

Modelagem Matemática de Monitoramento Tridimensional da Transição Energética Justa em Nível Subnacional

MARCOS ANTONIO CAVALCANTE DE OLIVEIRA JÚNIOR

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

MÔNICA CAVALCANTI SÁ DE ABREU

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

DAVID CARNEIRO DE SOUZA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ (IFCE)

Agradecimento à órgão de fomento:

FAPEPI - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí, CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; IFPI - Instituto Federal do Piauí; Lecos - UFC - Laboratório de Estudos em Competitividade e Sustentabilidade.

Modelagem Matemática de Monitoramento Tridimensional da Transição Energética Justa em Nível Subnacional

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, pesquisadores e instituições públicas e privadas têm intensificado esforços para mensurar a evolução da transição energética. Entre os principais instrumentos desenvolvidos, destacam-se o *Energy Trilemma Index* do World Energy Council, o *U.S. Energy Security Index* e o *International Energy Security Index*. Esses índices avaliam conjuntamente as dimensões de segurança energética, equidade no acesso à energia e sustentabilidade ambiental, oferecendo importantes referências para o planejamento e a formulação de políticas públicas voltadas à transição energética (Heffron, McCauley & Sovacool, 2015; Parovic & Kljajić, 2022).

Apesar de sua relevância em nível internacional, essas metodologias apresentam limitações importantes quando aplicadas a contextos subnacionais, especialmente em países do Sul Global. A maioria dos índices foi concebida para captar tendências em escala nacional, com foco predominante no Norte Global, o que dificulta sua aplicação em análises descentralizadas e adaptadas às realidades locais (Heffron, McCauley & De Rubens, 2018; Pearce-Higgins et al., 2022). Ademais, a agregação por médias, frequentemente utilizada nesses modelos, tende a suavizar desequilíbrios entre as dimensões e a ocultar assimetrias estruturais — como desigualdades territoriais ou descompassos entre esforço político e resultados efetivos.

Evidencia-se uma lacuna metodológica no monitoramento da transição energética em contextos descentralizados, especialmente em países com desigualdades regionais. Apesar dos avanços no debate global, ainda são incipientes as ferramentas analíticas sensíveis às especificidades locais (Swarnakar & Singh, 2022; Ngcamu, 2023). Este estudo propõe um modelo alternativo, fundamentado no Trilema Energético, com abordagem vetorial e tridimensional. Ao representar cada estado como um vetor composto pelas dimensões de segurança, equidade e meio ambiente, a proposta permite analisar não apenas a posição relativa dos estados, mas também a direção e intensidade das transformações em curso. A modelagem vetorial possibilita comparações entre estados com médias gerais semelhantes, mas com composições internas distintas, revelando assimetrias ocultas por abordagens agregadas. Tal perspectiva oferece uma leitura mais refinada da transição energética justa e subsídios mais precisos para o planejamento de políticas públicas em escala subnacional. Assim, diante das limitações dos modelos tradicionais baseados em médias, esta pesquisa busca responder à seguinte questão: modelos vetoriais aplicados ao Trilema Energético permitem capturar desigualdades e padrões distintos da transição energética em nível subnacional que não seriam identificáveis por abordagens baseadas em médias?

Para responder a essa pergunta, a pesquisa foi estruturada em quatro etapas: revisão crítica de sistemas e métricas de monitoramento da transição energética; seleção e validação de indicadores com especialistas das áreas de energia e clima; construção de um banco de dados com informações dos 26 estados brasileiros e o Distrito Federal, entre os anos de 2018 e 2022; e desenvolvimento e aplicação do modelo vetorial e tridimensional, seguido de sua comparação com o modelo tradicional baseado em médias, conforme proposto por Heffron et al. (2015).

A comparação foca em estados com médias gerais idênticas, mas com perfis vetoriais contrastantes, evidenciando limitações das abordagens tradicionais e o potencial analítico da modelagem vetorial para o monitoramento e formulação de políticas públicas subnacionais. Dessa forma, este artigo propõe e aplica um modelo vetorial tridimensional para monitorar a transição energética em escala subnacional, com base nas dimensões do Trilema Energético — segurança, equidade e sustentabilidade —, permitindo identificar disparidades ocultas por médias agregadas. Especificamente, objetiva-se: (i) revisar criticamente os principais sistemas e métricas de

monitoramento utilizados em contextos nacionais e internacionais; (ii) construir um banco de dados com indicadores do Trilema para os estados brasileiros (2018–2022); (iii) desenvolver um modelo vetorial tridimensional; (iv) comparar os resultados vetoriais com os de abordagens tradicionais; e (v) discutir as implicações teóricas e práticas do modelo para políticas públicas de transição energética justa.

O estudo contribui tanto para a gestão pública quanto para a formulação de políticas, ao propor uma ferramenta que oferece uma visão concreta, atualizada e dinâmica da transição energética nos estados brasileiros. A proposta está alinhada aos desafios globais — como mudanças climáticas, esgotamento de recursos naturais e perda da biodiversidade — e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 7 (energia limpa), 11 (cidades sustentáveis) e 13 (ação climática). Ao adaptar o monitoramento às realidades locais, o modelo fornece subsídios para a incorporação de estratégias que conciliem exigências ambientais globais com necessidades territoriais específicas, apresentando diretrizes estratégicas para soluções integradas e de longo prazo. A estrutura do artigo contempla: revisão teórica sobre a transição energética e os principais modelos de monitoramento, com foco no Trilema Energético e métricas de justiça energética; descrição da metodologia de construção do modelo vetorial e da análise comparativa com o modelo tradicional; apresentação dos resultados da aplicação do modelo aos estados brasileiros (2018–2022) e; discussão das implicações teóricas e práticas para o monitoramento da transição energética justa em escala subnacional.

REFERENCIAL TEÓRICO

Transição Energética e o Trilema Energético

A transição energética, historicamente iniciada com a substituição da tração humana e animal pelo carvão na Revolução Industrial e intensificada pelo uso de petróleo e gás no século XX, ganha novo impulso no cenário atual devido à urgência climática, à busca por segurança energética e ao avanço das tecnologias renováveis (Li et al., 2023). Segundo o relatório Global Energy 2019 (Newell e Aldana, 2019), as fontes renováveis — especialmente eólica e solar — crescem em todas as projeções, passando de 14% da matriz energética em 2015 para até 31% em 2040 em cenários climáticos mais ambiciosos. Isso reforça a urgência da transição (Kabeyi & Olanrewaju, 2022), especialmente considerando que cerca de 73% das emissões globais de CO₂ vêm do setor energético (Lee et al., 2023), tornando a descarbonização um desafio de múltiplas dimensões (Lebling et al., 2020).

Para além das metas climáticas, a transição deve promover inclusão, acesso universal à energia e justiça ambiental (Cantarero, 2020), embora fontes renováveis enfrentem limitações como intermitência e baixa densidade energética, exigindo mudanças estruturais profundas (Capellán-Pérez, De Castro & González, 2019). No Sul Global, essas dificuldades são ampliadas por infraestrutura precária, altos custos de capital e baixas taxas de eletrificação (Babayomi, Dahoro & Zhang, 2022). Mesmo com menor responsabilidade histórica nas emissões, esses países enfrentam desigualdades que impactam suas trajetórias de transição (Müller, Schulze & Schöneich, 2023). Experiências como o REIPPPP da África do Sul ilustram o papel das políticas públicas e das parcerias para atrair investimentos (Eberhard & Naude, 2016), enquanto comunidades e setor privado podem viabilizar soluções descentralizadas (Haddad et al., 2022).

Nesse contexto, o Trilema Energético tem sido amplamente adotado como estrutura teórica para compreender os dilemas da transição, articulando segurança energética, equidade no acesso e sustentabilidade ambiental (Setyowati, 2020; Jing et al., 2021). A abordagem evidencia os trade-offs entre objetivos econômicos, sociais e ambientais, demandando decisões equilibradas.

Ferramentas como o triângulo ternário (Parović & Kljajić, 2022) e índices compostos como o ETI (Singh et al., 2019) operacionalizam esse equilíbrio comparativo.

A literatura oferece diferentes perspectivas: Marti e Puertas (2022) associam o trilema ao desenvolvimento sustentável; Nawaz e Alvi (2018) à segurança energética; Prado et al. (2016) ao crescimento econômico. O Fórum Econômico Mundial incorpora variáveis econômicas, ambientais e sociais no ETI (Singh et al., 2019), e Weiss et al. (2020) destacam o desafio de equilibrar essas dimensões, especialmente diante da sobreposição de políticas nacionais e internacionais. Embora predominem análises em níveis global e nacional (Le & Nguyen, 2019; Fu et al., 2021), cresce a necessidade de adaptação desses modelos às escalas regional e local, onde os efeitos da transição se materializam de forma mais imediata.

Abordagem Crítica de Índices e Sistemas de Monitoramento

Os modelos atuais de monitoramento da transição energética, como a Energy Justice Metric (EJM), o Energy Transitions Index (ETI) e a proposta de Parović e Kljajić (2022), têm papel relevante na sistematização de dados, comparações internacionais e suporte à formulação de políticas. Contudo, enfrentam críticas quanto à capacidade de representar a complexidade e a diversidade dos contextos territoriais. A EJM (Heffron, McCauley & Sovacool, 2015), fundamentada nas dimensões da justiça energética — distributiva, procedimental e do reconhecimento —, trouxe avanços ao integrar justiça e energia. No entanto, carece de critérios teóricos robustos para seleção de indicadores e tende a aplicar parâmetros homogêneos a contextos historicamente desiguais. O ETI, desenvolvido por Singh et al. (2019), é amplamente utilizado, mas peca pela atribuição de pesos iguais entre dimensões sem validação empírica, além de dificuldades de atualização em alguns países, o que limita sua sensibilidade temporal e contextual. Já o modelo de Parović e Kljajić (2022) utiliza médias simples e representação ternária, facilitando a visualização gráfica, mas universaliza métricas e ignora trajetórias históricas específicas. O uso de médias sem ponderação ou análise vetorial pode ocultar variações importantes, sobretudo em contextos com alta desigualdade interna.

Diante disso, este estudo propõe um modelo alternativo e complementar, baseado em uma abordagem vetorial tridimensional, que representa cada dimensão do Trilema Energético como vetores ortogonais. Isso possibilita uma visualização geométrica mais precisa, preservando a individualidade dos indicadores e captando a direção e intensidade das transformações — aspectos ausentes em médias aritméticas. A proposta avança metodologicamente ao integrar sensibilidade contextual, representação dinâmica e superação de limitações matemáticas, dialogando com abordagens como a EJM (Heffron et al., 2015) e incorporando avanços gráficos e analíticos. Assim, o modelo oferece subsídios mais robustos à formulação de políticas públicas em realidades subnacionais, especialmente no Sul Global.

METODOLOGIA

Este estudo propõe um sistema de monitoramento tridimensional e vetorial para avaliar a transição energética em nível subnacional, aplicável aos 27 estados brasileiros entre os anos de 2018 e 2022. A metodologia está estruturada em quatro etapas, com o objetivo de desenvolver e aplicar uma abordagem analítica alternativa ao modelo tradicional baseado em médias aritméticas, possibilitando identificar assimetrias internas e trajetórias diferenciadas da transição energética nos entes federativos.

Etapa 1: Revisão Teórica e Construção Conceitual

A primeira etapa envolveu a validação teórica do sistema de monitoramento, a partir de uma revisão crítica da literatura sobre transição energética, justiça energética e principais métricas internacionais, como a Energy Justice Metric (Heffron, McCauley & Sovacool, 2015), o Energy Transitions Index (Singh et al., 2019) e o modelo de Parović e Kljajić (2022), além das metodologias do World Energy Council, U.S. Energy Security Index e International Energy Security Index. Com base nessa análise, definiram-se as três dimensões centrais: Segurança Energética, Equidade Energética e Gestão Ambiental. Foram inicialmente sistematizados 86 indicadores, e critérios de inclusão/exclusão foram aplicados conforme disponibilidade de dados, frequência temporal, relevância teórica e qualidade metodológica. Após essa triagem, uma segunda validação foi realizada com especialistas acadêmicos e do setor energético, utilizando a metodologia World Café, resultando na seleção final de 28 indicadores: 9 para Equidade, 9 para Segurança e 10 para Gestão Ambiental.

Etapa 2: Construção do Banco de Dados

Nesta etapa, foi estruturado um banco de dados com informações secundárias de fontes oficiais como IBGE, ANEEL, EPE, Datasus, ANA, Portal da Transparência, entre outras. Os dados foram organizados por estado e por ano, abrangendo o período de 2018 a 2022. Para viabilizar a comparação entre os estados e ao longo do tempo, todos os indicadores foram normalizados em uma escala de 1 a 10, utilizando a técnica de reescalonamento baseada na amplitude dos valores observados. Essa normalização permite que os indicadores, mesmo com unidades distintas, possam ser comparados dentro de cada dimensão. O cálculo foi feito individualmente para cada indicador e ano, considerando o intervalo de 2018 a 2022. A fórmula aplicada é a seguinte:

$$Nota_i = 1 + \left[\frac{(x_i - x_{min})}{x_{max} - x_{min}} \times n \right] \quad (1), \text{ em que:}$$

- $Nota_i$ é a pontuação atribuída ao estado na escala para um dado indicador;
- x_i é o valor do indicador para um estado em determinado ano;
- x_{min} e x_{max} são, respectivamente, os menores e maiores valores do indicador entre todos os estados no ano considerado.

Em sequência, as notas das escalas foram atribuídas a todos os estados e anos do estudo. Para isso, utilizou-se do software Excel na construção e tratamento dos índices estaduais. Como descrito na subseção anterior foram selecionados 28 indicadores, distribuídos em 3 dimensões. Na dimensão Equidade Energética (EE) os indicadores foram nomeados: e_i , $i=1, \dots, 9$, onde: e_1 – Percentual da renda média da população gasta com contas de luz; e_2 – Índice de dívida estadual; e_3 – Subsídios para energia renovável (%); e_4 – Intensidade energética estadual; 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 de Mini e Microgeração Distribuída. Assim, foi atribuída à dimensão EE uma média das pontuações (conforme escala) dos nove indicadores. A fórmula representa a média da dimensão EE:

$$EE = \frac{\sum_{i=1}^9 e_i}{9} \quad (2)$$

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 energia elétrica; s_3 – Fornecimento de energia per capita; s_4 – Porcentagem de energia elétrica proveniente de fontes renováveis; s_5 – Geração total de energia fotovoltaica por estado; s_6 – Geração total de energia eólica por estado; s_7 – Capacidade instalada de geração de energia elétrica (renovável); s_8 – Consumo de energia elétrica pelo total de usuários da rede; s_9 – Índice de importação/exportação

de energia. Assim, foi atribuída à dimensão SE uma média das pontuações (conforme escala) dos nove indicadores. A fórmula representa a média da dimensão SE:

$$ES = \frac{\sum_{i=1}^9 S_i}{9} \quad (3)$$

Os indicadores da dimensão Gestão Ambiental (GA) foram nomeados: a_i , $i = 1, \dots, 10$, onde: a_1 – Consumo de água per capita; a_2 – População sem acesso à água; a_3 – Cobertura de Saneamento Básico – população com acesso à rede de esgoto; a_4 – Índice de Esgoto Tratado; a_5 – Emissões de Gases de 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 – Pessoas afetadas por eventos extremos e desastres climáticos; a_{10} – Danos por eventos extremos e desastres climáticos. Assim, foi atribuída à dimensão AM uma média das pontuações (conforme escala) dos dez indicadores. A fórmula representa a média da dimensão AM:

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^{10} a_i}{10} \quad (4)$$

Assim, foi obtido o índice Energy Trilemma (ET) em nível subnacional para cada dimensão e para todos os estados brasileiros nos últimos 5 anos (entre 2018 e 2022).

Etapa 3: Modelagem Vetorial do Trilema Energético

O modelo proposto parte da limitação das médias aritméticas, que podem ocultar desequilíbrios internos entre indicadores de uma mesma dimensão, ao igualar contextos com distribuições distintas. Para superar essa limitação, adotou-se uma abordagem vetorial, representando cada dimensão como um vetor no espaço n-dimensional dos indicadores. Essa modelagem proporciona uma análise mais precisa e multifacetada, com cinco principais contribuições: (1) Preserva a estrutura interna dos dados, mantendo direção e magnitude relativas dos indicadores; (2) Evidencia desequilíbrios, ao mensurar coesão ou dispersão interna; (3) Amplia a comparabilidade entre territórios ou períodos, com uso de métricas como distância euclidiana, ângulos ou normas; (4) Indica o grau de avanço na transição, por meio da comparação entre o vetor do estado e um vetor ideal; (5) Orienta políticas, ao identificar a direção prioritária dentro do Trilema Energético. Assim, a abordagem vetorial representa um avanço metodológico relevante, permitindo uma leitura mais fidedigna da transição energética — especialmente em realidades complexas e desiguais, como as do Sul Global.

Inicialmente, para a concepção e construção do modelo "ideal" do Trilema Energético em nível subnacional, deve-se ter por base a indicação de um vetor normalizador. Para isso, foi parametrizado que a base trivial indicaria as dimensões modeladas pelos eixos. Ou seja, Equidade Energética representada pelo vetor $v_1 = (1,0,0)$, Segurança Energética pelo vetor $v_2 = (0,1,0)$ e Gestão Ambiental pelo vetor $v_3 = (0,0,1)$. Assim, definimos o vetor ótimo (v_0) como uma combinação linear trivial de v_1 , v_2 e v_3 , resultando no vetor ideal.

$$v_0 = 1 \cdot v_1 + 1 \cdot v_2 + 1 \cdot v_3 = (1,1,1) \quad (5)$$

Pode-se destacar primeiramente a característica de direção e sentido, pois quando tomamos uma combinação linear $u = \alpha \times v_1 + \beta \times v_2 + \gamma \times v_3$, com coordenadas $\alpha, \beta, \gamma \in [0,1]$ indicando quão eficiente é a gestão de transição energética representada pelo vetor u . Além disso, outra propriedade específica de um vetor é seu módulo:

$$\|u\| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} \quad (6)$$

O módulo vetorial permite mensurar a eficiência e intensidade do gerenciamento da transição energética, normalizando-se, por exemplo $\|v_1\|$. Comparado aos modelos tradicionais, o modelo vetorial amplia a capacidade de capturar nuances territoriais relevantes. Considere dois

estados hipotéticos: o Estado X, com notas 5 (Segurança), 6 (Equidade) e 3 (Ambiental); e o Estado Z, com 3, 6 e 5, respectivamente. Ambos apresentariam a mesma média aritmética (4,67), sugerindo equivalência. Contudo, essa média oculta os desequilíbrios internos entre as dimensões, mascarando diferentes prioridades estratégicas. Na abordagem vetorial, embora os estados representados por $v_x = (5,6,3)$ e $v_z = (3,6,5)$ tenham o mesmo módulo, os vetores possuem direções distintas, revelando perfis de desempenho contrastantes. Essa representação reforça a robustez analítica do modelo proposto, pois permite identificar assimetrias interdimensionais e orientar políticas com maior precisão — superando as limitações das médias simples e fornecendo subsídios mais qualificados ao planejamento energético subnacional.

A modelagem vetorial dos dados exigiu o uso de ferramentas computacionais que garantissem precisão matemática e visualização gráfica adequada. Para este estudo, Python foi adotado como ferramenta central, dada sua flexibilidade e integração com bibliotecas científicas como NumPy, Pandas, Matplotlib e Plotly, que permitem desde a manipulação de grandes volumes de dados até a construção de visualizações tridimensionais interativas (Lin et al., 2025). A implementação envolveu a importação e tratamento dos dados com Pandas, extração dos vetores representativos de cada dimensão do Trilema, e visualização interativa com Plotly e Dash, facilitando a análise das direções e intensidades vetoriais por estado e período. Essa abordagem ampliou a clareza na identificação de padrões e ofereceu suporte qualificado à tomada de decisão (Rasheed et al., 2022). Os resultados da modelagem computacional — incluindo posição relativa, intensidade e direcionalidade da transição energética — serão detalhados nas seções seguintes, com foco nas trajetórias rumo a uma transição justa.

Etapa 4: Análise Comparativa entre Modelos

A etapa final consistiu na comparação entre os resultados do modelo vetorial e do modelo tradicional baseado em médias aritméticas. Identificaram-se estados com médias semelhantes no índice do Trilema Energético, mas com vetores de direções distintas, evidenciando diferentes prioridades e desequilíbrios internos não captados por médias simples. Por exemplo, os Estados A (6, 4, 5) e B (4, 6, 5) possuem a mesma média (5), mas trajetórias distintas entre as dimensões. A abordagem vetorial, ao considerar direção e intensidade, revela essas assimetrias e fornece subsídios analíticos mais robustos para diagnóstico e planejamento. Essa comparação evidencia o avanço metodológico do modelo vetorial, ao captar a heterogeneidade territorial e fortalecer o alinhamento com os princípios de uma transição energética justa.

RESULTADOS

Índices do trilema energético em nível subnacional: uma perspectiva brasileira

Após a definição e validação do Sistema de Monitoramento, foi construído um banco de dados com os indicadores do Trilema Energético, utilizando fontes secundárias confiáveis, principalmente governamentais. A análise abrange os 27 estados brasileiros no período de 2018 a 2022, conforme os critérios metodológicos estabelecidos. Esta subseção apresenta os resultados da coleta, organização e aplicação das fórmulas, oferecendo uma visão geral do Trilema Energético em nível subnacional, com destaque para os valores médios dos estados entre 2018 e 2022 (Tabela 1).

Tabela 1: Resultados das médias das dimensões do Trilema Energético em Nível Subnacional entre 2018 e 2022

| Região | Estado | Trilema 2018 | Trilema 2019 | Trilema 2020 | Trilema 2021 | Trilema 2022 |
|--------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|--------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|

| | | | | | | |
|--------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Norte | Amazonas | 4,8222 | 4,6222 | 4,7852 | 4,3074 | 4,4630 |
| | Amapá | 5,3556 | 5,5778 | 5,6148 | 5,1815 | 5,4630 |
| | Pará | 3,5481 | 4,1370 | 4,5778 | 4,7926 | 4,4778 |
| | Tocantins | 5,8333 | 5,9741 | 6,0889 | 6,1259 | 6,2370 |
| | Roraima | 5,3667 | 5,1778 | 5,0370 | 5,0889 | 4,9111 |
| | Acre | 4,9852 | 4,8778 | 4,6037 | 4,6481 | 4,8704 |
| | Rondônia | 6,5185 | 6,0815 | 6,2926 | 6,1778 | 6,1778 |
| Nordeste | Maranhão | 4,8852 | 4,5185 | 5,0778 | 5,0630 | 5,1815 |
| | Piauí | 6,3148 | 6,0593 | 6,1000 | 6,1704 | 6,2407 |
| | Ceará | 6,3704 | 5,8963 | 6,0815 | 5,9074 | 6,1889 |
| | Rio Grande do Norte | 6,8296 | 6,4704 | 6,6667 | 6,4852 | 6,7296 |
| | Paraíba | 6,0148 | 6,4296 | 6,7333 | 6,1815 | 6,5815 |
| | Pernambuco | 5,8407 | 5,8148 | 5,9556 | 5,8444 | 5,3852 |
| | Alagoas | 5,7556 | 5,2222 | 5,1185 | 5,3556 | 6,6037 |
| | Sergipe | 6,0222 | 5,8185 | 6,2222 | 5,8111 | 5,9556 |
| Bahia | 5,8704 | 5,9815 | 6,0778 | 5,6778 | 5,8333 | |
| Sudeste | Espírito Santo | 6,3926 | 6,5037 | 6,1778 | 6,1667 | 6,2852 |
| | Minas gerais | 6,8519 | 6,9259 | 6,2926 | 6,8259 | 6,2148 |
| | Rio de Janeiro | 6,0926 | 5,8815 | 6,0148 | 5,7741 | 5,2963 |
| | São Paulo | 6,5111 | 6,5185 | 5,8370 | 6,1593 | 6,1000 |
| Centro Oeste | Mato Grosso | 6,2296 | 6,3704 | 6,0630 | 6,3407 | 6,8778 |
| | Mato Grosso do Sul | 6,6593 | 6,8000 | 7,3333 | 6,3074 | 6,3148 |
| | Goiás | 6,9185 | 7,0185 | 6,4037 | 6,8111 | 6,8444 |
| | Distrito Federal | 7,7556 | 7,4630 | 7,6444 | 7,5000 | 7,9296 |
| Sul | Paraná | 7,2630 | 7,4074 | 7,2074 | 7,2111 | 7,2815 |
| | Santa Catarina | 6,4889 | 7,1370 | 6,6222 | 6,7185 | 7,7963 |
| | Rio Grande do Sul | 6,8815 | 6,9296 | 6,9519 | 6,9889 | 7,1370 |

Em 2022, na dimensão de Equidade Energética, os estados das regiões Norte e Nordeste apresentaram maior distância em relação ao ponto vetorial ideal. No Norte, o Pará registrou o pior índice (2,8999), seguido por Amazonas (4,1111) e Amapá (4,2222). No Pará, os indicadores com pior desempenho foram: índice de endividamento (3,923%, o mais alto do país), usuários cadastrados em tarifa social (40,904%) e capacidade instalada de mini e microgeração distribuída (2,196%), todos avaliados com nota 1,00. O estado também teve baixa pontuação nos indicadores de subsídios à energia renovável (R\$ 69,350 milhões de um total nacional de R\$ 1,909 bilhão) e IDH. No Nordeste, os estados com os piores resultados foram Piauí e Sergipe (4,8889), além de Alagoas, com o pior desempenho regional (4,6667). Em Alagoas, destacam-se negativamente os indicadores de IDH, GINI, capacidade instalada de mini e microgeração distribuída (4,088%) e subsídios à ER (R\$ 20,727 milhões de um total regional de R\$ 227,782 milhões). O percentual de usuários cadastrados em tarifa social foi de 37,75% em 2022, refletindo a vulnerabilidade da população atendida.

Na dimensão Equidade Energética, os melhores índices concentram-se nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, com destaque para o Distrito Federal (8,7778), Minas Gerais (8,7778), Rio Grande do Sul (9,1111) e Santa Catarina (9,0000). No Distrito Federal, seis indicadores — participação da energia elétrica na renda, intensidade energética, IDH, tarifa social, taxa de

eletrificação e mini/microgeração — atingiram nota máxima (10,000), enquanto endividamento, subsídios à ER e GINI tiveram desempenho inferior. Em Minas Gerais, os destaques positivos incluem participação da energia na renda, endividamento, subsídios à ER e taxa de eletrificação (10,000). Por outro lado, os menores resultados do estado — ainda superiores à média nacional — foram para intensidade energética (9,000), IDH (8,000), GINI (7,000) e mini/microgeração (7,000).

No Rio Grande do Sul, todos os principais indicadores (endividamento, intensidade energética, eletrificação e mini/microgeração) alcançaram nota 10,000. Em Santa Catarina, destacam-se os indicadores de GINI, tarifa social e taxa de eletrificação, todos com avaliação máxima. Na dimensão Segurança Energética, o destaque se volta para o Nordeste, cujos estados lideram os índices nacionais. Esse resultado está associado à diversificação da matriz elétrica regional (hidrelétricas, termelétricas, usinas solares e eólicas) e ao expressivo crescimento da geração renovável (eólica e solar) na última década. Em 2022, os estados nordestinos produziram mais energia do que consumiram, contribuindo com excedentes ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Em contrapartida, estados do Sudeste, especialmente São Paulo, apresentaram elevado consumo — quase o triplo da produção local — reflexo do porte industrial, populacional e econômico da unidade federativa.

Um dos indicadores relevantes da dimensão Segurança Energética é a qualidade do fornecimento de eletricidade, baseada no Índice ANEEL de Satisfação do Consumidor (IASC). Em 2022, os melhores resultados foram observados nas regiões Sul (média 9,6700) e Nordeste (7,0000). Já as piores médias ocorreram nas regiões Sudeste (4,2500) e Norte (2,5700), com destaque negativo para São Paulo (2,0000) e Rio de Janeiro (1,0000), e no Norte, para Amazonas, Pará, Roraima e Acre (todos com nota 1,0000). O índice avalia a satisfação dos consumidores com os serviços das distribuidoras e orienta ações regulatórias da ANEEL.

Outro indicador-chave é a quota de eletricidade proveniente de fontes renováveis (i04), que reflete o grau de descarbonização da matriz energética estadual. Em 2022, 16 estados apresentaram mais de 90% de geração renovável, com destaque para Piauí (99,993%), Tocantins (99,989%), Alagoas (99,696%) e Distrito Federal (99,609%). Por outro lado, os menores índices foram registrados no Acre (14,771%), Rio de Janeiro (16,301%), Amazonas (16,953%) e Roraima (17,268%). No âmbito da geração de energia renovável, o sistema de monitoramento considera as fontes fotovoltaica e eólica. Em 2022, o Piauí se destacou na geração fotovoltaica, com 9,586% da energia gerada proveniente dessa fonte. Na geração eólica, os maiores percentuais foram observados no Rio Grande do Norte (89,958%) e novamente no Piauí (77,752%), evidenciando a relevância dessas fontes na matriz energética desses estados.

Na dimensão Gestão Ambiental, os melhores resultados concentram-se nas regiões Centro-Oeste e Sul, com destaque para o Distrito Federal (9,9000), Santa Catarina (9,5000), Mato Grosso (9,3000) e, no Nordeste, Alagoas (9,7000). Os piores desempenhos foram observados nos estados das regiões Sudeste e Norte, especialmente Minas Gerais (5,2000), Pernambuco (5,6000), Rio de Janeiro (6,0000), Pará (6,1000) e São Paulo (6,3000). Dado o crescente debate sobre o papel da água na transição energética — inclusive na produção de energia solar e hidrogênio verde —, foram incorporados indicadores de consumo e acesso à água e de esgotamento sanitário. A Tabela 2 apresenta os resultados das três dimensões do Trilema Energético em nível subnacional, no período de 2018 a 2022.

Tabela 2: Resultados do Trilema Energético em Nível Subnacional por dimensão (2018 a 2022)

| Região | Estado | EE 2018 | SE 2018 | GA 2018 | EE 2019 | SE 2019 | GA 2019 | EE 2020 | SE 2020 | GA 2020 | EE 2021 | SE 2021 | GA 2021 | EE 2022 | SE 2022 | GA 2022 |
|--------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Norte | Amazonas | 4,2222 | 2,4444 | 7,8000 | 4,2222 | 2,4444 | 7,2000 | 4,0000 | 2,5556 | 7,8000 | 3,8889 | 2,3333 | 6,7000 | 4,1111 | 1,7778 | 7,5000 |
| | Amapá | 4,8889 | 3,7778 | 7,4000 | 5,4444 | 3,8889 | 7,4000 | 5,4444 | 4,0000 | 7,4000 | 4,5556 | 3,8889 | 7,1000 | 4,4444 | 4,4444 | 7,5000 |
| | Pará | 2,8889 | 4,5556 | 3,2000 | 3,4444 | 4,6667 | 4,3000 | 3,5556 | 4,7778 | 5,4000 | 3,1111 | 4,6667 | 6,6000 | 2,8889 | 4,4444 | 6,1000 |
| | Tocantins | 4,7778 | 5,2222 | 7,5000 | 5,2222 | 5,0000 | 7,7000 | 5,5556 | 5,1111 | 7,6000 | 5,4444 | 5,3333 | 7,6000 | 5,5556 | 5,5556 | 7,6000 |
| | Roraima | 5,1111 | 1,8889 | 9,1000 | 4,7778 | 1,5556 | 9,2000 | 5,0000 | 2,1111 | 8,0000 | 4,4444 | 2,2222 | 8,6000 | 4,5556 | 1,7778 | 8,4000 |
| | Acre | 5,1111 | 2,4444 | 7,4000 | 5,4444 | 1,8889 | 7,3000 | 5,0000 | 2,1111 | 6,7000 | 5,3333 | 2,1111 | 6,5000 | 5,2222 | 1,8889 | 7,5000 |
| | Rondônia | 5,7778 | 6,7778 | 7,0000 | 5,5556 | 5,8889 | 6,8000 | 5,5556 | 6,2222 | 7,1000 | 5,1111 | 6,2222 | 7,2000 | 5,0000 | 6,3333 | 7,2000 |
| Nordeste | Maranhão | 4,1111 | 3,4444 | 7,1000 | 4,2222 | 3,3333 | 6,0000 | 4,6667 | 3,6667 | 6,9000 | 4,2222 | 3,6667 | 7,3000 | 5,0000 | 3,4444 | 7,1000 |
| | Piauí | 4,6667 | 6,7778 | 7,5000 | 4,5556 | 6,2222 | 7,4000 | 4,7778 | 6,2222 | 7,3000 | 4,8889 | 6,2222 | 7,4000 | 4,8889 | 6,3333 | 7,5000 |
| | Ceará | 5,7778 | 4,3333 | 9,0000 | 5,6667 | 4,2222 | 7,8000 | 5,7778 | 4,6667 | 7,8000 | 5,8889 | 4,3333 | 7,5000 | 5,7778 | 4,8889 | 7,9000 |
| | Rio Grande do Norte | 5,3333 | 6,5556 | 8,6000 | 4,7778 | 6,3333 | 8,3000 | 5,4444 | 6,5556 | 8,0000 | 5,0000 | 6,5556 | 7,9000 | 5,1111 | 6,7778 | 8,3000 |
| | Paraíba | 5,2222 | 4,2222 | 8,6000 | 5,8889 | 5,0000 | 8,4000 | 6,7778 | 5,2222 | 8,2000 | 6,1111 | 4,3333 | 8,1000 | 5,7778 | 5,6667 | 8,3000 |
| | Pernambuco | 5,2222 | 4,0000 | 8,3000 | 5,4444 | 4,0000 | 8,0000 | 5,4444 | 4,2222 | 8,2000 | 5,4444 | 3,8889 | 8,2000 | 5,6667 | 4,8889 | 5,6000 |
| | Alagoas | 4,8889 | 4,7778 | 7,6000 | 5,0000 | 4,6667 | 6,0000 | 4,6667 | 4,8889 | 5,8000 | 4,6667 | 5,0000 | 6,4000 | 4,6667 | 5,4444 | 9,7000 |
| | Sergipe | 4,6667 | 5,0000 | 8,4000 | 4,8889 | 4,6667 | 7,9000 | 5,5556 | 5,1111 | 8,0000 | 4,8889 | 4,4444 | 8,1000 | 4,8889 | 4,7778 | 8,2000 |
| Bahia | 4,8889 | 5,2222 | 7,5000 | 5,0000 | 5,4444 | 7,5000 | 5,3333 | 5,0000 | 7,9000 | 4,8889 | 5,4444 | 6,7000 | 5,0000 | 5,0000 | 7,5000 | |
| Sudeste | Espírito Santo | 7,3333 | 3,4444 | 8,4000 | 7,7778 | 3,3333 | 8,4000 | 7,8889 | 3,4444 | 7,2000 | 7,3333 | 3,6667 | 7,5000 | 8,1111 | 3,4444 | 7,3000 |
| | Minas gerais | 8,4444 | 5,1111 | 7,0000 | 8,6667 | 5,1111 | 7,0000 | 8,6667 | 5,1111 | 5,1000 | 8,6667 | 5,1111 | 6,7000 | 8,7778 | 4,6667 | 5,2000 |
| | Rio de Janeiro | 7,6667 | 3,1111 | 7,5000 | 7,6667 | 2,7778 | 7,2000 | 7,4444 | 3,0000 | 7,6000 | 7,3333 | 2,8889 | 7,1000 | 7,4444 | 2,4444 | 6,0000 |
| | São Paulo | 8,2222 | 4,1111 | 7,2000 | 8,4444 | 4,1111 | 7,0000 | 8,3333 | 3,7778 | 5,4000 | 8,2222 | 3,5556 | 6,7000 | 8,3333 | 3,6667 | 6,3000 |
| Centro Oeste | Mato Grosso | 6,6667 | 5,2222 | 6,8000 | 7,1111 | 5,0000 | 7,0000 | 6,2222 | 4,6667 | 7,3000 | 6,4444 | 4,7778 | 7,8000 | 6,6667 | 4,6667 | 9,3000 |
| | Mato Grosso do Sul | 6,5556 | 5,2222 | 8,2000 | 7,0000 | 5,0000 | 8,4000 | 7,0000 | 5,0000 | 10,0000 | 7,2222 | 5,0000 | 6,7000 | 6,8889 | 4,5556 | 7,5000 |
| | Goiás | 7,6667 | 4,8889 | 8,2000 | 8,0000 | 4,5556 | 8,5000 | 6,7778 | 4,3333 | 8,1000 | 7,6667 | 4,6667 | 8,1000 | 8,0000 | 4,3333 | 8,2000 |
| | Distrito Federal | 8,3333 | 5,3333 | 9,6000 | 8,5556 | 5,3333 | 8,5000 | 8,7778 | 5,5556 | 8,6000 | 8,5556 | 5,4444 | 8,5000 | 8,7778 | 5,1111 | 9,9000 |
| Sul | Paraná | 7,3333 | 5,5556 | 8,9000 | 7,6667 | 5,5556 | 9,0000 | 7,7778 | 5,4444 | 8,4000 | 8,0000 | 5,3333 | 8,3000 | 8,0000 | 5,4444 | 8,4000 |
| | Santa Catarina | 8,8889 | 4,7778 | 5,8000 | 9,3333 | 4,7778 | 7,3000 | 8,7778 | 4,8889 | 6,2000 | 8,7778 | 4,7778 | 6,6000 | 9,0000 | 4,8889 | 9,5000 |
| | Rio Grande do Sul | 8,4444 | 5,0000 | 7,2000 | 9,0000 | 4,8889 | 6,9000 | 8,7778 | 4,7778 | 7,3000 | 8,7778 | 4,8889 | 7,3000 | 9,1111 | 5,0000 | 7,3000 |

* EE (Equidade Energética), SE (Segurança Energética), GA (Gestão Ambiental).

Os piores índices de acesso à água tratada foram registrados nos estados do Norte, como Amapá (80,334%), Rondônia (61,097%) e Acre (54,460%). Em contraste, São Paulo apresentou 96,44% de cobertura, ao lado de bons desempenhos do Distrito Federal, Paraná e Santa Catarina. Nos indicadores de acesso à rede de esgoto, os estados do Norte e Nordeste também apresentaram os piores resultados, com destaque para Acre (96,231%), Amapá (93,234%), Rondônia (92,530%), Alagoas (85,649%), Maranhão (84,726%) e Piauí (78,697%) da população sem cobertura. Quanto ao tratamento de esgoto, os piores índices foram observados no Pará (6,923%), Rondônia (8,348%) e Maranhão (8,644%). Outro indicador crítico é o de emissões de gases de efeito estufa (GEE), essenciais para orientar políticas de mitigação. Em 2022, os maiores índices foram registrados nos estados do Sudeste: Rio de Janeiro (19,772%), Espírito Santo (8,698%), Minas Gerais (5,073%) e São Paulo (4,485%), além de Mato Grosso (12,039%), no Centro-Oeste. Por fim, o indicador de mortes por problemas respiratórios reforça os impactos das emissões sobre a saúde pública, com os piores resultados em São Paulo (26,355%), Minas Gerais (11,973%) e Rio de Janeiro (9,096%).

Estudos recentes têm relacionado o desmatamento à transição energética (Lee et al., 2015), justiça energética (Acheampong & Opoku, 2023), segurança energética (Ofozor et al., 2024) e à implantação de projetos renováveis, como usinas eólicas (Enevoldsen, 2018). Por isso, o sistema de monitoramento incorpora a taxa de desmatamento como indicador subnacional. Em 2022, os estados com maiores taxas foram: Pará (23,846%), Mato Grosso (12,306%), Maranhão (11,712%), Rio Grande do Sul (7,706%), Amazonas (6,857%), Rondônia (6,485%), Bahia (6,482%), Tocantins (5,252%) e Piauí (3,990%) — somando 84,635% do desmatamento nacional. Os principais vetores incluem expansão agropecuária, especialmente da soja, criação de gado, extração de madeira e incêndios florestais (Fearnside, 2018). Soma-se a isso a instalação crescente de projetos eólicos e solares em áreas sensíveis do Cerrado e da Amazônia (Backhouse & Lehmann, 2020). Os dados foram organizados segundo as três dimensões do estudo e consolidados em planilha Excel para o cálculo do Índice do Trilema Energético em nível subnacional. A análise dos 27 estados brasileiros, entre 2018 e 2022, proporcionou uma visão detalhada do desempenho em Equidade, Segurança e Gestão Ambiental, evidenciando variações significativas entre as regiões.

Comparação entre Médias Gerais e Composição Dimensional: evidências da relevância do Trilema Energético subnacional

A análise das médias estaduais do Índice do Trilema Energético (2018–2022) mostra que valores semelhantes no índice geral podem ocultar composições dimensionais bastante distintas entre os estados. Essa constatação reforça a relevância de uma abordagem tridimensional e vetorial, que evita a diluição de desigualdades estruturais ao considerar Equidade Energética, Segurança Energética e Gestão Ambiental separadamente. Casos como Maranhão (2022) e Amapá (2021), ambos com média 5,18, revelam perfis diferentes: o Maranhão apresenta maior equilíbrio entre dimensões (Equidade 5,00; Segurança 3,44; Gestão 7,10), enquanto o Amapá apresenta baixa equidade (4,22), mas melhores resultados em Segurança (3,88) e Gestão (7,10). O mesmo ocorre com Alagoas (2021) e Amapá (2018) (ambos com 5,35), Tocantins (2018) e Bahia (2022) (5,83), Sergipe (2022) e Pernambuco (2020) (5,95), cujas trajetórias energéticas contrastam entre si.

Comparações como Piauí (2020) e São Paulo (2022), ambos com média 6,24, ilustram ainda mais essa divergência: o Piauí apresenta desempenho equilibrado (Equidade 4,88; Segurança 6,33; Gestão 7,50), com forte presença de renováveis, enquanto São Paulo se destaca em Segurança (8,33), mas apresenta fragilidades em Gestão Ambiental (6,30), refletindo emissões elevadas e poluição urbana. Situações semelhantes ocorrem com Rondônia (2020) e Minas Gerais (2020) (ambos com 6,29), onde Rondônia se destaca em Gestão Ambiental e Minas Gerais em Segurança Energética. Já Piauí (2018) e Mato Grosso do Sul (2022), com média 6,31, revelam ênfases

distintas: o primeiro em Gestão Ambiental (7,5), o segundo em Segurança (6,88). Santa Catarina (2019) e Rio Grande do Sul (2022) (ambos com 7,13) também refletem trajetórias próprias.

Esses contrastes reforçam os argumentos de autores como Howells et al. (2013) e Bazilian et al. (2011) sobre a necessidade de métricas multidimensionais para captar a complexidade da transição energética. A abordagem vetorial proposta permite não apenas comparações entre estados, mas também a identificação de desequilíbrios internos, sendo mais coerente com os princípios da justiça energética. Portanto, a análise comparativa entre médias gerais e suas composições dimensionais confirma a pertinência do modelo vetorial como ferramenta analítica e de apoio à gestão pública. Ao integrar três dimensões sem apagar suas especificidades, o sistema de monitoramento contribui para uma visão mais precisa e justa da transição energética subnacional.

Piauí (2020) x São Paulo (2022): similaridade aparente, trajetórias contrastantes

Apesar de apresentarem a mesma média no Índice do Trilema Energético (6,24), Piauí (2020) e São Paulo (2022) revelam trajetórias profundamente distintas. O Piauí apresenta uma distribuição mais equilibrada entre as dimensões — Gestão Ambiental (7,50), Segurança Energética (6,33) e Equidade Energética (4,88) —, enquanto São Paulo concentra-se em Segurança Energética (8,33), com valores mais baixos em Gestão Ambiental (6,30) e Equidade (4,10).

Na Equidade Energética, o Piauí apresenta alta taxa de eletrificação (99,10%), mas forte vulnerabilidade socioeconômica: 41,56% da população depende da tarifa social (nota 1,0000) e o IDH é 0,708 (nota 2,0000). A energia compromete 10,76% da renda média. Em contraste, São Paulo tem IDH mais elevado (0,806) e energia representando apenas 6,19% da renda. Na Segurança Energética, São Paulo consome mais energia per capita (3,11 MWh/hab) que o Piauí (1,13 MWh/hab), mas sua satisfação com o fornecimento é inferior (49,28%, nota 2,0000), frente aos 56,42% do Piauí. No aspecto ambiental, o Piauí é amplamente superior, com 99,99% de renováveis na matriz e baixa emissão de GEE (1,24%), além de menor impacto de eventos climáticos (0,25%). São Paulo, embora relevante em renováveis (86,86%), responde por 6,56% das emissões nacionais e enfrenta maiores danos ambientais (7,70%). As figuras 1 e 2 a seguir mostram o Trilema Energético em nível subnacional comparativo entre os estados do Piauí (2020) e São Paulo (2022).

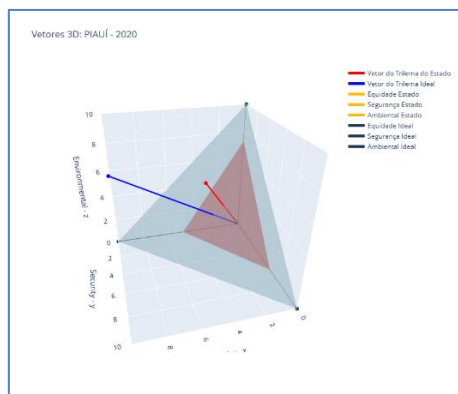


Figura 1: Piauí (2020)

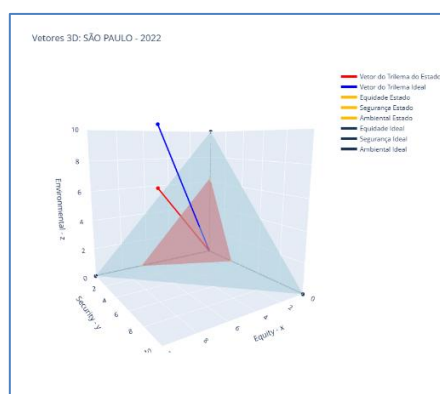


Figura 2: São Paulo (2022)

Esses dados mostram que, embora compartilhem o mesmo valor médio, os vetores dimensionais são divergentes: o Piauí avança na sustentabilidade com equilíbrio energético e fragilidades sociais; São Paulo destaca-se em infraestrutura e consumo, mas enfrenta desafios ambientais e de justiça energética. A análise vetorial evidencia essas nuances, oferecendo uma leitura mais fiel das trajetórias subnacionais de transição.

Rondônia (2020) x Minas Gerais (2020): a divergência entre robustez ambiental e estrutura técnica

Embora compartilhem a mesma média no Índice do Trilema Energético (6,29), Rondônia e Minas Gerais revelam composições contrastantes. Rondônia se destaca em Segurança Energética (6,75) e Gestão Ambiental (6,50), mas tem baixa Equidade Energética (5,63). Já Minas Gerais apresenta distribuição mais equilibrada entre as três dimensões: Equidade (7,25), Segurança (5,75) e Gestão (5,87).

Em equidade, Rondônia enfrenta desafios: apesar da alta eletrificação (99,10%), apresenta 41,56% de beneficiários da tarifa social, IDH de 0,708 e 10,16% da renda comprometida com energia — resultando em nota mínima para vários indicadores. Minas Gerais, em contraste, exibe 100% de eletrificação, apenas 10,33% de tarifa social, IDH de 0,806 e maior capacidade de pagamento, o que reflete maior estabilidade social. Na segurança energética, Rondônia lidera em fornecimento per capita (19,43 MWh/hab) e renováveis (98,87%), com menor consumo (1,89 MWh/hab) compensado pela alta geração. Minas Gerais apresenta menor fornecimento (2,91 MWh/hab), mas maior consumo (2,62 MWh/hab) e índice de satisfação do fornecimento superior (66,06% contra 43,83%). Na gestão ambiental, Rondônia apresenta menor emissão de GEE (6,01%) e maior eficiência hídrica (2,65% do consumo nacional), mas sofre com alta taxa de desmatamento (6,48%) e danos por eventos climáticos (10,76%). Minas tem maiores emissões (7,26%), maior uso hídrico (4,82%) e menor impacto climático (6,19%). As figuras 3 e 4 a seguir mostram o Trilema Energético em nível subnacional comparativo entre os estados do Rondônia (2020) e Minas Gerais (2022).

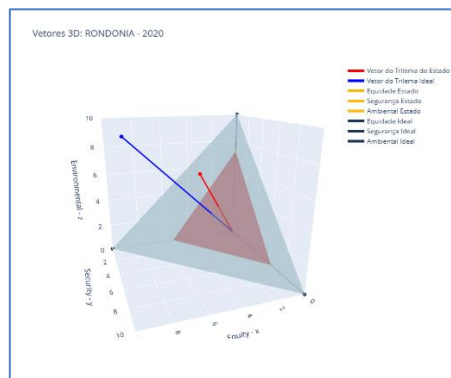


Figura 3: Rondônia (2020)

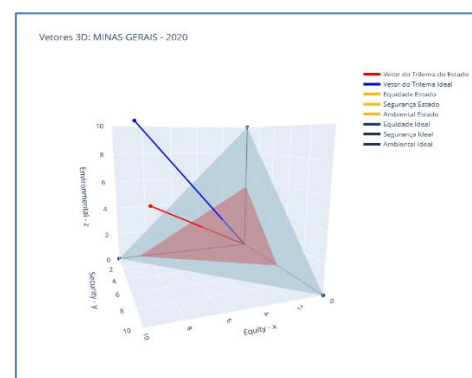


Figura 4: Minas Gerais (2020)

Assim, mais uma vez apesar de médias iguais o trilema energético no modelo vetorial revela diferenças no caminho para transição energética dos estados. Enquanto Rondônia destaca-se pela capacidade energética e menor emissão relativa, mas enfrenta sérios desafios sociais e ambientais. Minas Gerais, por sua vez, apresenta uma transição mais equilibrada e institucionalmente estruturada, mesmo com desempenho ambiental mais modesto.

DISCUSSÃO

Inter-relações dimensionais e implicações estruturais

Observa-se a necessidade de considerações ou perspectivas que levem em consideração aspectos econômicos e sociais para equilibrar a busca pela segurança energética e a mitigação das mudanças climáticas (Elkhatat & Al-Muhtaseb, 2024). Essa abordagem integrada permite ir além da análise isolada de cada variável (sendo esta dimensão ou indicador), revelando dinâmicas complexas que se cruzam e impactam mutuamente o desempenho do estado na transição

energética. Um exemplo dessa inter-relação ocorre dentro da própria Equidade Energética, entre subsídios à energia renovável e o percentual de usuários na tarifa social. Estudos como o de Butler & Neuhoff (2008) demonstram que subsídios bem desenhados reduzem custos ao consumidor e estimulam projetos renováveis, promovendo ao mesmo tempo inclusão energética e sustentabilidade. Outra correlação relevante envolve o consumo per capita de energia (Segurança Energética) e a renda média (Equidade). Conforme Li et al. (2014) e Lin & Wang (2020), aumento de renda nem sempre implica maior consumo, devido à proporção do gasto energético no orçamento das famílias — evidência de pobreza energética. Já Pereira et al. (2010, 2011) apontam que a eletrificação contribui significativamente para reduzir a pobreza e melhorar a equidade.

Na Segurança Energética, destaca-se a dependência da geração distribuída (como a solar) da qualidade da rede elétrica. Segundo Prado et al. (2024), falhas na rede comprometem o desempenho e o retorno dos sistemas fotovoltaicos. Já Islam et al. (2024) e Panteli et al. (2017) apontam a necessidade de modernização da infraestrutura para garantir flexibilidade, estabilidade e escalabilidade, essenciais à transição sustentável. Peng et al. (2021) e Shirazi (2022) reforçam que redes robustas são pré-condição para políticas eficazes de descarbonização descentralizada. Contudo, o crescimento da matriz renovável no Brasil também gera externalidades ambientais, como o avanço do desmatamento em áreas de instalação de projetos, especialmente solares e eólicos. Isso evidencia uma tensão entre Segurança e Gestão Ambiental, já apontada por Elkhatat & Al-Muhtaseb (2024) e Tol (2023), que alertam para os riscos de sacrificar princípios socioambientais diante da pressão por ampliar a oferta renovável em países emergentes. Além disso, aspectos como a resiliência fiscal afetam transversalmente as três dimensões do trilema. Estados com maior solidez orçamentária têm maior capacidade de investir em infraestrutura (Segurança), programas sociais (Equidade) e mitigação ambiental (Gestão). Para Unel et al. (2020), a eficácia das políticas públicas depende da articulação entre capacidade institucional, estabilidade macroeconômica e planejamento integrado.

Finalmente, conforme reforçam Elkhatat & Al-Muhtaseb (2024), a formulação de políticas energéticas deve transcender abordagens setoriais, priorizando ganhos sociais amplos como melhoria da qualidade do ar, equidade no acesso à energia e respeito às realidades locais. Fatores como condições socioeconômicas, necessidades comunitárias e capacidade adaptativa regional devem estar no centro do desenho de uma transição energética justa, equilibrada e territorialmente adequada.

Implicações para políticas públicas

A leitura vetorial da transição energética, ao integrar Equidade, Segurança e Gestão Ambiental, permite diferenciar realidades aparentemente semelhantes e orientar políticas públicas mais adaptadas às especificidades regionais. No contexto brasileiro, marcado por desigualdades territoriais, essa abordagem revela múltiplas trajetórias que exigem estratégias personalizadas. Para estados com alto percentual de beneficiários da tarifa social, como Piauí e Rondônia, é essencial integrar justiça energética às políticas sociais, com ações como eletrificação rural, modernização das redes e modelos tarifários progressivos. Onde há baixo consumo per capita, mesmo com forte presença renovável, devem-se fomentar políticas que associem geração ao acesso, por meio do incentivo à microgeração distribuída, com suporte técnico e financeiro.

Na Segurança Energética, estados como São Paulo e Minas Gerais, apesar da infraestrutura avançada, enfrentam problemas de qualidade do fornecimento, exigindo investimentos em redes inteligentes e maior integração entre geração centralizada e distribuída. Já estados com alta geração per capita, como Rondônia, devem equilibrar oferta e demanda local, promovendo a inclusão energética. A qualidade do fornecimento (ex. IASC) deve orientar a alocação de recursos federais,

e a estabilidade da rede deve ser tratada como vetor de desenvolvimento. Na Gestão Ambiental, estados com alta participação renovável, mas também com crescimento do desmatamento (como Rondônia e São Paulo), necessitam de políticas de compensação ecológica, zoneamento ambiental rigoroso e integração entre planejamento energético e uso do solo. O licenciamento ambiental deve ser qualificado e participativo, prevenindo vulnerabilidades e conflitos. Além disso, dados sobre emissões de GEE e eventos climáticos extremos reforçam a urgência de políticas climáticas estaduais alinhadas aos compromissos internacionais.

Transversalmente, a capacidade fiscal e institucional dos estados é variável estruturante. Estados com maior solidez fiscal estão mais aptos a implementar políticas sustentáveis, o que demanda critérios federais de financiamento que considerem tanto a capacidade técnica quanto as necessidades estruturais. A abordagem vetorial se consolida, assim, como ferramenta analítica e política para diagnosticar desigualdades e apoiar a formulação de políticas energéticas mais responsivas, justas e territorialmente sensíveis. A transição energética, portanto, deve ser vista não apenas como mudança tecnológica, mas como um processo sistêmico que exige sensibilidade social, solidez institucional e compromisso ambiental em todos os níveis de governo.

CONCLUSÃO

A transição energética no Brasil, marcada por desigualdades regionais e vulnerabilidades estruturais, exige ferramentas analíticas capazes de captar a complexidade dos contextos subnacionais. Os resultados deste estudo mostram que abordagens baseadas em médias agregadas ou representações simplificadas tendem a ocultar importantes assimetrias entre os estados, dificultando diagnósticos precisos e o desenho de políticas públicas eficazes. O modelo vetorial e tridimensional proposto — ancorado nas dimensões de Equidade Energética, Segurança Energética e Gestão Ambiental — busca superar essas limitações, ao oferecer uma leitura integrada, sensível e estratégica da transição energética. Ao incorporar a análise de interações entre dimensões e mensurar direção e intensidade dos esforços, a proposta amplia a capacidade analítica frente aos modelos tradicionais. Casos como Piauí, São Paulo, Rondônia e Minas Gerais demonstram que médias semelhantes podem esconder trajetórias energéticas profundamente distintas — diferença que o modelo vetorial é capaz de revelar com clareza.

Essa abordagem ganha especial relevância para o Sul Global, onde os processos de transição enfrentam obstáculos adicionais: dependência de fósseis, desigualdade socioeconômica, fragilidade institucional e déficits de infraestrutura. Ao considerar especificidades locais e adaptar-se às realidades territoriais, o sistema proposto oferece uma alternativa viável aos modelos globais, muitas vezes construídos a partir de premissas do Norte Global que não dialogam com a realidade dos países em desenvolvimento. No entanto, o modelo apresenta limitações. A ausência de dados desagregados restringe a inclusão de variáveis como impactos ecológicos locais, biodiversidade afetada, ou capacidade de sequestro de carbono. Em Equidade Energética, faltam indicadores sobre a distribuição territorial das renováveis e participação social nas decisões. Em Segurança, faltam dados sobre a resiliência das redes frente a eventos extremos — um desafio crescente no contexto das crises climáticas.

Dessa forma, o modelo não deve ser visto como um instrumento definitivo, mas como uma base flexível e evolutiva, que pode ser aprimorada com a incorporação de novos dados e contextos. Mais do que uma proposta técnica, trata-se de uma proposta política e epistêmica: reconhecer a transição energética como um processo multidimensional, desigual e territorializado, que exige instrumentos de monitoramento capazes de orientar políticas públicas fundadas na justiça social, na sustentabilidade ambiental e na soberania energética.

REFERÊNCIAS

- ACHEAMPONG, Alex O.; OPOKU, Eric Evans Osei. Energy justice, democracy and deforestation. **Journal of Environmental Management**, v. 341, p. 118012, 2023.
- BABAYOMI, Oluleke O.; DAHORU, Davo A.; ZHANG, Zhenbin. Affordable clean energy transition in developing countries: Pathways and technologies. **Iscience**, v. 25, n. 5, 2022.
- BACKHOUSE, Maria; LEHMANN, Rosa. New ‘renewable’ frontiers: contested palm oil plantations and wind energy projects in Brazil and Mexico. **Journal of Land Use Science**, v. 15, n. 2-3, p. 373-388, 2020.
- BAZILIAN, Morgan et al. Interactions between energy security and climate change: A focus on developing countries. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3750-3756, 2011.
- BUTLER, Lucy; NEUHOFF, Karsten. 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, Maria Mercedes Vanegas. 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, Iñigo; DE CASTRO, Carlos; GONZÁLEZ, Luis Javier Miguel. 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.
- EBERHARD, Anton; NAUDE, Raine. 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.
- ELKHATAT, Ahmed; AL-MUHTASEB, Shaheen. Climate change and energy security: a comparative analysis of the role of energy policies in advancing environmental sustainability. **Energies**, v. 17, n. 13, p. 3179, 2024.
- ENEVOLDSEN, Peter. A socio-technical framework for examining the consequences of deforestation: A case study of wind project development in Northern Europe. **Energy Policy**, v. 115, p. 138-147, 2018.
- FEARNSIDE, Philip M. Challenges for sustainable development in Brazilian Amazonia. **Sustainable Development**, v. 26, n. 2, p. 141-149, 2018.
- 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, Alexandros; GADDA, Tatiana. Environmental support, energy security and economic growth in Japan. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 4038-4048, 2009.
- HADDAD, Christian et al. 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.
- HEFFRON, Raphael J.; MCCAULEY, Darren; DE RUBENS, Gerardo Zarazua. Balancing the energy trilemma through the Energy Justice Metric. **Applied energy**, v. 229, p. 1191-1201, 2018.
- HEFFRON, Raphael J.; MCCAULEY, Darren; SOVACOO, Benjamin K. Resolving society's energy trilemma through the Energy Justice Metric. **Energy Policy**, v. 87, p. 168-176, 2015.
- HOWELLS, Mark et al. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 7, p. 621-626, 2013.
- LEE, Hoesung et al. **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**. 2023.
- ISLAM, Muhammad Muzammal et al. Improving reliability and stability of the power systems: A comprehensive review on the role of energy storage systems to enhance flexibility. **IEEE Access**, 2024.
- JING, Rui et al. Balancing the Energy Trilemma in energy system planning of coastal cities. **Applied energy**, v. 283, p. 116222, 2021.
- KABEYI, Moses Jeremiah Barasa; OLANREWaju, Oludolapo Akanni. Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. **Frontiers in Energy research**, v. 9, p. 743114, 2022.
- UNEL, Burcin et al. Energy transition, distributed energy resources, and the need for information. In: **IAEE energy forum**. 2020.
- LE, Thai-Ha; NGUYEN, Canh Phuc. 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 Resources Institute**, 2020.
- LEE, Soo Min et al. Forests, fuelwood and livelihoods—energy transition patterns in eastern Indonesia. **Energy Policy**, v. 85, p. 61-70, 2015.

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

LI, Kang et al. Energy poor or fuel poor: What are the differences?. **Energy Policy**, v. 68, p. 476-481, 2014.

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

LIN, Yuancheng et al. Advancing AI-Enabled Techniques in Energy System Modeling: A Review of Data-Driven, Mechanism-Driven, and Hybrid Modeling Approaches. **Energies**, v. 18, n. 4, p. 845, 2025.

MARTÍ SELVA, María Luisa; PUERTAS MEDINA, Rosa María. Sustainable energy development analysis: Energy Trilemma. 2022.

MÜLLER, Melanie; SCHULZE, Meike; SCHÖNEICH, Svenja. The energy transition and green mineral value chains: Challenges and opportunities for Africa and Latin America. **South African Journal of International Affairs**, v. 30, n. 2, p. 169-175, 2023.

NAWAZ, Shahzada M. Naeem; ALVI, Shahzad. Energy security for socio-economic and environmental sustainability in Pakistan. **Heliyon**, v. 4, n. 10, 2018.

NEWELL, Richard; RAIMI, Daniel; ALDANA, Gloria. Global energy outlook 2019: the next generation of energy. **Resources for the Future**, v. 1, n. 8, p. 1-37, 2019.

NGCAMU, Bethuel Sibongiseni. Climate change effects on vulnerable populations in the Global South: a systematic review. **Natural Hazards**, v. 118, n. 2, p. 977-991, 2023.

OFOZOR, Christopher Amechi et al. Does deforestation endanger energy security? A panel GMM evidence from 47 sub-Saharan African countries. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-23, 2024.

PANTELLI, Mathaios et al. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 32, n. 6, p. 4732-4742, 2017.

PAROVIĆ, Miroslav M.; KLJAJIĆ, Miroslav 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. et al. A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment. **Ecological Indicators**, v. 136, p. 108690, 2022.

Peng, Cheng et al. A framework for evaluating energy security in China: Empirical analysis of forecasting and assessment based on energy consumption. **Energy**, v. 234, p. 121314, 2021.

PEREIRA, Marcio Giannini; FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos; DA SILVA, Neilton Fidelis. Rural electrification and energy poverty: Empirical evidences from Brazil. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 14, n. 4, p. 1229-1240, 2010.

PEREIRA, Marcio Giannini; FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos; DA SILVA, Neilton Fidelis. The challenge of energy poverty: Brazilian case study. **Energy Policy**, v. 39, n. 1, p. 167-175, 2011.

PRADO JR, Fernando Almeida et al. 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.

PRADO, Edemar O. et al. Design and management of photovoltaic energy in uninterruptible power supplies. **Energy Conversion and Management**, v. 301, p. 118038, 2024.

RASHEED, S.; MAHMOUD, M.; ELLABBAN, O. Computational Modeling and Visualization for Complex Energy Systems: A Python-Based Framework. **Energy Reports**, 8, 10455–10468, 2022.

SETYOWATI, Abidah B. Mitigating energy poverty: Mobilizing climate finance to manage the energy trilemma in Indonesia. **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1603, 2020.

SHIRAZI, Masoud. Assessing energy trilemma-related policies: the world's large energy user evidence. **Energy Policy**, v. 167, p. 113082, 2022.

SINGH, Harsh Vijay et al. The energy transitions index: An analytic framework for understanding the evolving global energy system. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, p. 100382, 2019.

SWARNAKAR, Pradip; SINGH, Mudit Kumar. Local governance in just energy transition: towards a community-centric framework. **Sustainability**, v. 14, n. 11, p. 6495, 2022.

TOL, Richard SJ. Navigating the energy trilemma during geopolitical and environmental crises. **arXiv preprint arXiv:2301.07671**, 2023.

WEISS, Martin; CLOOS, Kira Christina; HELMERS, Eckard. Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles. **Environmental Sciences Europe**, v. 32, n. 1, p. 46, 2020.