode ser categorizada em cobertura total (somatório das coberturas), bruta (proporção do pertencimento no resultado, explicada por cada termo de solução) e única (proporção explicada unicamente por cada termo de solução). Enquanto a consistência mede o grau de proximidade da relação entre conjuntos e é considerada o principal critério de validação do QCA. Neste caso, quanto mais próximo de 1 (um)

for o valor, maior será a consistência de uma configuração. De acordo com Ragin (2006), para que essa medida seja considerada adequada é necessário que as configurações apresentem uma consistência $\geq 0,80$.

Em resumo, os resultados podem apresentar diversas configurações, chamadas de “expressões primitivas”. Para uma melhor interpretação dos resultados o *fsQCA* usa uma “minimização *Booleana*” a partir do algoritmo Quine-McCluskey (Betarelli Junior; Ferreira, 2018). Além disso, para a interpretação utiliza-se variáveis em letras maiúsculas para expressar maior relevância e minúsculas para expressar menor relevância. Em casos em que nenhuma letra aparece (ausência) no procedimento interpreta-se que a variável não é relevante para aquele “caminho” em específico.

Base de dados

A amostra consiste em um total de 42 (quarenta e dois) países membros e colaboradores da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição dos países da amostra

País	Sigla	País	Sigla
1. Alemanha	1. GER	22. Indonésia	22. IDN
2. África do Sul	2. ZAF	23. Índia	23. IND
3. Austrália	3. AUS	24. Irlanda	24. IRL
4. Áustria	4. AUT	25. Islândia	25. ISL
5. Bélgica	5. BEL	26. Israel	26. ISR
6. Brasil	6. BRA	27. Itália	27. ITA
7. Canadá	7. CAN	28. Japão	28. JPN
8. Chile	8. CHL	29. Letônia	29. LVA
9. China	9. CHN	30. Lituânia	30. LTU
10. Colômbia	10. COL	31. Luxemburgo	31. LUX
11. Coreia	11. KOR	32. México	32. MEX
12. Dinamarca	12. DNK	33. Noruega	33. NOR
13. Eslováquia	13. SVK	34. Nova Zelândia	34. NZL
14. Eslovênia	14. SVN	35. Países Baixos	35. NLD
15. Espanha	15. ESP	36. Polônia	36. POL
16. Estados Unidos	16. USA	37. Portugal	37. PRT
17. Estônia	17. EST	38. Reino Unido	38. GBR
18. Finlândia	18. FIN	39. República Tcheca	39. CZE
19. França	19. FRA	40. Suécia	40. SWZ
20. Grécia	20. GRC	41. Suíça	41. SWE
21. Hungria	21. HUN	42. Turquia	42. TUR

Fonte: Elaboração própria.

A escolha desses países partiu não só da disponibilidade de dados de um bloco econômico, mas também da sua relevância geopolítica energética. Contudo, destaca-

se que outros países que não estão presentes nessas análises podem exibir pioneirismo na “corrida” da transição – sendo este uma das limitações do presente estudo.

Para as análises utiliza-se um conjunto de cinco variáveis contínuas do ano de 2000, 2010 e 2019: i) Energias renováveis – em termos relativos ao total (GWh); ii) Emissões de CO₂ *per capita* do setor energético – em termos relativos ao total (tCO₂); iii) PIB *per capita* (US\$, a preços corrente); iv) Patentes ambientais (*proxy* de inovação) – em termos relativos ao total (unidade) e, v) Dispêndio de P&D em energias renováveis (US\$, a preços 2021), conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Descrição das Variáveis

Variáveis	Siglas (QCA)	Tipo	Fonte de dados
Energias Renováveis	RE (E)	Resultado	Agência Internacional de Energia (IEA, 2023)
Emissões de CO ₂	CO2 (C)	Condição	Agência Internacional de Energia (IEA, 2023)
Produto Interno Bruto <i>per capita</i>	GDP (G)	Condição	Banco Mundial (2023)
Patentes ambientais	PAT (I)	Condição	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2023)
Dispêndio em P&D	DPD (D)	Condição	Agência Internacional de Energia (IEA, 2023)

Fonte: Elaboração própria.

Neste estudo, foi atribuído a cada variável uma letra maiúscula para representar o maior nível de relevância e uma letra minúscula para representar o menor nível de relevância da variável condição, tal que, “energias renováveis” consiste na variável resultado (*E*) e as demais são as condições (*C, G, I, D*). Assim, espera-se a seguinte combinação:

$$\mathbf{C + G + I + D \rightarrow E} \quad (1)$$

Em que,

“E”: corresponde a variável de energias renováveis;

“C”: corresponde as emissões de CO₂ *per capita* do setor energético;

“G”: corresponde ao PIB *per capita*;

“I”: corresponde a *proxy* de inovação ambiental;

“D”: corresponde ao dispêndio de P&D em energias renováveis.

Análises e Resultados

Com um total de 42 (quarenta e dois) países, preliminarmente, observou-se

que a condição de dispêndio em P&D apresentou 22 *missing* em 2000, 18 *missing* em 2010 e 12 *missing* em 2019, portanto, optou-se por realizar análises individuais excluindo os *missing* de cada período da amostra. Além disso, a partir do teste Bacon identificou-se a Dinamarca e a Nova Zelândia como *outliers* nos três períodos, contudo, optou-se por manter nas análises devido a sua relevância geopolítica energética.

Em relação à média e o desvio padrão das variáveis, destaca-se a variável PIB *per capita*, com a de maior dispersão em torno da média, devido a sua natureza. Cabe destacar também a variabilidade do número de patentes ambientais em relação ao seu mínimo e máximo, com destaque para o registro de zero patentes para Lituânia, Eslováquia, Hungria e Letônia, no ano de 2019.

Configurações específicas para os países da OCDE

A Tabela 1 apresenta a frequência de configurações específicas, fornecendo um panorama das combinações formadas, a partir do método *fsQCA* com as quatro condições destacadas na combinação 1.

Tabela 1 – Frequência de configurações específicas

Ano = 2000				Ano = 2010				Ano = 2019			
Config.	Freq.	Percent.	Cum.	Config.	Freq.	Percent.	Cum.	Config.	Freq.	Percent.	Cum.
CGID	3	15	15	CGID	4	16.67	16.67	CGID	2	6.67	6.67
CGId	2	10	25	CGId	4	16.67	33.33	CGId	4	13.33	20
CGiD	2	10	35	CGiD	1	4.17	37.5	CGiD	4	13.33	33.33
CGid	3	15	50	CGid	2	8.33	45.83	CGid	2	6.67	40
CgID	1	5	55	CgID	1	4.17	50	CgID	1	3.33	43.33
cGId	1	5	60	CgId	1	4.17	54.17	CgiD	1	3.33	46.67
cGiD	1	5	65	Cgid	1	4.17	58.33	Cgid	2	6.67	53.33
cGid	3	15	80	cGID	1	4.17	62.5	cGID	3	10	63.33
cglD	3	15	95	cGId	1	4.17	66.67	cGId	2	6.67	70
cgid	1	5	100	cGiD	1	4.17	70.83	cGiD	1	3.33	73.33
				cGid	2	8.33	79.17	cglD	2	6.67	80
				cglD	4	16.67	95.83	cglD	2	6.67	86.67
				cgid	1	4.17	100	cgiD	1	3.33	90
								cgid	3	10	100
Total	20	100		Total	24	100		Total	30	100	

Fonte: Elaboração própria.

Preliminarmente, as combinações “CGID”, “CGId”, “cGid”, “cglD” apresentaram um maior número de países na amostra do ano de 2000; em 2010, se manteve “CGID” e “cglD”, porém a combinação “CGId” passou a ser relevante; enquanto em 2019, “CGId” e “CGiD” foram as combinações com maior frequência, seguido de “cGID”, “cgid” e “CGID”. Nos três períodos a combinação “CGID” apresenta uma frequência,

no entanto, em 2019 com um percentual menor. Cabe destacar que devido aos *missing*, houve uma variação no tamanho de cada período na amostra.

Tabela 2 – Matrizes e estatísticas

Ano = 2000					
Matriz de coincidência					
	E	C	G	I	D
E	1				
C	0.589	1			
G	0.695	0.747	1		
I	0.689	0.647	0.6	1	
D	0.658	0.574	0.611	0.732	1
Variável	Obs	Média	Desvio P.	Mín.	Máx.
E	42	0.2841781	0.2962336	0.0007267	0.9993493
C	42	7.726357	4.539082	0.842	20.29
G	42	26663.44	21046.86	757.6687	92527.71
I	42	0.0839046	0.0500272	0	0.2656819
D	20	0.2277502	0.1236207	0.0223778	0.5165248
Ano = 2010					
Matriz de coincidência					
	E	C	G	I	D
E	1				
C	0.576	1			
G	0.728	0.714	1		
I	0.62	0.652	0.623	1	
D	0.721	0.62	0.681	0.707	1
Variável	Obs	Média	Desvio P.	Mín.	Máx.
E	42	0.3013779	0.2685232	0.0029135	0.9998828
C	42	7.754595	4.406643	1.274	20.981
G	42	30564.39	22813.12	1244.366	106544.1
I	42	0.1268808	0.0682304	0	0.3331947
D	24	0.2832557	0.1324063	0.0517389	0.5733713
Ano = 2019					
Matriz de coincidência					
	E	C	G	I	D
E	1				
C	0.577	1			
G	0.715	0.736	1		
I	0.679	0.646	0.686	1	
D	0.724	0.618	0.726	0.665	1
Variável	Obs	Média	Desvio P.	Mín.	Máx.
E	42	0.4169586	0.2668784	0.0474125	0.9998634
C	42	6.489714	3.442383	1.488	15.351
G	42	34832.73	24447.72	1965.539	108570
I	42	0.0759	0.0476011	0	0.2025849
D	30	3.882081	19.99131	0.0001184	109.7267

Fonte: Elaboração própria.

Para avaliar a contribuição de cada uma das condições analisadas, no resultado, a primeira parte da Tabela 2 apresenta a matriz de coincidência, no qual é possível observar a proporção de países que pertencem a cada uma das quatro condições que coincidem com a adoção de energias renováveis e entre cada uma das

demais condições. Assim como, o número de observações de cada condição e suas respectivas estatísticas: média, desvio padrão, valor mínimo e valor máximo.

Os resultados sinalizam que, embora o tamanho da amostra seja diferente, nos três períodos analisados a combinação das condições “CG” apresentaram maiores “correlações”, se sobressaindo em mais de 70% dos países. No contexto da variável resultado de energias renováveis (E), é perceptível um elevado grau de coincidência com as condições de PIB *per capita* (G), patentes ambientais (I) e dispêndio em P&D (D), especialmente em 2019 com 71% dos casos, 67% e 72%, respectivamente. Além disso, as demais condições e combinações apresentaram coeficientes expressivos, com valores maiores ou iguais a 0,50. Contudo, cabe destacar que embora a matriz sinalize qual conjunto é mais propenso a promover a adoção das energias renováveis, para analisar esses conjuntos faz-se necessário adotar um ponto de corte, acima de 0,80 (Ragin; Rihoux, 2004; Ragin, 2006).

Tabela 3 – Configurações lógicas reduzidas e principais medidas de ajuste

Configurações	Cobertura		Consistência
	Bruta	Única	
(Ano = 2000) c*G*i*D Cobertura total = 0.300 Consistência da solução = 0.950	0.300	0.300	0.950
(Ano = 2010) c*G*i*D Cobertura total = 0.300 Consistência da solução = 0.949	0.300	0.300	0.949
(Ano = 2019) c*G*D Cobertura total = 0.467 Consistência da solução = 0.958	0.467	0.467	0.958

Fonte: Elaboração própria.

Com a finalidade de encontrar uma condição que esteja associada a um resultado único, i.e., o aumento das fontes renováveis na matriz elétrica (E), foi aplicado o algoritmo de minimização de Quine-MCCluskey. Os resultados obtidos para cada período destacaram as seguintes combinações: “cGiD”, “cGiD” e “cGD”, todas com elevado grau de consistência, acima de 90%, ressaltando a proximidade da relação entre conjuntos. Vale ressaltar que, embora o tamanho da amostra tenha sido diferente entre os períodos, os resultados se mantiveram próximos. Assim, constatou-se que as condições “G” e “D” se mantiveram com um elevado grau de relevância nos três períodos, porém a condição “i” que havia apresentado baixa relevância na

combinação para o período de 2000 e 2010, passou a não ter relevância na combinação única em 2019, conforme observado na Tabela 3.

No entanto, é válido ressaltar a cautela na interpretação desses resultados. Uma vez que a condição inovação “I” não tenha surgido na solução única dos três períodos analisados (rejeita H3), a variável supracitada é relevante na combinação das condições de alguns países. Além disso, segundo Faic (2021) um dos pontos chave para o processo de transição energética consiste no desenvolvimento e na difusão tecnológica.

Esses resultados confirmam as hipóteses H1 e H2 levantadas neste artigo, convergindo, parcialmente, com os encontrados por Hess e Mai (2014) e Faic (2021), i.e., dado a presente amostra e as condições selecionadas para as combinações, uma economia com elevada renda *per capita*, em conjunto, com uma elevada disponibilidade de financiamento para P&D, tende a apresentar essas variáveis como condições necessárias para que ocorra uma expansão das fontes renováveis e, conseqüentemente, avançar no processo de transição energética.

Tabela 4 – Configurações e *Outliers*

País	Config. (Ano = 2000)	Config. (Ano = 2010)	Config. (Ano = 2019)
Alemanha	CGID		
Austrália	-	CGId	Cgid
Brasil	-	-	cglD
Canadá	CgId	-	CGId
Coréia	-	-	CglD
Dinamarca	CGID	CGID	cGID
Estados Unidos	CGid	-	CGID
Eslováquia	-	cglD	-
Espanha	-	-	cglD
Estônia	-	cglD	Cgid
França	-	-	-
Finlândia	CGid	-	-
Hungria	-	-	Cgid
Irlanda	-	CGid	CGID
Noruega	-	cGId	CGID
Nova Zelândia	cglD	cglD	CGID
Países Baixos	-	CGiD	-
Portugal	cglD	cglD	-
Suécia	-	cGiD	-
Suíça	cGid	cGid	CGiD
Turquia	cglD	-	-

Fonte: Elaboração própria.

No entanto, cabe destacar que em nenhum período analisado a condição de emissão de CO₂ apresentou alta relevância para a combinação, esse resultado sugere que embora haja metas e acordos de cooperação para a mitigação das mudanças climáticas, ainda assim a descarbonização tem tido um progresso bastante lento entre

as economias (Umar; Safi, 2023). Por fim, a Tabela 4 destaca os principais *outliers* para cada período da amostra e suas respectivas combinações finais.

É oportuno ressaltar que a Dinamarca e a Nova Zelândia foram consideradas *outliers*, nos três períodos analisados, embora com combinações diferentes entre elas. No primeiro caso, com uma combinação “CGID” (2000 e 2010) e “cGID” (2019), i.e., apenas emissão de CO₂ passou a ter uma menor relevância. Parte disso, pode ser atribuído a meta de expansão das renováveis no país até 2050, com tecnologia eólica *offshore* (Irena, 2023). Para a Nova Zelândia, o dispêndio em P&D, em 2000 e 2010, era a única condição de alta relevância para promover as renováveis “E”, i.e., “cgiD” (2000 e 2010), enquanto em 2019 passou a ser apenas uma das condições de alta relevância, que combinadas com outras condições levaria a uma expansão das renováveis, i.e., “CGiD” (2019). Essas experiências sinalizam a importância do debate, especialmente, no que cerne as transições bem-sucedidas, a fim de auxiliar as economias retardatárias e em desenvolvimento.

Considerações Finais

Diante das discussões em torno da mitigação das mudanças climáticas e escassez de recursos naturais, as tecnologias renováveis têm sido apontadas como tecnologias-chave para o desafio crucial em prol de uma trajetória de desenvolvimento sustentável. Com vantagens competitivas em relação as tecnologias convencionais, desde os anos 2000, diferentes economias têm adotado vultosos investimentos para a transformação de uma matriz energética mais limpa.

Assim, com a finalidade de identificar as principais condições de incentivo ao relativo crescimento da adoção de energias renováveis de um país, o presente trabalho investigou, com base no método de Análise Comparativa Qualitativa (*fsQCA*), as interações entre as condições mais suscetíveis de fomentar a transição dos países em prol de energias renováveis. Os principais resultados destacaram que países com elevada renda *per capita* apresentam vantagens no processo de transição energética, sendo essa uma condição necessária, mas não suficiente, confirmando a hipótese 1 levantada neste estudo. Além disso, definida também como uma condição necessária, mas não suficiente, a expansão das renováveis pode ser promovida com a disponibilidade de financiamento para P&D no setor, confirmando a hipótese 2. Em outras palavras, o financiamento para P&D é uma condição necessária para o

processo de transição energética, mas não é uma condição suficiente. Em suma, esses resultados convergem com os resultados encontrado na literatura para algumas economias como, por exemplo, Alemanha, Áustria e Bélgica.

No entanto, a partir das condições dispostas não foi possível aceitar a hipótese 3, em que presumia a difusão da inovação como fundamental para o processo de transição energética, embora não suficiente. Com base na *proxy* de patentes ambientais, nenhum período analisado obteve a inovação com alta relevância “I” como solução única. Porém, a condição “I” foi relevante na solução de algumas economias, especialmente, nos casos como: do Brasil, da Coreia, da Dinamarca, dos Estados Unidos e da Espanha, no ano de 2019. Além desse aspecto, destaca-se também que a condição de emissão de CO₂ “C” não foi sinalizada como variável de alta relevância para a combinação de nenhum período na solução final. No entanto, em alguns países, tal condição apresentou relevância em suas combinações, como no caso da Austrália, Canadá, Estados Unidos, Irlanda e outros. Logo, para que o processo em prol da transição energética seja bem-sucedido, é importante destacar o papel da P&D e dos esforços direcionados ao desenvolvimento econômico e ambiental dos países.

Logo, o estudo contribui para que políticas públicas estejam associadas ao fator determinante de P&D para o processo de transição energética nos países sob estudo. Nesse âmbito, observou-se que ao longo do tempo, o processo de difusão da inovação (*catching up*) ainda é lento. Tal resultado pode ser justificado pelos obstáculos em que as nações, especialmente os países em desenvolvimento, precisam ultrapassar para que seus esforços e investimentos sejam mais articulados às questões multidisciplinares que envolvem as dimensões científicas, tecnológicas, ambientais e econômicas. Nesse caso, as políticas podem estar conectadas a acordos internacionais que envolvam o estímulo à difusão de novas tecnologias para mitigar os danos causados pelas emissões de CO₂, por exemplo.

Desse modo, apontadas como uma “janela de oportunidades” resultante da combinação de diferentes elementos, destaca-se que para que haja uma mudança estrutural do setor energético como um todo – i.e., uma transição sociotécnica sustentável – faz-se necessário, também, uma maior atenção para outros subsistemas de elevado níveis de emissões do setor (por exemplo, resfriamento, aquecimento e transporte). Assim, diante das limitações metodológicas do presente estudo, propõe-se a adoção de diferentes técnicas, bem como, a ampliação da amostra e do período, especialmente, com informações de setores estratégicos e promissores.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Aneel autoriza operação de duas termelétricas para abastecer o Amapá. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/11/aneel-autoriza-operacao-de-duas-termeletricas-para-abastecer-o-amapa> visualização 16/02/23.
- BETARELLI JUNIOR, Admir Antonio; FERREIRA, Sandro. **Introdução à Análise Qualitativa Comparativa e aos conjuntos Fuzzy (FSQCA)**. 1ª ed. Brasília: ENAP, 2018.
- BRUNDTLAND, Gro Harlem. **Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Nosso Futuro Comum**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Ed. FGV, 1991.
- BANCO MUNDIAL. **World Bank Open Data**. Disponível em: <https://data.worldbank.org/> visualização 24/02/23.
- CHN – CLIMATE HOME NEWS. **Which countries have a net zero carbon goal?** Disponível em: <https://www.climatechangenews.com/2019/06/14/countries-net-zero-climate-goal/> visualização 17/10/22.
- DELEIDI, Matteo; et al. Neither crowding in nor out: Public direct investment mobilizing private investment into renewable electricity projects. **Energy Policy**, v. 140, p. 111195, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111195>
- FAICT, Sophie. **Drivers of Renewable Energy Innovation: Why do some member states perform better than others?** Desertion: Master of Science in EU-Studies, 2021.
- GANTER, Alois, HECKER, Achim. Configurational paths to organizational innovation: qualitative comparative analyses of antecedents and contingencies. **Journal of Business Research**, v. 67, n.6, p. 1285-1292, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2013.03.004>
- GEELS, Frank. Regime resistance against low-carbon transitions: Introducing politics and power into the multi-level perspectives. **Theory, Culture & Society**, v. 31, n. 5, p. 21–40, 2014.
- GIBBS, David; O'NEILL, Kirstie. Future green economies and regional development: a research agenda. **Regional Studies**, 2016.
- GUIMARÃES, Leonam. A Geopolítica da Energia de Baixo Carbono. **Caderno Opinião: FGV Energia**, 2016.
- GUTIERREZ, Maria. A função do estado no setor de energia nos países da OCDE: equilibrando a segurança energética, a eficiência e a sustentabilidade. **Texto para discussão**, n. 2667. Brasília: Ipea, 2021.
- HAYAT, Sikandar; et al. Renewable energy R&D and natural resources: A success story of environmentally friendly financing in OECD economies. **Resources Policy**, v. 83, n. 103655, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103655>
- HESS, David; MAI, Quan. Renewable electricity policy in Asia: A qualitative comparative analysis of factors affecting sustainability transitions. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2014.04.001>

HUH, Taewook; et al. Drivers and Ideal Types towards Energy Transition: Anticipating the Futures Scenarios of OECD Countries. **International Journal Environmental Research and Public Health**, n. 16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16081441>

IEA – International Energy Agency. **Data and statistics**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics> visualização 17/10/23.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Renewable Energy Employment by Country**. Disponível em: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Benefits/Renewable-Energy-Employment-by-Country> visualização 17/10/22.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Policy analysis**. Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Policy> visualização 24/02/23.

JANNUZZI, Gilberto. Energia e Mudanças Climáticas: barreiras e oportunidades para o Brasil. **Revista com ciência**, 2005.

LEMA, Rasmus; et al. Green windows of opportunity: latecomer development in the age of transformation toward sustainability. **Industrial and Corporate Change**, v. 29, n. 5, p. 1193-1209, 2020.

LOORBACH, Derk. Sustainability Transitions Research: Transforming Science and Practice for Societal Change. **Annual Review of Environment and Resources**, p. 599–626, 2017.

LU, Yujie; et al. Pathways to Sustainable Deployment of Solar Photovoltaic Policies in 20 Leading Countries Using a Qualitative Comparative Analysis. **Sustainability**, v. 14, n. 5858, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14105858>

MATHIAS, João; et al. Green New Deal como estratégia de desenvolvimento pós-pandemia: lições da experiência internacional. **Revista Tempo do Mundo**, n. 26, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/rtm26art4>

MAZZUCATO, Mariana. **O Estado Empreendedor: Desmascarando o Mito do Setor Público vs. Setor Privado**. São Paulo: Portfolio Perquin, 2013.

MAZZUCATO, Mariana. Financing innovation: creative destruction vs. destructive creation. **Industrial and Corporate Change**, Sussex Language Institute, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1093/icc/dtt025>

MAZZUCATO, Mariana., SEMIENIUKB, Gregor. Financing renewable energy: Who is financing what and why it matters. **Technological Forecasting & Social Change** 127, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.021>

MENDEL, Jerry; KORJANI, Mohammad. Charles Ragin's Fuzzy Set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA) used for linguistic summarizations. **Information Sciences**, 202, p. 1–23, 2012.

MINGOTI, Sueli. **Análise de dados através de métodos estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Editora: Didática, 2007.

MONTENEGRO, Rosa; et al. Análise macrocomparativa da inovação ambiental (1990, 2000 e 2010). **Revista Brasileira de Inovação**, v. 17, n. 2, p. 317–344, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20396/rbi.v17i2.8651298>

NEWELL, Peter. Transformismo or transformation? The global political economy of energy transitions. **Review of International Political Economy**, 2018. DOI: 10.1080/09692290.2018.1511448

OECD – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. **Data Indicators**. <https://www.oecd.org/en/data.html> visualização 24/02/23.

POPP, David; et al. Energy, the environment, and technological change. **Handbook in Economics**, v. 02, 2010.

QADIR, Sikandar; et al. Incentives and strategies for financing the renewable energy transition: A review. **Energy Reports**, v. 7, p. 3590-3606, 2021.

RAGIN, Charles. **The Comparative Method: Moving Beyond Qualitative and Quantitative Strategies**. Berkeley: University of California Press, 1987.

RAGIN, Charles. Set Relations in Social Research: Evaluating Their Consistency and Coverage. **Political Analysis**, n. 14, p. 291–310, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1093/pan/mpj019>

RAGIN, Charles; DAVEY, Sean. **fs/QCA, version 2.5 (computer program)**. Tucson: Department of Sociology, University of Arizona, 2009.

REN21. **Renewables 2022**. Paris: REN21 Secretariat, 2022a.

REN21. **Renewable energy data in perspective**. Paris: REN21 Secretariat, 2022b.

SEDLACEK, Sabine; et al. Collaborative governance in energy regions e Experiences from an Austrian region. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, 2020.

SUN, Inkyoung; KIM, So. Energy R&D towards Sustainability: A Panel Analysis of Government Budget for Energy R&D in OECD Countries (1974–2012). **Sustainability**, v. 9, n. 4, 617, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9040617>

SCHNEIDER, Carsten; WAGEMANN, Claudius. **Set-theoretic methods for the social sciences: A guide to qualitative comparative analysis**. Cambridge University Press, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139004244>

UMAR, Muhammad; SAFI, Adnan. Do green finance and innovation matter for environmental protection? A case of OECD economies. **Energy Economics**, v. 119, n. 106560, 2023.

WAGEMANN, Claudius. ¿Quéhay de nuevoenel Método Comparado? QCA y El análisis de los conjuntos difusos. **Revista Mexicana de Análisis Político y Administración Pública**, v. 1, n. 1, p. 51-75, 2012.

WEF - World Economic Forum. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2021/10/how-cheap-can-renewable-energy-get/> visualização 17/10/22.

WURSTER, Stefan; HAGEMANN, Christian. Two ways to success expansion of renewable energies in comparison between Germany's federal states. **Energy Policy**, 119, p. 610–619, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.059>

WURSTER, Stefan; HAGEMANN, Christian. Expansion of Renewable Energy in Federal Settings: Austria, Belgium, and Germany in Comparison. **Journal of Environment & Development**, v. 29, n. 1, p. 147–168, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/1070496519887488>

NOTAS DE AUTOR

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Lindomayara França Ferreira – Concepção, elaboração do manuscrito, coleta de dados, análise de dados, revisão e aprovação da versão final do trabalho.

Jamaika Prado – Análise de dados, revisão e aprovação da versão final do trabalho.

Rosa Livia Gonçalves Montenegro – Elaboração do manuscrito, participação ativa da discussão dos resultados, revisão e aprovação da versão final do trabalho.

FINANCIAMENTO

Lindomayara França Ferreira – Bolsista de Pós-Graduação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Jamaika Prado – Bolsista de Pós-Graduação da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG)

Rosa Livia Gonçalves Montenegro – Bolsista de Produtividade em Pesquisa - PQ2 (Processo: 312108/2022-2)

CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica.

APROVAÇÃO DE COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica.

CONFLITO DE INTERESSES

Não se aplica.

LICENÇA DE USO

Este artigo está licenciado sob a [Licença Creative Commons CC-BY-NC](#). Com essa licença você pode compartilhar, adaptar, criar para qualquer fim, sem uso comercial e desde que atribua a autoria da obra.

HISTÓRICO

Recebido em: 07-07-2023

Aprovado em: 13-04-2024

Tabela A – Configurações lógicas e suficientes

Ano = 2000					
Consistência Y vs consistência N					
Conf.	Y	N	F	P	N. países
cGiD	0.95	0.7	5.34	0.032	1
Consistência Y vs todas as outras consistências Y					
Conf.	Y	1-Y	F	P	N. países
cGid	0.871	0.655	10.37	0.005	1
cGiD	0.95	0.655	32.27	0.000	1
cGld	0.905	0.649	18.75	0.000	1
cGID	0.947	0.657	29.60	0.000	0
Cgid	0.827	0.657	9.25	0.007	0
CgiD	0.841	0.657	6.20	0.022	0
CGld	0.844	0.657	9.14	0.007	0
Consistência Y vs valor-t definido					
Conf.	Y	Valor-t	F	P	N. países
cGiD	0.95	0.8	23.90	0.000	1
cGID	0.947	0.8	21.57	0.000	0
Ano = 2010					
Consistência Y vs consistência N					
Conf.	Y	N	F	P	N. países
cgid	0.691	0.9	2.01	0.170	2
cgiD	0.854	0.813	0.07	0.798	1
cglD	0.788	0.929	1.82	0.191	1
cgID	0.856	0.682	1.60	0.218	4
cGid	0.887	0.773	0.63	0.437	1
cGiD	0.884	0.636	2.49	0.128	1
cGld	0.852	0.784	0.15	0.702	1
cGID	0.842	0.762	0.18	0.671	1
Cgid	0.661	0.878	1.89	0.183	2
CgiD	0.792	0.854	0.16	0.696	0
Cgld	0.683	0.933	3.21	0.086	1
CgID	0.75	0.87	0.50	0.486	1
CGid	0.815	0.748	0.19	0.664	3
CGiD	0.759	0.784	0.02	0.885	2
CGld	0.752	0.829	0.18	0.677	1
CGID	0.814	0.761	0.11	0.741	2
Consistência Y vs todas as outras consistências Y					
Conf.	Y	1-Y	F	P	N. países
cgid	0.691	0.715	0.06	0.817	2
cgiD	0.854	0.692	5.07	0.034	1
cglD	0.788	0.695	2.69	0.115	1
cgID	0.856	0.679	7.68	0.011	4
cGid	0.887	0.692	9.62	0.005	1
cGiD	0.884	0.681	8.64	0.007	1
cGld	0.852	0.692	6.29	0.020	1
cGID	0.842	0.699	2.14	0.157	1
Cgid	0.661	0.701	0.24	0.632	2
CgiD	0.792	0.693	1.40	0.249	0
Cgld	0.683	0.695	0.02	0.886	1
CgID	0.75	0.703	0.20	0.658	1
CGid	0.815	0.693	3.39	0.078	3
CGiD	0.759	0.71	0.29	0.594	2
CGld	0.752	0.707	0.28	0.605	1
CGID	0.814	0.69	3.31	0.082	2

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A – Configurações lógicas e suficientes (Continuação)

Consistência Y vs valor-t definido					
Conf.	Y	Valor-t	F	P	N. países
cgid	0.691	0.8	1.01	0.325	2
cgiD	0.854	0.8	0.40	0.533	1
cglD	0.788	0.8	0.03	0.869	1
cglD	0.856	0.8	0.75	0.396	4
cGid	0.887	0.8	1.62	0.216	1
cGiD	0.884	0.8	1.27	0.272	1
cGld	0.852	0.8	0.51	0.481	1
cGID	0.842	0.8	0.14	0.709	1
Cgid	0.661	0.8	1.69	0.207	2
CgiD	0.792	0.8	0.01	0.938	0
Cgld	0.683	0.8	1.13	0.300	1
CglD	0.75	0.8	0.16	0.692	1
CGid	0.815	0.8	0.04	0.839	3
CGiD	0.759	0.8	0.18	0.68	2
CGld	0.752	0.8	0.23	0.637	1
CGID	0.814	0.8	0.03	0.874	2
Ano = 2019					
Consistência Y vs consistência N					
Conf.	Y	N	F	P	N. países
cGiD	0.974	0.71	6.09	0.020	2
cGID	0.946	0.698	5.02	0.033	2
Consistência Y vs todas as outras consistências Y					
Conf.	Y	1-Y	F	P	N. países
cgiD	0.941	0.68	20.49	0.000	1
cglD	0.89	0.679	9.09	0.005	2
cglD	0.902	0.684	8.63	0.006	3
cGid	0.95	0.683	26.49	0.000	0
cGiD	0.974	0.679	24.69	0.000	2
cGld	0.927	0.687	15.98	0.000	1
cGID	0.946	0.676	18.07	0.000	2
Cgld	0.832	0.687	4.63	0.040	1
CGld	0.85	0.676	11.5	0.002	2
Consistência Y vs valor-t definido					
Conf.	Y	Valor-t	F	P	N. países
cgiD	0.941	0.8	13.63	0.001	1
cglD	0.902	0.8	4.75	0.038	3
cGid	0.95	0.8	28.34	0.000	0
cGiD	0.974	0.8	68.45	0.000	2
cGld	0.927	0.8	14.76	0.001	1
cGID	0.946	0.8	17.94	0.000	2

Fonte: Elaboração própria.