

## **Transição energética em nível subnacional a partir do Trilema Energético: caso do estado do Ceará**

**MARCOS ANTONIO CAVALCANTE DE OLIVEIRA JÚNIOR**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

**MÔNICA CAVALCANTI SÁ DE ABREU**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

**FLÁVIA MENDES DE ALMEIDA COLLAÇO**  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

**DAVID CARNEIRO DE SOUZA**  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ (IFCE)

**JOSÉ SERGIO PEREIRA DE OLIVEIRA FILHO**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

Agradecimento à orgão de fomento:

Agradecemos ao apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Brasil (Processo: 405954/2022-0) e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Piauí - FAPEPI.

## **Transição energética em nível subnacional a partir do Trilema Energético: caso do estado do Ceará**

### **INTRODUÇÃO**

À medida que as mudanças climáticas se intensificam, os impactos nos sistemas naturais e humanos se tornam mais severos (Pearce-Higgins et al., 2022), motivando discussões sobre políticas públicas de mitigação, especialmente no setor energético. O IPCC (2014) destaca a relação estreita entre mudanças climáticas e energia, incluindo demanda, produção, consumo e armazenamento, ressaltando a centralidade desse tema em seus relatórios. A transição energética atual visa enfrentar as mudanças climáticas, reduzir a dependência de fontes não renováveis e buscar alternativas mais sustentáveis para a geração de energia e pesquisas recentes (Kim, Soh & Cho, 2022; Gomez-Echeverri, 2018) apontam para a necessidade de substituir fontes fósseis por renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica, para uma matriz energética mais sustentável.

Para avançar nessa transição, gestores necessitam de instrumentos que auxiliem no planejamento e tomada de decisão. Estudos indicam desafios no desenvolvimento de indicadores e métricas para orientar políticas públicas climáticas (Pearce-Higgins et al., 2022). Adger et al. (2005) e Schoenefeld, Schulze e Bruch (2022) ressaltam a falta de consenso sobre o uso de indicadores para monitoramento. Exemplos de métricas incluem o Trilema Energético do Conselho Mundial de Energia e os Índices de Segurança Energética dos EUA e Internacional. Autores como Heffron, McCauley e Sovacool (2015), Heffron, McCauley e De Rubens (2018), e Parovic e Kljajić (2022) avaliam a transição justa em nível nacional através de dimensões e indicadores. Singh et al. (2019) também avaliaram a transição energética em 115 países pelo Índice de Transição Energética (ETI) do Fórum Econômico Mundial. Estudos buscam medir elementos da transição energética, como segurança e equidade, para promover uma transição mais justa e sustentável. Ainou, Aali e Sadiq (2023) avaliaram a segurança energética do Marrocos em quatro dimensões: disponibilidade de recursos, aplicabilidade tecnológica, aceitabilidade ambiental e social, e acesso à energia.

Nesse contexto, a pesquisa identifica a necessidade de uma abordagem que analise a transição energética em nível subnacional ou local, pois de forma geral os estudos focam no nível global e nacional (Heffron, Mccauley & Sovacool, 2015; Parovic & Kljajić, 2022). Nikodemus e Hajek (2022) e sugerem que futuras pesquisas avaliem estratégias em nível local (Nikodemus & Hajek, 2022; Swarnakar & Singh, 2022; Ohlhorst, 2015; Lazaro et al., 2022; Maliszewska-Nienartowicz & Stefański, 2024). Observa-se que diversos modelos, como a Métrica de Justiça Energética (EJM) de Heffron, McCauley e Sovacool (2015) e Parovic e Kljajić (2022), avaliam a transição energética em nível global e nacional, ressaltando assim, a importância de uma abordagem mais descentralizada.

Esses sistemas de monitoramento e métricas podem auxiliar na criação de políticas e estruturas de governança energética em resposta às mudanças climáticas (Zhang et al., 2016) e diante da gravidade dos efeitos climáticos, governos e instituições internacionais têm um papel crucial na busca de meios políticos e gerenciais mais eficazes (Norton et al., 2020). A literatura identifica a existência de desafios na evolução dos sistemas institucionais para combinar objetivos sociais, econômicos e ambientais de forma mais eficaz (Norton et al., 2020). Outro gap é que a maioria dos estudos sobre transição energética focam nos países do Norte Global (Heffron, Mccauley & Sovacool, 2015; Parovic & Kljajić, 2022), havendo poucos que abordam a perspectiva dos países do Sul Global. A literatura apresenta lacunas sobre as dinâmicas da transição energética em países em desenvolvimento e emergentes, considerando seus estágios de desenvolvimento econômico e político (Kim, Soh & Cho, 2022). Este estudo aborda a perspectiva do Sul Global, que enfrenta problemas históricos de desigualdades socioeconômicas (Ngcamu, 2023), buscando assim suprir essa lacuna teórica

e empírica (SWARNAKAR; SINGH, 2022). No Brasil, há poucas pesquisas sobre transição energética. Dados da Capes (2024) indicam apenas oito teses concluídas, nenhuma com modelos ou métricas de transição energética, especialmente em nível subnacional ou local.

Diante disso, a problemática do estudo é responder se: a proposição de um sistema de monitoramento em nível subnacional pode servir como um instrumento que identifique o atual contexto e status da transição energética em nível subnacional? Assim, o objetivo geral do estudo é propor um Sistema de Monitoramento da transição energética em nível subnacional. De forma específica, o estudo busca: apresentar o Sistema de Monitoramento da Transição Energética em nível subnacional a partir do Trilema Energético; avaliar a direção vetorial e o nível de intensidade da transição energética no estado objeto de estudo; e avaliar o atual status da transição energética em nível subnacional a partir do Sistema de Monitoramento proposto e dos dados do estado do Ceará. Assim, a escolha do estado do Ceará para a análise do Sistema de Monitoramento e do Trilema Energético em nível subnacional deve-se pelo estado estar na vanguarda na criação de políticas públicas para a transição energética. Além de ser um dos dois estados brasileiros com legislação específica sobre o tema, sendo o único no Nordeste focado em transição energética justa. O Ceará também se destaca pelo significativo investimento na diversificação de sua matriz de produção de energia renovável, incluindo uma parcela considerável de geração fóssil (termelétrica), proporcionando uma base sólida para discussões teóricas e empíricas.

## **REFERENCIAL TEÓRICO**

### **A Transição Energética no Sul Global: Desafios e Oportunidades**

As discussões sobre a transição energética têm raízes históricas, com a Revolução Industrial marcando a mudança de energia humana e animal para carvão, petróleo e gás natural. No século XX, a energia elétrica se expandiu, adotando fontes como hidrelétrica, nuclear, petróleo e gás. Atualmente, a transição é impulsionada pela necessidade de combater as mudanças climáticas, reduzir a dependência de fontes não renováveis e promover fontes sustentáveis como solar e eólica. Esta transição visa substituir fontes convencionais por renováveis, desenvolvendo tecnologias como turbinas eólicas e painéis solares (Tian et al., 2022; Li et al., 2023; IEA, 2022). Em 2019, renováveis representavam apenas 14% da demanda global de energia (IEA, 2019), indicando a necessidade de mudanças significativas (Kabeyi & Olanrewaju, 2022). Apesar de seu potencial, a transição enfrenta críticas devido à diferença qualitativa entre fósseis e renováveis, que são intermitentes e têm menor densidade energética, exigindo mais insumos e espaço. Estudos destacam que o Retorno sobre o Investimento em Energia (EROI) é menor para renováveis, sublinhando a necessidade de transformações socioeconômicas profundas (Capellán-Pérez, De Castro & González, 2019; Hall, Lambert & Balogh, 2014). A transição energética é motivada pela busca por segurança energética e redução de custos (Zhao & You, 2020; Nguyen et al., 2021). Mesmo com o aumento de investimentos, desafios permanecem, especialmente em reduzir custos nos países em desenvolvimento (Tian et al., 2022).

O setor energético, ainda dependente de fósseis, é responsável por cerca de 73% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (IPCC). A transição para uma economia de carbono zero é um dos principais desafios, com o setor de energia liderando o esforço (Yang et al., 2024). A descarbonização é abordada de várias perspectivas, incluindo tecnológica, econômica e de segurança energética (Ruhnau et al., 2019; Lebling et al., 2020; Burandt et al., 2019; Pfenninger & Keirstead, 2015). A transição deve considerar a redução das desigualdades socioeconômicas e a justiça energética, garantindo acesso universal à energia e criação de empregos (Cantarero, 2020). A transição energética pode empoderar comunidades, aumentando a independência energética e abordando injustiças ambientais (Outka, 2012;

Ottinger, 2013).

No Sul Global, a transição enfrenta desafios como ineficiência da infraestrutura de rede, altos custos de capital e baixa taxa de eletrificação (Babayomi, Dahoro & Zhang, 2022). Esses países emitiram historicamente menos carbono que o Norte Global, mas enfrentam desigualdades socioeconômicas que afetam suas trajetórias de transição (Müller, Schulze & Schöneich, 2023). A prioridade dos países em desenvolvimento é a industrialização com uso de fontes de baixo carbono (Babayomi, Dahoro & Zhang, 2022). Tecnologias existentes podem melhorar a eficiência e acessibilidade dos sistemas energéticos renováveis, reduzindo custos. Iniciativas locais, apoiadas por governos, podem melhorar a sustentabilidade dos sistemas energéticos, como exemplificado pelo envolvimento comunitário em Marrocos (Haddad et al., 2022). O papel das corporações privadas é crucial, pois seus recursos financeiros podem acelerar a transição (Walwyn & Kraemer-Mbula, 2021).

A participação do capital privado pode reduzir custos de financiamento e riscos dos projetos de energias renováveis, impulsionando a descarbonização no Sul Global (Sweerts, Dalla Longa & Van Der Zwaan, 2019). Exemplos como o Programa de Aquisição de Produtores de Energia Independentes de Energia Renovável da África do Sul mostram como reduzir riscos de investimento e atrair capital privado para diversificação energética (Eberhard & Naude, 2016). Portanto, a transição no Sul Global deve integrar fatores locais, regionais, históricos e socioeconômicos, buscando estratégias que promovam justiça social e mitiguem impactos ambientais.

### **Perspectivas Globais e Desafios do Trilema Energético**

O Trilema Energético é um conceito central na governança energética, equilibrando três dimensões: econômica (financiamento do setor), política (segurança energética) e ambiental (mitigação das mudanças climáticas) (Setyowati, 2020). Esses objetivos frequentemente competem entre si, criando desafios para a transição energética. Para lidar com essas dimensões, é essencial adotar uma abordagem equilibrada que atenda às necessidades da sociedade (Jing et al., 2021). A representação gráfica do trilema energético ajuda a visualizar cenários da transição, orientando políticas públicas sustentáveis e investimentos em infraestrutura, economia e ações ambientais. Diversas perspectivas na literatura abordam o Trilema Energético. Marti e Puertas (2022) o analisam sob a ótica do desenvolvimento sustentável, enquanto Nawaz e Alvi (2018) examinam a segurança energética e sua relação com a sustentabilidade socioeconômica e ambiental. Outros estudos associam o trilema ao crescimento econômico de um país (Gasparatos & Gadda, 2009; Prado et al., 2016). O Conselho Mundial de Energia (WETI) desde 2010, destaca as dimensões de segurança energética, equidade energética e sustentabilidade ambiental (WETI, 2024). Khan et al. (2021) e Liu et al. (2022) utilizam esse índice para examinar o crescimento econômico e a qualidade ambiental, enfatizando a necessidade de uma transição energética limpa e renovável.

O Índice de Transições Energéticas (ETI) do Fórum Econômico Mundial também oferece uma visão do trilema com dimensões de desenvolvimento econômico, sustentabilidade e segurança energética (Singh et al., 2019). Estudos como os de Parovic e Kljajić (2022) e Heffron, McCauley & De Rubens (2018) analisam essas dimensões com foco na transição energética justa. Weiss et al. (2020) recomendam políticas para a transição energética na Suíça, destacando a importância de compreender a interação entre políticas internacionais e nacionais e destacando mais uma vez que o principal desafio é equilíbrio das três dimensões do Trilema Energético.

Estudos focados em dimensões individuais do trilema, como segurança energética (Mahmood & Ayaz, 2018; Le & Nguyen, 2019), equidade energética (Tomei e Gent, 2015)

e sustentabilidade ambiental (Mohapatra et al., 2016; Naeem et al., 2020; Luo et al., 2021), oferecem insights sobre suas influências na transição energética. As análises do Trilema Energético geralmente consideram níveis globais e nacionais (Le & Nguyen, 2019; Fu et al., 2021; Khan et al., 2021; Marti & Puertas, 2022; Heffron, McCauley & De Rubens, 2018; La Viña et al., 2018; Weiss et al., 2020). No entanto, é crucial expandir esses estudos para níveis regionais e locais para capturar a complexidade e as necessidades específicas de cada contexto.

O artigo fundamenta-se em modelos e métricas de sistemas de monitoramento relacionados à transição energética, transição energética justa e o Trilema Energético. Heffron, McCauley & De Rubens (2018) propuseram a Métrica de Justiça Energética (EJM), que quantifica a justiça energética ao longo do ciclo energético, enfatizando a justiça distributiva e a necessidade de equilibrar dimensões econômicas, políticas e ambientais. Singh et al. (2019) apresentaram o Índice de Transições Energéticas (ETI) do Fórum Econômico Mundial, que mede o desempenho e a prontidão para a transição energética a nível nacional. Parovic & Kljajić (2022) propuseram novos indicadores para o Trilema Energético, equilibrando segurança energética, sustentabilidade ambiental e capital energético, utilizando um gráfico ternário para analisar desequilíbrios e propor ajustes nas políticas energéticas. O Trilema Energético do Conselho Mundial de Energia classifica o desempenho energético de 127 países em segurança energética, equidade energética e sustentabilidade ambiental, avaliando a capacidade de atender à demanda energética, garantir acesso equitativo à energia e minimizar danos ambientais, sendo que o relatório de 2022 identificou novas áreas de preocupação, como o nexo água/energia, escassez de combustíveis, armazenamento de energia e transição energética justa.

Outras métricas de segurança energética, como o Índice de Segurança Energética dos Estados Unidos e o Índice de Segurança Energética Mundial, fornecem insights adicionais sobre a segurança, equidade, intensidade e eficiência do setor energético. Esses modelos e índices oferecem uma base sólida para medir a transição e a justiça energética, destacando a importância de equilibrar dimensões econômicas, políticas e ambientais. O artigo propõe avançar nas métricas e análises, considerando contextos regionais e subnacionais, para promover uma transição energética justa e sustentável.

## **METODOLOGIA**

A pesquisa quali-quantitativa propõe um sistema de monitoramento para políticas públicas de transição energética, com aspectos exploratórios e descritivos. A metodologia é dividida em cinco etapas principais. A primeira etapa, Validação Teórica e Conceitual, envolve a revisão de sistemas de monitoramento, métricas e indicadores relacionados à transição energética e transição energética justa. Os critérios para escolha das dimensões e indicadores incluem confiabilidade, temporalidade, qualidade dos dados e completude, com foco no setor de eletricidade. A segunda etapa, Validação com Especialistas, utiliza os resultados da etapa anterior para criar um modelo conceitual que será validado por especialistas de mercado e acadêmicos, assegurando a robustez necessária para avançar no estudo. Na terceira etapa, Construção da Base de Dados, são avaliadas e construídas bases de dados que contemplam todos os estados brasileiros, abrangendo os anos de 2018 a 2022. A quarta etapa, Concepção Vetorial e Tridimensional do Trilema Energético, desenvolve o modelo do Trilema Energético em nível subnacional para o estado do Ceará, identificando possíveis políticas públicas, limitações e direcionamentos para uma transição energética mais justa e sustentável. A pesquisa examina o contexto socioambiental emergente através de revisão bibliográfica e análise documental, enquanto a perspectiva quantitativa envolve a construção e apresentação do modelo do Sistema de Monitoramento da transição energética em nível subnacional.

## Construção do Sistema de Monitoramento da Transição Energética em Nível Subnacional

O desenvolvimento do Sistema de Monitoramento da transição energética em nível subnacional seguiu etapas estruturadas para garantir a robustez do modelo. Primeiramente, realizou-se uma validação teórica e conceitual, com uma revisão detalhada de publicações e índices relacionados à transição energética. Esta fase utilizou pesquisa bibliográfica e documental para validar teoricamente os indicadores e dimensões adaptáveis à escala subnacional. A revisão da literatura revelou a ausência de métricas específicas para contextos regionais e locais, focando principalmente em níveis nacionais. Com base nas diretrizes teóricas, o estudo propõe um modelo do Trilema Energético em Nível Subnacional, centrado nas dimensões de Segurança Energética, Equidade Energética e Gestão Ambiental, com foco (escopo) no setor de eletricidade.

Os indicadores foram selecionados para capturar essas dimensões de forma abrangente. Na dimensão de Segurança Energética, os indicadores avaliam a capacidade dos estados em satisfazer a demanda de eletricidade de maneira confiável e resiliente, incluindo a integração de energias renováveis. A dimensão de Equidade Energética examina a universalização do acesso à eletricidade, o custo para os usuários e seu impacto na renda, além de avaliar o suporte financeiro para a transição energética e o acesso de populações vulneráveis à energia. Por fim, a dimensão de Gestão Ambiental busca mitigar danos ambientais, considerando o impacto das mudanças climáticas e a participação dos estados nas emissões de gases de efeito estufa.

Após a validação teórica, o modelo foi submetido a uma segunda etapa de validação com especialistas de mercado e acadêmicos. Utilizando a dinâmica World Café, especialistas do setor energético brasileiro e acadêmicos discutiram e avaliaram os 38 indicadores propostos. A análise crítica resultante validou e refinou o Sistema de Monitoramento da transição energética em nível subnacional. Dessa forma, as etapas de validação teórica e a interação com especialistas permitiram a construção de um modelo robusto e adaptado às necessidades específicas da transição energética em contextos subnacionais, contribuindo para uma análise mais detalhada e contextualizada dessa complexa temática socioambiental emergente.

## Construção do índice do Trilema energético a partir do Sistema de Monitoramento

Esta etapa se propõe a construir o Trilema Energético em nível subnacional a partir do sistema de monitoramento proposto. O resultado desta etapa busca entregar uma representação em escala tridimensional e vetorial do atual status da transição energética em nível subnacional. Com base nas dimensões e indicadores selecionados para o Sistema de Monitoramento da transição Energética em nível subnacional foram construídos todas as bases de dados. A seleção dos dados seguiu: 1) critérios de seleção; 2) dados disponíveis entre os anos de 2018 a 2022; 3) dados a nível estadual. Utilizando a base de dados da etapa anterior, todos os indicadores de cada dimensão foram avaliados em uma escala com variação de 1 a 10 (pior resultado para melhor resultado). Os parâmetros de escalonamento da métrica para o cálculo do trilema energético em nível subnacional é representado na tabela 1 utilizando do base o modelo adaptado do trilema energético de Parovic e Kljajić (2022).

**Tabela 1:** Parâmetros de escalonamento da métrica para o cálculo do Trilema Energético em nível subnacional

Valores das escalas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zonas das escalas	Fraca		Média			Boa			Superior	

Fonte: Adaptado de Parovic e Kljajić (2022).

Para construção dos índices dos estados utilizou-se o *software Excel*. Os indicadores

da dimensão Equidade Energética (EE) foram nomeados:  $e_i, i = 1, \dots, 9$ , onde:  $e_1$  – Participação da energia elétrica na renda média da população;  $e_2$  – Índice de endividamento dos estados;  $e_3$  – Subsídios à energia renovável (%);  $e_4$  – Intensidade energética do estado;  $e_5$  – IDH;  $e_6$  – Índice de GINI;  $e_7$  – Índice de usuários cadastrados em tarifa social por estado;  $e_8$  – Taxa de eletrificação;  $e_9$  – Capacidade instalada Mini e Micro Geração Distribuída. Assim, para a dimensão de EE foi atribuída uma média das notas dos nove indicadores. A média da dimensão EE é representada pela fórmula:

$$EE = \frac{\sum_{i=1}^9 e_i}{9}$$

Os indicadores da dimensão Segurança Energética (SE) foram nomeados:  $s_i, i = 1, \dots, 9$ , onde:  $s_1$  – Consumo de energia per capita;  $s_2$  – Qualidade do fornecimento de eletricidade;  $s_3$  – Fornecimento de energia per capita;  $s_4$  – Quota de eletricidade proveniente de fontes renováveis;  $s_5$  – Total de geração fotovoltaica por estado;  $s_6$  – Total de geração eólica por estado;  $s_7$  – Capacidade instalada de geração elétrica (renovável);  $s_8$  – Consumo de energia elétrica pelo total de usuários da rede;  $s_9$  – Índice de importação/exportação de energia. Assim, para a dimensão de SE foi atribuída uma média das notas dos nove indicadores. A média da dimensão SE é representada pela fórmula:

$$SE = \frac{\sum_{i=1}^9 s_i}{9}$$

Os indicadores da dimensão Gestão Ambiental (AM) foram nomeados:  $a_i, i = 1, \dots, 10$ , onde:  $a_1$  – Consumo de água per capita;  $a_2$  – População sem acesso a água;  $a_3$  – Cobertura de Saneamento básico - população com acesso a rede de esgoto;  $a_4$  – Índice de Esgoto tratado;  $a_5$  – Emissões de Gases do Efeito Estufa – GEE;  $a_6$  – Mortes por problemas respiratórios;  $a_7$  – Taxa de desmatamento;  $a_8$  – Mortes por eventos extremos e desastres climáticos;  $a_9$  – Afetados por eventos extremos e desastres climáticos;  $a_{10}$  – Danos por eventos extremos e desastres climáticos. Assim, para a dimensão AM foi atribuída uma média das notas dos dez indicadores. A média da dimensão AM é representada pela fórmula:

$$AM = \frac{\sum_{i=1}^{10} a_i}{10}$$

Após o cálculo das médias das dimensões, de forma complementar, foram calculadas as médias das médias de cada dimensão para a obtenção do Índice do Trilema Energético (TE) em nível subnacional dos estados brasileiros, assim como nos modelos anteriores. Assim, foi obtido a média geral das méidas das dimensões de Equidade Energética (EE), Segurança energética (SE) e Gestão Ambiental (AM) conforme a fórmula abaixo:  $TE = \frac{EE+SE+AM}{3}$

Assim, após esta etapa obteve-se o índice do Trilema Enegetico em nível subnacional de todos os estados brasileiros nos últimos 5 anos (entre 2018 e 2022). Todos esses dados foram organizados em uma planilha de dados com o uso do software Excel.

### **Construção modelo vetorial e tridimensional do Trilema Energético Subnacional a partir do Sistema de Monitoramento**

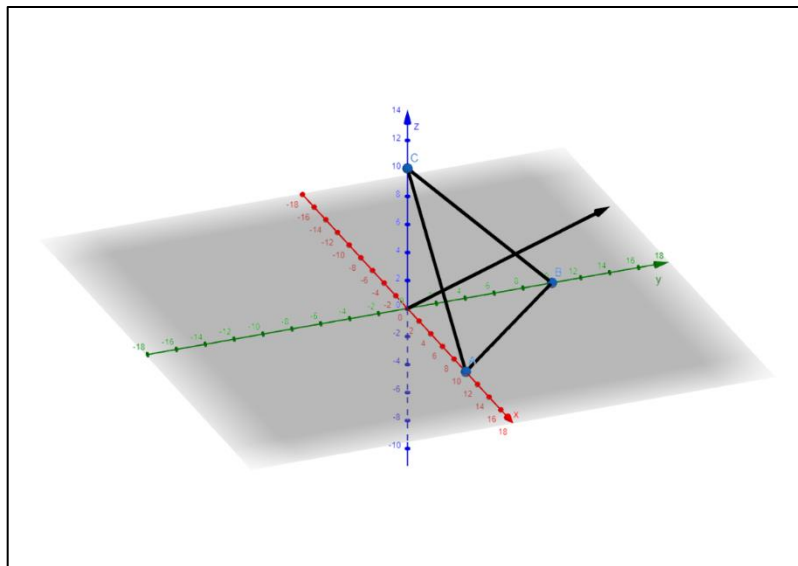
O uso de *softwares*, aplicativos e modelos informatizados têm possibilitado eficiência da gestão pública, através da implementação de suporte para modelos matemáticos, como vemos em Fernandes (2013). Para esses objetivos, neste artigo, a proposta de gestão da transição energética será modelada, de forma inédita, vetorialmente pelo *software* GeoGebra. O GeoGebra é uma ferramenta de modelagem matemática de fácil implementação, com funções de biblioteca para conceitos geométricos, algébricos, vetoriais e analíticos. Em Kenski (2005), a utilização das tecnologias da informação e comunicação, bem como o uso de aplicativos do tipo GeoGebra nas salas de aulas ou pesquisas, é pressuposto para uma

prática inovadora e este aprendizado servirá de subsídios para a criação do modelo vetorial do Trilema Energético. Assim, para construção do modelo utilizou-se o *software* Geogebra. Iniciando-se pela construção do modelo “ideal” do Trilema Energético em nível subnacional. Para isso, parametrizou-se que os eixos teriam valor igual a 1, sendo Equidade Energética (a) = 1, Segurança Energética (b) = 1 e Gestão Ambiental (c) = 1. Após a definição dos eixos foram construídos os segmentos de reta para ligar os pontos dos eixos (Segmento AB, BC e CA). Em seguida, foi construído o vetor do Trilema, conforme equação abaixo:  $u = \text{Vetor}((0,0,0), (a, b, c))$ , onde:

$$u = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

Em seguida, foi inserida a equação que mede o tamanho do vetor  $u$  conforme equação:  $\| u \| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$

Assim, a figura 1 apresenta o modelo “ideal” do Trilema Energético em nível subnacional. A partir do modelo apresentado, foram calculados os índices de cada dimensão dos estados brasileiros entre os anos de 2018 e 2022 para obtenção dos vetores de cada estado por ano. Os índices darão resposta ao terceiro objetivo específico, que é analisar e identificar a partir da direção vetorial dos dados apresentados na etapa anterior, assim como as direções ou caminhos a serem percorridos pelos estados para uma transição energética e de que forma esses estados podem intervir através da implementação de políticas públicas rumo a transição energética.



**Figura 1:** Vetor do Trilema Energético em nível subnacional

Com a obtenção dos vetores, o modelo busca demonstrar o nível de intensidade com que a transição energética vem acontecendo nos estados. Esta definição, além de apresentar os estados que estão mais próximos de uma transição equilibrada e os que estão mais distantes do modelo ideal, mostra o nível de esforço de cada estado em atingir uma transição energética mais justa e equilibrada. A representação matemática do índice de intensidade ( $i$ ) é obtido através da equação:  $i = \frac{\|x\|}{\|u\|}$ , em que:  $\|u\|$  representa o tamanho do vetor ideal e  $\|x\|$  representa o tamanho do vetor do estado no ano específico. Os dados e representações gráficas serão discutidos e apresentados na seção dos resultados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Proposição do Sistema de Monitoramento da Transição Energética em nível



## subnacional

O modelo proposto inicialmente sintetiza dimensões e indicadores de diversos autores como Heffron, McCauley & Sovacool (2015); Heffron & McCauley (2017); Heffron, McCauley & De Rubens (2018), Singh et al. (2019) e Parovic & Kljajić (2022). Foram também considerados os indicadores e dimensões dos modelos do Conselho Mundial de Energia, Índice de Segurança Energética dos Estados Unidos e Índice de Segurança Energética Internacional. Após análise da literatura, foram selecionados 86 indicadores divididos em 3 dimensões. Na primeira etapa de validação teórica e conceitual, refinaram-se os critérios de inclusão e exclusão, resultando na escolha de 40 indicadores distribuídos em Equidade Energética (15 indicadores), Segurança Energética (12 indicadores) e Sustentabilidade Ambiental (13 indicadores). Prosseguindo para a segunda etapa de validação, especialistas de mercado participaram de dinâmicas World Café em novembro de 2023, onde avaliaram os indicadores e dimensões. As discussões foram gravadas, transcritas e criticamente analisadas em dezembro de 2023 e janeiro de 2024.

Na validação com especialistas acadêmicos, apresentou-se um modelo com 38 indicadores após revisão crítica. Após essa fase, foram selecionados 28 indicadores finais: 09 para Equidade Energética, 09 para Segurança Energética e 10 para Gestão Ambiental, conforme detalhado no quadro 1 com a fonte da base de dados. Os resultados foram organizados no Excel para futuras aplicações e divulgação pública, contendo descrições de indicadores, links de origem, fórmulas de cálculo, embasamento teórico ou empírico, escala e observações relevantes. Posteriormente, foram coletados dados dos 27 estados brasileiros entre 2018 e 2022, utilizando fontes como IBGE, EPE, Portal da Transparência, ANEEL, ANA, Datasus, Ministério do Meio Ambiente, entre outros, selecionados pela confiabilidade e atualidade. Essa etapa incluiu pesquisa documental para coleta de dados secundários de diversas plataformas e organizações sociais, garantindo uma base robusta para análise da transição energética em nível subnacional, sem utilizar dados de 2023 devido à disponibilidade limitada na época da coleta.

**Quadro 1:** Sistema de Monitoramento em Nível Subnacional – após a etapa de validação por especialistas de mercado e especialistas acadêmicos

Dimensão	Var	Indicador	Fonte de dados
EE	e01	Participação da energia elétrica na renda média da população	Empresa de Pesquisa Energética – EPE; Empresa Brasileira de Geografia e Estatística – IBGE; Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL
	e02	Índice de endividamento dos estados	Tesouro Nacional Transparente; Empresa Brasileira de Geografia e Estatística – IBGE
	e03	Subsídios à energia renovável (%)	Subsidiômetro da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL
	e04	Intensidade energética do estado	Empresa de Pesquisa Energética – EPE; IBGE
	e05	IDH	Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil. Pnud Brasil, Ipea e FJP, 2022; Empresa Brasileira de Geografia e Estatística – IBGE
	e06	Índice de GINI	Empresa Brasileira de Geografia e Estatística – IBGE
	e07	Índice de usuários cadastrados em tarifa social por estado	Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL
	e08	Taxa de Eletrificação	Portal do Governo Brasileiro – ODS Brasil ( <a href="https://odsbrasil.gov.br">https://odsbrasil.gov.br</a> )
	e09	Capacidade instalada de mini e micro geração distribuída	Empresa de Pesquisa Energética – EPE
SE	s01	Consumo de energia per capita	Empresa de Pesquisa Energética – EPE; Empresa Brasileira de Geografia e Estatística – IBGE
	s02	Qualidade do fornecimento de eletricidade	Relatório IASC (Índice ANEEL de Satisfação do Consumidor) da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL
	s03	Fornecimento de energia per capita	Série Histórica do Relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética – EPE; Empresa Brasileira de Geografia e Estatística – IBGE
	s04	Quota de eletricidade proveniente de fontes renováveis	Série Histórica do Relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética – EPE;
	s05	Total de geração fotovoltaica por estado	Série Histórica do Relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética – EPE;

	s06	Total de geração eólica por estado	Série Histórica do Relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética – EPE;
	s07	Capacidade instalada de geração elétrica (renovável)	Série Histórica do Relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética – EPE;
	s08	Consumo de energia elétrica pelo total de usuários da rede	Anuário Interativo da Empresa de Pesquisa Energética – EPE;
	s09	Índice de importação/exportação de energia	Série Histórica do Relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética – EPE;
AM	a01	Consumo de água per capita	Painel Saneamento Brasil do Instituto Trata Brasil – ITB
	a02	População sem acesso a água	Painel Saneamento Brasil do Instituto Trata Brasil – ITB
	a03	Cobertura de saneamento básico – população com acesso a rede de esgoto	Agência Nacional de Águas – ANA
	a04	Índice de esgoto tratado	Painel de Regionalização dos Serviços de Saneamento Básico no Brasil do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) vinculado ao Ministério das Cidades (MCid), por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA)
	a05	Emissões de Gases do Efeito Estufa – GEE	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) do Observatório do Clima; Empresa Brasileira de Geografia e Estatística – IBGE
	a06	Mortes por problemas respiratórios	Ministério da Saúde através do DATASUS do Sistema Único de Saúde (SUS)
	a07	Taxa de desmatamento	MapBiomass; Plataforma TerraBrasilis desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
	a08	Mortes por eventos extremos e desastres climáticos	Atlas Digital de Desastres no Brasil do Departamento de Articulação e Gestão, da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, do Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional
	a09	Afetados por eventos extremos e desastres climáticos	Atlas Digital de Desastres no Brasil do Departamento de Articulação e Gestão, da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, do Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional
	a10	Danos por eventos extremos e desastres climáticos	Atlas Digital de Desastres no Brasil do Departamento de Articulação e Gestão, da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, do Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional

### Trilema Energético em nível subnacional: o caso do estado do Ceará

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2024), o estado do Ceará abrange 148.894.447 km<sup>2</sup>, divididos em 184 municípios, com uma população de 8.794.957 habitantes. Economicamente, possui uma receita orçamentária de aproximadamente R\$ 28,5 bilhões e renda domiciliar per capita de R\$ 1.166,00. Os resultados do Trilema Energético indicam que o Ceará ocupa uma posição intermediária entre os estados brasileiros nas dimensões de equidade energética e segurança energética, sugerindo que políticas públicas devem focar em melhorias em ambas as dimensões, com ênfase especial na segurança energética.

Analisando a equidade energética, o indicador que mede o percentual da renda média comprometida com energia elétrica aumentou de 8,015% em 2018 para 9,061% em 2022. Apesar do aumento de 44,04% na tarifa (de R\$ 0,492450 para R\$ 0,709340), a renda média da população cresceu 22,81% (de R\$ 855,00 para R\$ 1.050,00), enquanto o consumo médio de kWh por habitante diminuiu 3,62% (de 139,16 kWh para 134,12 kWh). Este cenário pode indicar um aumento na pobreza energética, conforme discutido por autores como Li et al. (2014), Kearney (2018) e Lin & Wang (2020). O índice de endividamento reflete diretamente na capacidade do estado de investir em projetos e políticas públicas. Segundo o Portal do Tesouro Transparente Nacional (2024), em 2022, a dívida pública consolidada do Ceará foi de 33,63% da Receita Líquida Corrente (RCL), comparada a 57,14% em 2018. Esta redução indica uma gestão fiscal mais eficiente e sustentável, permitindo maiores investimentos em infraestrutura, saúde e educação, fortalecendo a capacidade de pagamento no longo prazo e promovendo um ambiente econômico estável e favorável ao desenvolvimento sustentável do estado.

Os subsídios governamentais às energias renováveis têm sido amplamente estudados como ferramenta para acelerar o desenvolvimento dessas fontes (Berry & Jaccard, 2001;

Butler & Neuhoff, 2008; Rigter & Vidican, 2010; Couture & Gagnon, 2010; Sun & Nie, 2015). No Ceará, houve um aumento significativo nesses investimentos nos últimos cinco anos. Em 2022, o estado destinou 14,05% do total (R\$ 90,402 milhões) para energias renováveis, comparado a R\$ 4,891 milhões em 2018. Esse incremento elevou a participação das energias renováveis na matriz energética cearense de 45,497% para 97,763%, contribuindo para um avanço significativo do Ceará nesse aspecto entre os estados brasileiros.

No Ceará, houve uma expansão significativa na capacidade de micro e minigeração distribuída de energia elétrica nos últimos anos. Em 2018, essa capacidade era de apenas 0,603%, equivalente a 22,40 MWh, mas até 2022, o estado elevou esse número para 10,451%, totalizando 560,07 MWh. Esse crescimento é resultado de políticas públicas eficazes e incentivos regulatórios que facilitaram a instalação de pequenos geradores, como painéis solares e turbinas eólicas, reduzindo assim o consumo de energia convencional. Por outro lado, a taxa de eletrificação, que mede o acesso à eletricidade nos domicílios, mostrou um leve declínio ao longo do período. Em 2018, praticamente toda a população, 99,90%, tinha acesso à eletricidade, mas em 2022, esse índice diminuiu ligeiramente para 99,60%. Essa pequena queda pode indicar desafios contínuos na manutenção e expansão da infraestrutura elétrica, essenciais para garantir acesso universal e sustentável à energia para todos os cidadãos cearenses. Esses indicadores são cruciais não apenas para avaliar a infraestrutura energética do estado, mas também para orientar políticas futuras visando melhorar a equidade energética e promover o desenvolvimento sustentável em todas as regiões do Ceará.

A dimensão de equidade energética no contexto subnacional do trilema energético evidencia o impacto da transição energética na redução das históricas desigualdades socioeconômicas no Brasil, buscando garantir acesso equitativo à energia. Indicadores como IDH, Índice de GINI e o percentual de usuários cadastrados em tarifa social são cruciais. O IDH do Ceará, avaliando bem-estar através de riqueza, educação, saúde e natalidade (IPEA, 2008), manteve uma média de 0,741 nos últimos cinco anos, alcançando 0,755 em 2020 e 0,734 nos anos de 2021 e 2022. Em relação ao Índice de GINI, que mede a concentração de renda (IPEA, 2004), o Ceará apresentou índices elevados comparados aos estados do Sul, Sudeste e Centro-Oeste, com valores de 0,5829 em 2018 e 0,5882 em 2022, indicando progresso limitado. Quanto ao índice de usuários cadastrados em tarifa social, o estado registrou 34,323% dos consumidores residenciais de baixa renda em 2022, evidenciando desigualdades energéticas que podem direcionar políticas públicas para mitigá-las.

Em relação ao consumo de energia, o Ceará apresentou em 2022 uma baixa média de consumo per capita (1,47 MWh/habitante), comparado aos estados do Sul (3,22 MWh/habitante), Sudeste (2,81 MWh/habitante) e Centro-Oeste (2,46 MWh/habitante). Esse indicador tem mostrado crescimento contínuo nos últimos anos, subindo de 1,24 MWh/habitante em 2018 para 1,47 MWh/habitante em 2022, refletindo possíveis aspectos de pobreza energética ou falta de acesso aos serviços energéticos, especialmente nos estados do Nordeste e Norte. Este é um indicador relevante para medir a segurança energética, frequentemente utilizado por diversos autores para avaliar a situação energética de uma região ou país (Tolliver et al., 2018; Peng et al., 2021).

Na dimensão de Segurança Energética do Trilema Energético do Ceará, dois indicadores fundamentais medem o fornecimento e a qualidade do fornecimento de energia em nível subnacional. Os dados revelam que o fornecimento de energia segue padrões semelhantes ao consumo, com índices entre os mais baixos do país no período analisado. Quanto à qualidade do fornecimento, houve uma significativa queda no serviço prestado pela operadora ENEL Ceará, cuja nota caiu de 67,71 em 2018 para 49,03 em 2022, posicionando-a entre as piores operadoras de energia do país. Três indicadores destacam o papel das

energias renováveis na matriz de geração de energia do Ceará e de outros estados brasileiros: a participação de eletricidade proveniente de fontes renováveis, a geração de energia fotovoltaica e a geração de energia eólica. Todos esses indicadores utilizam como base a geração total de energia elétrica, incluindo fontes renováveis e fósseis, durante o período analisado. Em relação à participação de energia proveniente de fontes renováveis, o Ceará registrou um avanço significativo, aumentando de 45,497% em 2018 para 97,763% em 2022. Esse aumento se deve principalmente à redução da operação das usinas termelétricas cearenses pelo Operador Nacional do Sistema em 2022. Quanto à produção de energia fotovoltaica, o Ceará aumentou de 66 MWh em 2018 para 2.033 MWh em 2022, representando 22,594% da produção total de energia do estado nesse ano. Já a produção de energia eólica cresceu de 5.828 MWh em 2018 para 7.614 MWh em 2022, elevando sua participação de 44,983% para 77,125% da produção total de energia do estado. Em conjunto, a produção de energia fotovoltaica e eólica correspondeu a 99,719% do total da energia produzida pelo estado do Ceará em 2022.

Quanto à capacidade instalada para geração de energia renovável no estado do Ceará, houve um crescimento constante nos últimos cinco anos, aumentando de 47,941% em 2018 para 61,644% em 2022. Em relação ao índice de importação/exportação de energia, em 2022 o Ceará registrou uma oferta de 9.872 MWh contra um consumo de 12.844 MWh, sendo um importador líquido de energia do Operador Nacional do Sistema. Segundo dados do governo estadual e da ANEEL (2022), a matriz elétrica cearense é composta por 39% de geração termelétrica e 60% de energia renovável, destacando-se a geração solar e eólica. O estado possui 159 empreendimentos de geração de energia, totalizando aproximadamente 5,2 GW, incluindo 30 usinas termelétricas, 99 parques eólicos e 29 parques solares. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), a capacidade instalada em 2022 é de 5.919 MW, com uma geração de 9.873 GWh e um consumo de 12.885 GWh, atendendo a 4.125.885 consumidores, sendo 3.353.496 residenciais, 5.979 industriais, 181.769 comerciais, 532.658 rurais, além de poder público, iluminação pública, serviço público e consumo próprio.

No setor de energia solar, o Ceará possui atualmente 174 projetos de parques em andamento distribuídos em 21 municípios, com 99 projetos operacionais, 1 em construção, 28 em fase inicial de construção e 46 em fase de Despacho de Requerimento de Outorga (DRO). Em relação à energia eólica, há 737 projetos de parques em andamento distribuídos em 36 municípios do estado, com 29 operacionais, 2 em construção, 100 em fase inicial de construção e 606 em fase de Despacho de Requerimento de Outorga (DRO) (Secretaria do Desenvolvimento Econômico e do Trabalho do Estado do Ceará, 2024; ANEEL, 2024). No que diz respeito às fontes fósseis, o Ceará possui 29 empreendimentos, com uma potência outorgada de 1.737.087,10 kW. Esses empreendimentos estão distribuídos em 12 municípios, destacando-se São Gonçalo do Amarante com 4 empreendimentos e potência de 1.308.524 kW, Caucaia com 2 empreendimentos e potência de 220.024 kW, Maracanaú com 3 empreendimentos e potência de 170.371,50 kW, e Fortaleza com 11 empreendimentos e potência de 18.609,60 kW.

Alguns indicadores fundamentais no contexto hídrico são o consumo de água per capita, acesso à água, acesso à rede de esgoto e percentual de esgoto tratado, essenciais para avaliar a qualidade de vida e a sustentabilidade, influenciando diretamente a saúde pública e o meio ambiente. Em 2022, no Ceará, 42,019% da população não tinha acesso à água, e 72,889% não tinha acesso à rede de esgoto, com apenas 35,091% do esgoto sendo tratado. Esses números refletem desafios significativos na gestão de recursos hídricos e saneamento básico, demandando investimentos urgentes e políticas públicas eficazes para melhorar esses serviços essenciais. Dados da ANA (2019) e do IBGE (2019) mostram que 31% da população brasileira vive em áreas com baixa segurança hídrica e 41% em regiões que

necessitam de expansão nos sistemas de água, evidenciando desigualdades, pois 40% da população sem acesso à água tem renda de até um salário mínimo. Regionalmente, em 2019, as menores coberturas de abastecimento foram no Norte (27,4%) e Nordeste (47,2%), contrastando com 88,9% no Sudeste e 68,7% no Sul e Centro-Oeste. Mitigar essas desigualdades históricas requer políticas públicas que ampliem o acesso à água e ao esgoto tratado, conforme destacado por Gomes et al. (2020). Neste contexto, é crucial considerar os fatores socioeconômicos e regionais que impactam o acesso aos recursos hídricos. A expansão e modernização dos sistemas de abastecimento e tratamento de água são essenciais para aumentar a segurança hídrica e reduzir disparidades regionais e sociais no acesso a esses serviços básicos.

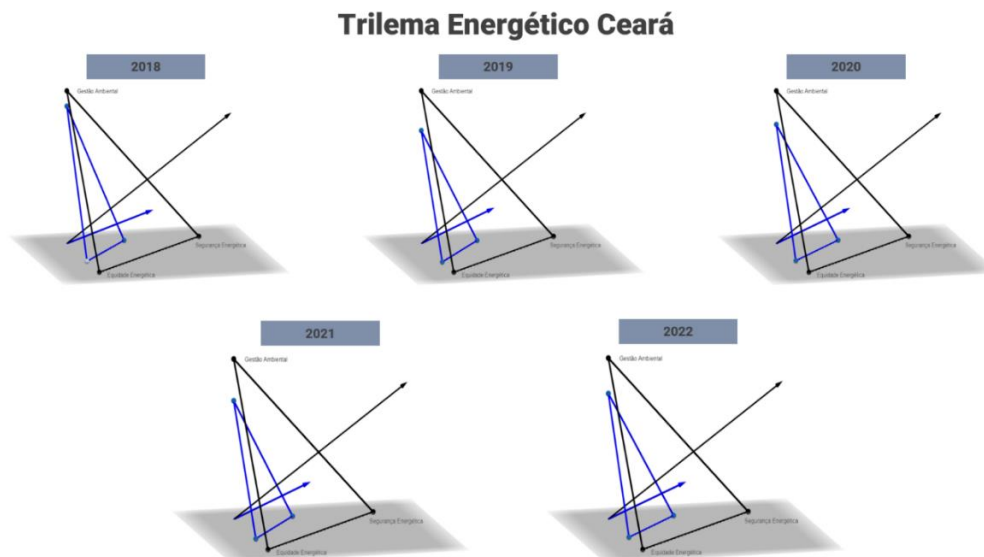
A dimensão de gestão ambiental também avalia a qualidade do ar dos estados brasileiros por meio do indicador de emissões de gases de efeito estufa, calculando o percentual de emissões de cada estado em relação ao total nacional. Os dados são obtidos pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), criado pelo Observatório do Clima, que anualmente estima as emissões no Brasil. No caso do Ceará, os dados revelam oscilações significativas nas emissões ao longo dos anos. Em 2018, as emissões representaram 0,133% do total nacional. Em 2019, houve um aumento para 9,626%. Em 2020, as emissões caíram para 0,588%, aumentando novamente para 6,638% em 2021 e diminuindo para 0,674% em 2022. Essas variações indicam instabilidade nas emissões do estado.

Outro indicador relacionado é o das mortes por problemas respiratórios, onde o Ceará registra entre 4,826% e 5,902% do total nacional. Esses indicadores são cruciais para compreender os desafios ambientais e de saúde pública enfrentados pelo estado. A flutuação nas emissões de gases de efeito estufa sublinha a necessidade de políticas ambientais mais consistentes e eficazes para mitigar essas emissões. Além disso, a alta proporção de mortes por problemas respiratórios destaca a importância de melhorar a qualidade do ar e fortalecer iniciativas de saúde pública para proteger a população.

Um indicador relevante na dimensão de gestão ambiental é a taxa de desmatamento dos estados. O crescimento do desmatamento entre 2020 e 2023 em áreas relacionadas a empreendimentos energéticos é preocupante. No setor de energias renováveis, os dados mostram um total de 9,4 mil hectares desmatados nesse período no Brasil. O mais alarmante é que grande parte desse desmatamento ocorreu no Nordeste brasileiro, incluindo o estado do Ceará. No Ceará, entre 2020 e 2023, foram registrados 1.913 hectares de áreas desmatadas por projetos de energias renováveis, liderando o ranking nacional. Esses dados destacam a necessidade de equilibrar a expansão da infraestrutura de energias renováveis com a preservação ambiental e sugere que políticas de controle ambiental devem ser implementadas.

A gestão ambiental inclui a análise de indicadores de impactos de desastres climáticos, essenciais para formular políticas públicas eficazes e mitigar seus efeitos. Esses indicadores avaliam mortes, afetados e danos por eventos extremos, fornecendo insights sobre a vulnerabilidade de populações e ecossistemas às mudanças climáticas. Monitorar esses dados identifica áreas prioritárias para intervenções e alocação eficiente de recursos, contribuindo para políticas de adaptação robustas, proteção de populações vulneráveis e desenvolvimento sustentável. O EM-DAT (Base de Dados de Eventos de Emergência), estabelecido em 1988 pelo CRED e pela OMS, categoriza globalmente os desastres climáticos com critérios como perdas humanas, danos econômicos, estado de emergência ou ajuda internacional. Os dados analisados incluem registros nacionais pelo EM-DAT e estaduais pelo Atlas Digital de Desastres no Brasil, uma colaboração do Banco Mundial e UFSC via Ceped. Entre 2018 e 2022, o Ceará registrou aproximadamente 200 milhões de reais em danos por desastres climáticos, com 54 milhões em 2022, além de mortes, afetados

e desabrigados, sublinhando a necessidade de estratégias integradas de gestão ambiental e adaptação climática. Após análise do Trilema Energético de 2018 a 2022, a Figura 2 apresenta um guia para políticas e investimentos futuros do Ceará, visando melhorar indicadores e promover uma transição energética equilibrada.



**Legenda:**

- Vetor Trilema “Ideal”:
- Vetor Trilema “Real”:

**Figura 2:** Trilema Energético do estado do Ceará entre 2018 e 2022.

Quanto ao índice de intensidade vetorial do estado do Ceará conforme apresentado na tabela 2, observa-se que o Ceará tem evoluído no caminho para a transição energética. Nos anos de 2018 e 2019 a métrica mostra um nível de intensidade de 0,36 e atualmente (2022) este nível está em 0,41.

**Tabela 7:** Índice de intensidade vetorial do estado do Ceará entre 2018 e 2022

Estado	2018	2019	2020	2021	2022
Ceará	0,36	0,36	0,38	0,36	0,41

Os dados da Tabela 2 mostram que o estado do Ceará ainda apresenta um nível de intensidade distante do ideal (1,00). Apesar da evolução e do salto de qualidade nos últimos anos, a análise do nível de intensidade revela que há um longo caminho a ser percorrido pelo estado rumo a uma transição energética mais justa e equilibrada. Os dados de intensidade, aliados à direção vetorial apontada pelo Trilema Energético do Estado do Ceará (entre 2018 e 2022), indicam que a dimensão de Segurança Energética deve ser o principal foco de atenção do estado, conforme a distância dos pontos vetoriais ideais apresentada na representação gráfica e a direção indicada na figura 8. Dessa forma, observa-se a necessidade de ações através do planejamento, formulação e implementação de políticas públicas energéticas e de mudanças climáticas que visem primeiramente garantir acesso universal aos serviços energéticos com segurança e confiabilidade. Isso melhoraria a qualidade do fornecimento e a ampliação do atendimento. Além disso, é essencial aumentar a produção de energia no estado a partir de fontes renováveis e ampliar a capacidade instalada para reduzir a dependência da produção de energia de outros estados (Operador Nacional do

Sistema) e atender à crescente demanda energética do Ceará.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo sobre a proposição de um Sistema de Monitoramento da transição energética em nível subnacional revelou-se de extrema relevância diante dos desafios globais das mudanças climáticas e da necessidade urgente de transições energéticas justas e sustentáveis. Os objetivos gerais e específicos foram plenamente atendidos ao propor um modelo de monitoramento baseado no Trilema Energético, avaliar o status da transição energética no estado do Ceará e oferecer recomendações para políticas públicas mais eficazes. Os principais resultados demonstraram que o Ceará, pioneiro entre os estados brasileiros com legislação específica para transição energética, apresenta um panorama promissor na diversificação de sua matriz energética, embora enfrente desafios significativos, como a dependência ainda considerável de fontes fósseis. A análise detalhada permitiu identificar oportunidades específicas para aprimorar as políticas públicas e infraestruturas locais, contribuindo para uma transição energética mais equitativa e sustentável.

Do ponto de vista gerencial, este estudo oferece uma ferramenta para gestores públicos e privados interessados em implementar políticas de transição energética em contextos subnacionais, destacando a importância de métricas e sistemas de monitoramento adaptados às realidades locais. Academicamente, contribui para o preenchimento de lacunas teóricas ao focar a análise em nível subnacional, oferecendo um modelo replicável para estudos futuros em outras regiões com características similares. Entretanto, algumas limitações foram identificadas, como a necessidade contínua de atualização dos dados, a dependência de recursos financeiros e institucionais para a implementação efetiva do sistema proposto e em relação ao modelo apresentado este apresenta possíveis fragilidades na dimensão de Gestão Ambiental em virtude da exclusão de indicadores devido a inexistência de dados ou de estrutura de dados que contemplasse os critérios de escolha dos indicadores. Estudos futuros poderiam expandir este trabalho investigando a implementação prática das recomendações formuladas, explorando ainda mais as dinâmicas sociais e econômicas da transição energética em diferentes contextos subnacionais. Em resumo, este estudo não apenas oferece insights valiosos para a gestão pública e acadêmica, mas também sinaliza a importância crítica de políticas integradas e sustentáveis para enfrentar os desafios energéticos e climáticos do século XXI, promovendo um desenvolvimento mais justo e equitativo para as futuras gerações.

## REFERÊNCIAS

- ADGER, W. N.; ARNELL, N. W.; TOMPKINS, E. L. Successful adaptation to climate change across scales. **Global environmental change**, v. 15, n. 2, p. 77-86, 2005.
- AINOU, F. Z.; ALI, M.; SADIQ, M. Green energy security assessment in Morocco: green finance as a step toward sustainable energy transition. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 22, p. 61411-61429, 2023.
- ALTHOR, G.; WATSON, J. E. M.; FULLER, R. A. Global mismatch between greenhouse gas emissions and the burden of climate change. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 20281, 2016.
- BABAYOMI, O. O.; DAHORO, D. A.; ZHANG, Z. Affordable clean energy transition in developing countries: Pathways and technologies. **Iscience**, v. 25, n. 5, 2022.
- BATHIANY, S.; DAKOS, V.; SCHEFFER, M.; LENTON, T. M. Climate models predict increasing temperature variability in poor countries. **Science advances**, v. 4, n. 5, p. eaar5809, 2018.
- BERRY, T.; JACCARD, M. The renewable portfolio standard: design considerations and an implementation survey. **Energy Policy**, v. 29, n. 4, p. 263-277, 2001.
- BURANDT, T.; XIONG, B.; LÖFFLER, K.; OEI, P. Y. Decarbonizing China's energy system—Modeling the transformation of the electricity, transportation, heat, and industrial sectors. **Applied Energy**, v. 255, p. 113820, 2019.
- BUTLER, L.; NEUHOFF, K. Comparison of feed-in tariff, quota and auction mechanisms to support wind power development. **Renewable energy**, v. 33, n. 8, p. 1854-1867, 2008.
- CANTARERO, M. M. V. Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: A roadmap to accelerate the energy transition in developing countries. **Energy Research & Social Science**, v. 70, p. 101716, 2020.
- CAPELLÁN-PÉREZ, I.; DE CASTRO, C.; GONZÁLEZ, L. J. M. Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. **Energy strategy reviews**, v. 26, p. 100399, 2019.
- CORREA MACANA, E.; COMIM, F. V. Impactos potenciais da mudança climática no desenvolvimento humano. **Encontro Nacional de Economia (36.: 2008 dez.: Salvador, BA)**. Anais.. Salvador: ANPEC, 2008. 1 CD-ROM., 2008.

CORWIN, D. L. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. **European Journal of Soil Science**, v. 72, n. 2, p. 842-862, 2021.

COUTURE, T.; GAGNON, Y. An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment. **Energy policy**, v. 38, n. 2, p. 955-965, 2010.

DRYZEK, J. S.; NORGAARD, R. B.; SCHLOSBERG, D. **The Oxford handbook of climate change and society**. Oxford University Press, 2011.

EBERHARD, A.; NAUDE, R. The South African renewable energy independent power producer procurement programme: A review and lessons learned. **Journal of Energy in Southern Africa**, v. 27, n. 4, p. 1-14, 2016.

ESSEX, S.; DE GROOT, J. Understanding energy transitions: The changing versions of the modern infrastructure ideal and the 'energy underclass' in South Africa, 1860–2019. **Energy Policy**, v. 133, p. 110937, 2019.

FERNANDES, A. A. **Proposta de aplicação de ontologia através de mapas conceituais e uso de algoritmos de preditividade para uma solução de Business Intelligence**. 2013.

FU, Fang Yu et al. The dynamic role of energy security, energy equity and environmental sustainability in the dilemma of emission reduction and economic growth. **Journal of Environmental Management**, v. 280, p. 111828, 2021.

GASPARATOS, A.; GADDA, T. Environmental support, energy security and economic growth in Japan. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 4038-4048, 2009.

GOMEZ-ECHEVERRI, L. Climate and development: enhancing impact through stronger linkages in the implementation of the Paris Agreement and the Sustainable Development Goals (SDGs). **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 376, n. 2119, p. 20160444, 2018.

HADDAD, C.; GÜNAY, C.; GHARIB, S.; KOMENDANTOVA, N. Imagined inclusions into a 'green modernisation': local politics and global visions of Morocco's renewable energy transition. **Third World Quarterly**, v. 43, n. 2, p. 393-413, 2022.

HALL, C. A. S.; LAMBERT, J. G.; BALOGH, S. B. EROI of different fuels and the implications for society. **Energy policy**, v. 64, p. 141-152, 2014.

HEFFRON, R. J. Applying energy justice into the energy transition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 156, p. 111936, 2022.

HEFFRON, R. J. What is the "just transition"?. **Achieving a just transition to a low-carbon economy**, p. 9-19, 2021.

HEFFRON, R. J.; MCCAULEY, D. The concept of energy justice across the disciplines. **Energy policy**, v. 105, p. 658-667, 2017.

HEFFRON, R. J.; MCCAULEY, D.; DE RUBENS, G. Z. Balancing the energy trilemma through the Energy Justice Metric. **Applied energy**, v. 229, p. 1191-1201, 2018.

HEFFRON, R. J.; MCCAULEY, D.; SOVACOOOL, B. K. Resolving society's energy trilemma through the Energy Justice Metric. **Energy Policy**, v. 87, p. 168-176, 2015.

ILARRI, M.; SOUZA, A. T.; DIAS, E.; ANTUNES, C. Influence of climate change and extreme weather events on an estuarine fish community. **Science of The Total Environment**, v. 827, p. 154190, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Scaling up Private Finance for Clean Energy in Emerging and Developing Economies**. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a48fd497-d479-4d21-8d76-10619ce0a982/ScalingupPrivateFinanceforCleanEnergyinEmergingandDevelopingEconomies.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

JENKINS, K.; MCCAULEY, D.; HEFFRON, R.; STEPHAN, H.; REHNER, R. Energy justice: A conceptual review. **Energy research & social science**, v. 11, p. 174-182, 2016.

JING, R.; LIN, Y.; KHANNA, N.; CHEN, X.; WANG, M.; LIU, J.; LIN, J. Balancing the Energy Trilemma in energy system planning of coastal cities. **Applied Energy**, v. 283, p. 116222, 2021.

KABEYI, M. J. B.; OLANREWaju, O. A. Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. **Frontiers in Energy research**, v. 9, 2022.

KEARNEY, M. **Introdução à pobreza energética**, Instituto de Transição Energética. 2018. Disponível em: [https://www.energy-transition-institute.com/documents/17779499/17781903/Energy+Poverty\\_FactBook.pdf/9364dcbb-a297-39b2-53c8-5981b0d962f8?t=1561052366359](https://www.energy-transition-institute.com/documents/17779499/17781903/Energy+Poverty_FactBook.pdf/9364dcbb-a297-39b2-53c8-5981b0d962f8?t=1561052366359). Acesso em: 04 junho 2024.

KENSKI, V. M. Gestão e uso de mídias em projetos de educação à distância. **Revista e-currículo**, v. 1, 2005.

KHAN, I.; HOU, F.; IRFAN, M.; ZAKARI, A.; LE, H. Does energy trilemma a driver of economic growth? The roles of energy use, population growth, and financial development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 146, p. 111157, 2021.

KIM, Y. J.; SOH, M.; CHO, S-H. Identifying optimal financial budget distributions for the low-carbon energy transition between emerging and developed countries. **Applied Energy**, v. 326, p. 119967, 2022.

KOEPKE, M.; MONSTADT, J.; OTSUKI, K. Rethinking energy transitions in Southern cities: Urban and infrastructural heterogeneity in Dar es Salaam. **Energy Research & Social Science**, v. 74, p. 101937, 2021.

KOVAČ, A.; PARANOS, M.; MARCIUŠ, D. Hydrogen in energy transition: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 16, p. 10016-10035, 2021.

LA VIÑA, A. G. M.; TAN, J. M.; GUANZON, T. I. M.; CALEDA, M. J.; ANG, L. Navigating a trilemma: Energy security, equity, and sustainability in the Philippines' low-carbon transition. **Energy research & social science**, v. 35, p. 37-47, 2018.

LE, T. H.; NGUYEN, C. P. Is energy security a driver for economic growth? Evidence from a global sample. **Energy policy**, v. 129, p. 436-451, 2019.

LEBLING, Katie et al. State of climate action: assessing progress toward 2030 and 2050. **World Resource Institute (WRI), ClimateWorks Foundation**. 2020. Disponível em: <https://www.wri.org/publication/state-climate-action-assessing-progress-toward-2030-and-2050>. Acesso em: 18 de junho de 2024.

LI, F.; ZHANG, J.; LI, X. Energy security dilemma and energy transition policy in the context of climate change: A perspective from China. **Energy Policy**, v. 181, p. 113624, 2023.

LIN, B.; WANG, Y. Does energy poverty really exist in China? From the perspective of residential electricity consumption. **Energy Policy**, v. 143, p. 111557, 2020.

LIU, H.; KHAN, I.; ZAKARI, A.; ALHARTHI, M. Roles of trilemma in the world energy sector and transition towards sustainable energy: A study of economic growth and the environment. **Energy Policy**, v. 170, p. 113238, 2022.

LU, J.; NEMET, G. F. Mapa de evidências: tópicos, tendências e políticas na literatura sobre transições energéticas. **Cartas de Pesquisa Ambiental**, v. 15, n. 12, pág. 123003, 2020.

LUO, H.; LI, L.; LEI, Y.; WU, S.; YAN, D.; LUO, X.; WU, L. Decoupling analysis between economic growth and resources environment in Central Plains Urban Agglomeration. **Science of the Total Environment**, v. 752, p. 142284, 2021.

MAHMOOD, T.; AYAZ, M. T. Energy security and economic growth in Pakistan. **Pakistan Journal of Applied Economics**, v. 28, n. 1,



p. 47-64, 2018.

- MALISZEWSKA-NIENARTOWICZ, J.; STEFAŃSKI, O. Decentralisation versus centralisation in Swedish energy policy: the main challenges and drivers for the energy transition at the regional and local levels. **Energy Policy**, v. 188, p. 114105, 2024.
- MARTI, L.; PUERTAS, R. Sustainable energy development analysis: Energy Trilemma. **Sustainable Technology and Entrepreneurship**, v. 1, n. 1, p. 100007, 2022.
- MOHAPATRA, S.; ADAMOWICZ, W.; BOXALL, P. Dynamic technique and scale effects of economic growth on the environment. **Energy Economics**, v. 57, p. 256-264, 2016.
- NAEEM, S.; WAHEED, A.; KHAN, M. N. Drivers and barriers for successful special economic zones (SEZs): Case of SEZs under China Pakistan economic corridor. **Sustainability**, v. 12, n. 11, p. 4675, 2020.
- NAMAGANDA, E.; OTSUKI, K.; STEEL, G. Understanding the cumulative socioenvironmental impacts of energy transition-induced extractivism in Mozambique: The role of mixed methods. **Journal of Environmental Management**, v. 338, p. 117811, 2023.
- NAMAGANDA, E.; OTSUKI, K.; STEEL, G. Understanding the cumulative socioenvironmental impacts of energy transition-induced extractivism in Mozambique: The role of mixed methods. **Journal of Environmental Management**, v. 338, p. 117811, 2023.
- NAWAZ, S. M. N.; ALVI, S. Energy security for socio-economic and environmental sustainability in Pakistan. **Heliyon**, v. 4, n. 10, 2018.
- NGCAMU, B. S. Climate change effects on vulnerable populations in the Global South: a systematic review. **Natural Hazards**, v. 118, n. 2, p. 977-991, 2023.
- NGUYEN, X. P.; LE, N. D.; PHAM, V. V.; HUYNH, T. T.; DONG, V. H.; HOANG, A. T. Mission, challenges, and prospects of renewable energy development in Vietnam. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, p. 1-13, 2021.
- NIKODEMUS, A.; HÁJEK, M. Implementing Local Climate Change Adaptation Actions: The Role of Various Policy Instruments in Mopane (Colophospermum mopane) Woodlands, Northern Namibia. **Forests**, v. 13, n. 10, p. 1682, 2022.
- NORTON, A.; SEDDON, N.; AGRAWAL, A.; SHAKYA, C.; KAUR, N.; PORRAS, I. Harnessing employment-based social assistance programmes to scale up nature-based climate action. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 375, n. 1794, p. 20190127, 2020.
- OHLHORST, D. Germany's energy transition policy between national targets and decentralized responsibilities. **Journal of Integrative Environmental Sciences**, v. 12, n. 4, p. 303-322, 2015.
- OUTKA, U. Environmental justice issues in sustainable development: Environmental justice in the renewable energy transition. **J. Envtl. & Sustainability L.**, v. 19, p. 60, 2012.
- PAROVIĆ, M. M.; KLJAJIĆ, M. V. Improvement of metric for quantification and assessment of the energy justice. **Thermal Science**, v. 26, n. 3 Part A, p. 2225-2237, 2022.
- PEARCE-HIGGINS, J. W.; ANTÃO, L. H.; BATES, R. E.; BOWGEN, K. M.; BRADSHAW, C. D.; DUFFIELD, S. J.; FFOULKES, C.; FRANCO, A. M. A.; GESCHKE, J.; GREGORY, R. D.; HARLEY, M. J.; HODGSON, J. A.; JENKINS, R. L. M.; KAPOS, V.; MALTBY, K. M.; WATTS, O.; WILLIS, S. G.; MORECROFT, M. D. A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment. **Ecological indicators**, v. 136, p. 108690, 2022.
- PENG, C.; CHEN, H.; LIN, C.; GUO, S.; YANG, Z.; CHEN, K. A framework for evaluating energy security in China: Empirical analysis of forecasting and assessment based on energy consumption. **Energy**, v. 234, p. 121314, 2021.
- PFENNINGER, S.; KEIRSTEAD, J. Renewables, nuclear, or fossil fuels? Scenarios for Great Britain's power system considering costs, emissions and energy security. **Applied Energy**, v. 152, p. 83-93, 2015.
- PRADO JR, F. A.; ATHAYDE, S.; MOSSA, J.; BOHLMAN, S.; LEITE, F.; OLIVER-SMITH, A. How much is enough? An integrated examination of energy security, economic growth and climate change related to hydropower expansion in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1132-1136, 2016.
- RIGTER, J.; VIDICAN, G. Cost and optimal feed-in tariff for small scale photovoltaic systems in China. **Energy Policy**, v. 38, n. 11, p. 6989-7000, 2010.
- RUHNAU, O.; BANNIK, S.; OTTEN, S.; PRAKTIKNJO, A.; ROBINIUS, M. Direct or indirect electrification? A review of heat generation and road transport decarbonisation scenarios for Germany 2050. **Energy**, v. 166, p. 989-999, 2019.
- SCHINDLER, S. Towards a paradigm of Southern urbanism. **City**, v. 21, n. 1, p. 47-64, 2017.
- SCHOENEFELD, J. J.; SCHULZE, K.; BRUCH, N. The diffusion of climate change adaptation policy. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 13, n. 3, p. e775, 2022.
- SETYOWATI, A. B. Mitigating energy poverty: Mobilizing climate finance to manage the energy trilemma in Indonesia. **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1603, 2020.
- SIKAWAH, P.; ERMOLAEVA, Y. V.; ERMOLAEVA, P. O.; AGYEKUM, B. Sustainable Energy Transition in Russia and Ghana Within a Multi-Level Perspective. **Changing Societies & Personalities**. 2023. Vol. 7. Iss. 3, v. 7, n. 3, p. 165-185, 2023.
- SINGH, H. V.; BOCCA, R.; GOMEZ, P.; DAHLKE, S.; BAZILIAN, M. The energy transitions index: An analytic framework for understanding the evolving global energy system. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, p. 100382, 2019.
- SOUSA, P. M.; TRIGO, R. M.; BARRIOPEDRO, D.; SOARES, P. M. M.; RAMOS, A. M.; LIBERATO, M. L. R. Responses of European precipitation distributions and regimes to different blocking locations. **Climate dynamics**, v. 48, p. 1141-1160, 2017.
- SUN, P.; NIE, P. A comparative study of feed-in tariff and renewable portfolio standard policy in renewable energy industry. **Renewable Energy**, v. 74, p. 255-262, 2015.
- SWARNAKAR, P.; SINGH, M. K. Local governance in just energy transition: towards a community-centric framework. **Sustainability**, v. 14, n. 11, p. 6495, 2022.
- SWEERTS, B.; DALLA LONGA, F.; VAN DER ZWAAN, B. Financial de-risking to unlock Africa's renewable energy potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 102, p. 75-82, 2019.
- TIAN, J.; YU, L.; XUE, R.; ZHUANG, S.; SHAN, Y. Global low-carbon energy transition in the post-COVID-19 era. **Applied energy**, v. 307, p. 118205, 2022.
- TOL, R. S. J. The economic impacts of climate change. **Review of environmental economics and policy**, 2018.
- TOLLIVER, C.; ISLAM, M.; SHIN, K. J.; MANAGI, S. The impact of energy security risks on energy consumption. **International Journal of Innovation and Sustainable Development**, v. 12, n. 3, p. 258-270, 2018.
- TOMEI, J.; GENT, D. **Equity and the energy trilemma**: Delivering sustainable energy access in low-income communities. International Institute for Environment and Development: London, UK, 2015.
- WALLWYN, D. R.; KRAEMER-MBULA, E. Captives of Capital? Exploring economic models as recursive and performative agents. **Energy Research & Social Science**, v. 78, p. 102131, 2021.
- WEISS, M.; CLOOS, K. C.; HELMERS, E. Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles. **Environmental Sciences Europe**, v. 32, p. 1-17, 2020.
- ZHANG, J.; ZHOU, N.; HINGE, A.; FENG, W.; ZHANG, S. Governance strategies to achieve zero-energy buildings in China. **Building Research & Information**, v. 44, n. 5-6, p. 604-618, 2016.
- ZHAO, N.; YOU, F. Can renewable generation, energy storage and energy efficient technologies enable carbon neutral energy transition?. **Applied Energy**, v. 279, p. 115889, 2020.