

Uma abordagem multicritério através do método WASPAS para mensuração do grau de preparo para a transição energética justa

Alessandra Carvalho de Moura

UFF – Universidade Federal Fluminense;

alessandra.cdml@gmail.com

Prof. Dr. Marcos Santos

IME – Instituto Militar de Engenharia;

marcosdossantos_doutorado_uff@yahoo.com.br

Resumo

A transição energética justa exige instrumentos capazes de capturar desigualdades territoriais que condicionam a implementação de projetos de energia renovável em áreas urbanas. Este artigo propõe um índice multicritério para mensurar o grau de preparo territorial dos estados brasileiros, incorporando dimensões socioeconômicas, energéticas, urbanas e fundiárias. A metodologia combina revisão sistemática e crítica da literatura com a aplicação do método WASPAS, utilizando exclusivamente dados oficiais provenientes de IBGE, IPEA, EPE e CNJ. Os resultados evidenciam assimetrias estruturais relevantes entre os territórios, associadas a diferentes níveis de desenvolvimento humano, pressões urbanas e insegurança fundiária. A proposta contribui para o planejamento público ao oferecer uma ferramenta diagnóstica replicável, capaz de apoiar políticas territoriais orientadas à capacitação institucional e à redução de desigualdades no contexto da transição energética justa.

Palavras-Chaves: *Transição energética justa, Métodos multicritério, conflitos fundiários, Energia, WASPAS.*

Abstract

A just energy transition requires instruments capable of capturing territorial inequalities that condition the implementation of renewable energy projects in urban areas. This article proposes a multi-criteria index to measure the degree of territorial preparedness of Brazilian states, incorporating socioeconomic, energy, urban, and land dimensions. The methodology combines a systematic and critical review of the literature with the application of the WASPAS method, using only official data from IBGE, IPEA, EPE, and CNJ. The results highlight relevant

structural asymmetries between territories, associated with different levels of human development, urban pressures, and land insecurity. The proposal contributes to public planning by offering a replicable diagnostic tool capable of supporting territorial policies aimed at institutional capacity building and the reduction of inequalities in the context of a just energy transition.

Keywords: *Just energy transition, Multi-criteria methods, Land conflicts, Energy, WASPAS.*

1. Introdução

A transição dos sistemas energéticos para matrizes mais limpas e renováveis tem se consolidado como um dos principais desafios contemporâneos das políticas públicas, especialmente em contextos urbanos marcados por profundas desigualdades socioespaciais. Embora avanços tecnológicos tenham ampliado a viabilidade das energias renováveis, a literatura recente destaca que a capacidade de implementação dessas soluções é fortemente condicionada por fatores institucionais, sociais e territoriais, o que torna insuficientes abordagens centradas apenas na eficiência energética ou na disponibilidade de recursos naturais (CARLEY; KONISKY, 2020; YANG et al., 2024). Estudos reforçam que políticas energéticas desenhadas sem considerar vulnerabilidades socioeconômicas, governança local e dinâmicas territoriais tendem a reforçar desigualdades já existentes (SIKSNELYTE-BUTKIENE et al., 2022; KAMALI; STREIMIKIENE, 2024).

De modo a produzir análises que contemplem todos estes aspectos vem se observando amplamente na literatura o uso de métodos de decisão multicritério (MCDA) na avaliação de diversos aspectos dessa transição como desempenho energético e sustentabilidade, principalmente em estudos comparativos entre países e regiões (BRODNY; TUTAK, 2021). Apesar de sua robustez metodológica, grande parte dessas aplicações permanece orientada a lógicas competitivas, com foco no ranqueamento de territórios mais eficientes, o que limita sua utilidade para políticas públicas voltadas à redução de desigualdades.

A revisão crítica de literatura evidencia, ainda, lacunas relevantes na incorporação de dimensões fundiárias e socioespaciais nos modelos multicritério aplicados à transição energética. Mesmo quando a justiça energética é mencionada, ela costuma ser tratada de forma conceitual, sem operacionalização por meio de indicadores mensuráveis e rastreáveis em bases públicas oficiais (OTTENBURGER et al., 2022; PAPAPOSTOLOU et al., 2023).

Diante desse cenário, este artigo propõe um modelo multicritério para mensurar o grau de preparo territorial para a implementação de projetos de energia renovável justa em áreas urbanas brasileiras. A proposta combina revisão sistemática e crítica da literatura com a aplicação do método WASPAS, integrando indicadores de desenvolvimento humano, consumo energético, pressão urbana e conflitos fundiários. O objetivo é oferecer um instrumento analítico capaz de apoiar políticas públicas territoriais, orientando estratégias de capacitação e mitigação de vulnerabilidades no processo de Transição Energética Justa.

1.1. Objetivo

O objetivo central deste trabalho é propor um método de mensuração do grau de preparo territorial para a implementação de projetos de energia renovável justa em áreas urbanas, por meio de um índice multicritério baseado no método WASPAS, incorporando dimensões de vulnerabilidade socioespacial, segurança fundiária e consumo energético, com vistas a orientar políticas públicas voltadas para territórios desfavorecidos.

1.2. Estruturação do Problema da Pesquisa

De modo a robustecer a etapa introdutória e trazer maior detalhamento ao objeto da pesquisa, este estudo aplicou a Análise CATWOE é uma ferramenta da metodologia de sistemas suaves (Soft Systems Methodology – SSM), que busca estruturar problemas complexos e mal definidos por meio da identificação de seis elementos-chave: Clientes, Atores, Transformação, Weltanschauung (visão de mundo), Proprietário e Ambiente (Restrições Ambientais/Estruturais) (CHECKLAND, 1981). Essa abordagem favorece uma compreensão sistêmica e múltiplas perspectivas para apoiar a tomada de decisão em contextos socioambientais e organizacionais complexos. Ela tem sido empregada para integrar aspectos técnicos, sociais e éticos em projetos de mudança organizacional e pode auxiliar na formulação de políticas públicas, especialmente em áreas como planejamento urbano, governança fundiária e transição energética justa.

- Clientes (C) : Populações urbanas vulneráveis e gestores municipais que necessitam de diagnósticos para subsidiar políticas energéticas justas.
- Atores (A): Prefeituras, concessionárias de energia, órgãos fundiários e CNJ atuando de forma integrada.
- Transformação (T): Conversão de dados territoriais heterogêneos em uma mensuração objetiva do grau de preparo dos territórios urbanos.

- Visão de Mundo (W): A transição energética como imperativo de equidade social e resposta às mudanças climáticas.
- Proprietário (O): Estados responsáveis pela formulação e coordenação de políticas urbanas e energéticas, com autoridade para definir diretrizes, alocar recursos e interromper ou redirecionar a implementação de projetos de energia renovável nos territórios analisados.
- Ambiente (E): Decisão pública sob restrições legais, uso de dados oficiais e presença de desigualdades socioespaciais estruturais.

2. Referencial Teórico

A transição energética em curso ultrapassa a mera substituição de fontes de energia de origem fóssil por fontes renováveis, mas compreende transformações institucionais, territoriais e sociais muito mais complexas. Yang et al. (2024) destacam que a transição energética deve ser observada como um processo sistêmico, que envolve políticas públicas, governança e desenvolvimento regional. Nesse sentido, apresenta-se o conceito de Transição Energética Justa como resposta às críticas aos modelos que se restringe às tecnologias de descarbonização, trazendo preocupações com equidade distributiva, acesso à energia e redução de desigualdades sociais (CARLEY; KONISKY, 2020).

A sustentabilidade energética depende da integração entre dimensões ambientais, econômicas e sociais. argumentam que avaliações centradas exclusivamente em indicadores energéticos são insuficientes para captar desigualdades territoriais (SIKSNELYTE-BUTKIENE et al, 2022). De forma semelhante, Kamali e Streimikiene (2024) defendem que a efetivação da justiça energética se daria por meio de métricas que incluam governança, inclusão social e capacidade institucional. No Brasil, tais dimensões assumem particular relevância diante da heterogeneidade regional e da persistência de vulnerabilidades socioambientais, especialmente nas áreas metropolitanas (ALVES, 2021).

Por outro lado, a dimensão territorial é frequentemente pouco explorada nos modelos internacionais de avaliação energética. Estudos aplicados à União Europeia demonstram a eficácia de indicadores multicritério para mensurar desempenho sustentável (BRODNY; TUTAK, 2021), mas tendem a priorizar métricas agregadas de eficiência e emissões. A segurança fundiária e os conflitos territoriais, embora ocupem um espaço importante na discussão sobretudo no que tange a implementação de infraestrutura energética, raramente são incorporados de forma explícita. Conforme evidenciam os dados do Conselho Nacional de

Justiça (CNJ, 2024), no contexto brasileiro, a governança fundiária representa fator determinante para a viabilidade de políticas urbanas e energéticas, e o debate recente sobre regularização fundiária (DADOS, 2024). A incorporação dessa variável amplia a compreensão do preparo territorial para além da capacidade técnica ou econômica.

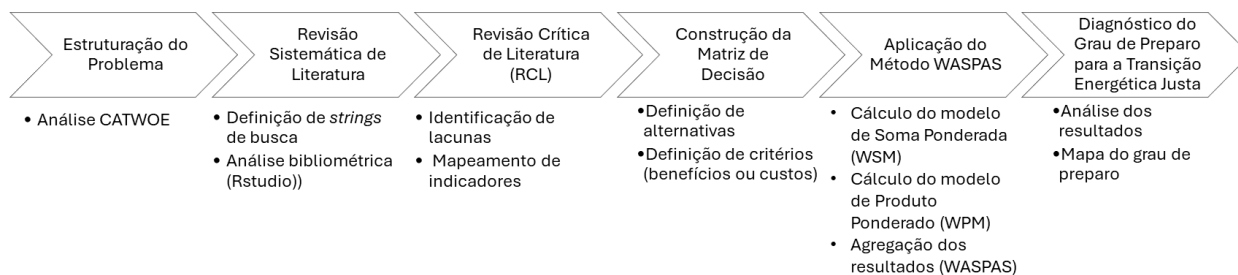
A partir da compreensão dos diversos aspectos envolvidos na temática, ganha relevância a adoção de Métodos de Decisão Multicritério (MCDA) na avaliação da transição energética. Revisões metodológicas indicam que tais métodos são particularmente adequados para lidar com problemas multidimensionais e interdependentes (SNYDER, 2019; BOOTH; SUTTON; PAPAIOANNOU, 2021). Ao longo deste trabalho, foram identificados estudos recentes que incluem avaliações do potencial de transição energética em estados indianos (INDRAJAYANTHAN;, 2022), análises comparativas entre países europeus (TUTAK; BRODNY; GREBSKI, 2025) e estudos de governança energética (CABEÇA et al., 2021). Embora robustos, muitos desses modelos permanecem orientados a lógicas comparativas baseadas em desempenho relativo.

Tais modelos reforçam a necessidade de capturar gradientes de desempenho e complexidades institucionais. Entre os métodos multicritério, o WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment), proposto por Zavadskas et al. (2012), destaca-se por combinar os modelos de soma ponderada e produto ponderado, ampliando a robustez analítica. O método multicritério para tomada de decisão WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment). Esta abordagem multicritério híbrida combina os modelos de soma ponderada (Weighted Sum Model – WSM) e produto ponderado (Weighted Product Model – WPM) para avaliar alternativas considerando múltiplos critérios simultaneamente. Essa combinação confere ao WASPAS maior robustez e equilíbrio ao lidar com diferentes escalas de medida e relações de custo e benefício entre indicadores, tornando-o amplamente aplicável a problemas complexos de avaliação de alternativas em contextos energéticos e ambientais.

3. Metodologia

O percurso metodológico adotado neste artigo baseia-se em duas partes principais, das quais cada uma já trará resultados importantes não só para compreender o problema, mas também para replicar o modelo proposto em outros casos práticos.

Figura 1 – Percurso metodológico adotado



Fonte: Os autores (2025)

3.1. Revisão de literatura

Esta etapa foi dividida em dois passos para contextualizar o tema, oferecer uma base bibliográfica suficiente para a pesquisa e apontar lacunas para investigações futuras. Na primeira parte desta etapa, realizaremos uma revisão sistemática de literatura, a partir da base Scopus, e visando a definição do problema e dos critérios para aplicação do método, a ferramenta Bibliometrix (pacote do software RStudio). Nesta etapa, importa saber como o tema está sendo tratado por outros autores, bem como seus indicadores para auxílio na definição do problema. Esta etapa permitirá a contextualização do tema, bem como fornecerá uma importante base de artigos ao redor da questão da pesquisa, indicando até mesmo lacunas para estudos futuros.

A Revisão Crítica de Literatura (RCL) foi escolhida como etapa complementar neste estudo para olhar de forma sistemática e interpretativa o que já foi obtido através de literaturas anteriores sobre a transição energética justa, o planejamento energético nas cidades, bem como o uso de métodos multicritério para avaliação de territórios. Ao contrário das revisões comuns, a RCL não busca apenas consolidar estudos já existentes, mas também mostrar onde estão as convergências, as lacunas teóricas, as limitações metodológicas e as chances de avanço científico, especialmente em temas novos e interdisciplinares (PAUL; CRIADO, 2020).

3.2. Proposta de solução: Aplicação do método de tomada de decisão multicritério

As etapas de aplicação do método apresentadas a seguir são baseadas no trabalho original da proposição do método (ZAVADSKAS et al., 2012), com a respectiva adaptação ao cenário presente, que não tem como objetivo meramente priorizar alternativas, mas traçar um ranqueamento entre as alternativas e avaliar o nível de preparo dos territórios.

1. Construir a matriz de decisão $X = [x_{ij}]$, com m alternativas e n critérios (dados quantitativos).
2. Classificar cada critério como benefício (maximizar) ou custo (minimizar) e normalizar a matriz:
3. Definir os pesos w_j dos critérios (importância relativa).
4. Calcular o WSM (soma ponderada) para cada alternativa i :
5. Calcular o WPM (produto ponderado) para cada alternativa i :
6. Agregar WSM e WPM no WASPAS com $\lambda \in [0,1]$:
7. Interpretar o resultado IRT_i : maior IRT_i indica melhor desempenho global (no seu caso, use como índice de preparo/diagnóstico, não necessariamente “prioridade”).

4. Resultados e Discussão

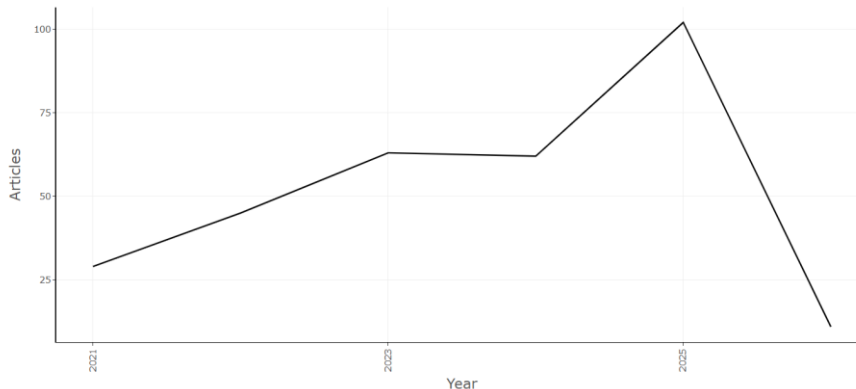
4.1. Bibliometria

Nesta etapa, foram definidos como foco o processo de regularização para realizar a busca na base Scopus, com acesso via Portal de Periódicos. Os dados da pesquisa foram:

- Strings de busca: TITLE-ABS-KEY (just energy transition) AND TITLE-ABS-KEY (multicriteria)
- Estudos obtidos: 368 artigos
- Estudos com prazo igual ou superior a 05 anos: 312 artigos
- Estudos dentro do tema: 15 artigos

Após esta etapa, com auxílio do software “RStudio”, através do pacote “Bibliometrix” e do comando “Biblioshiny”, ainda sobre a amostra completa (321 artigos), foram elaboradas algumas análises interessantes que descrevem o conjunto obtido.

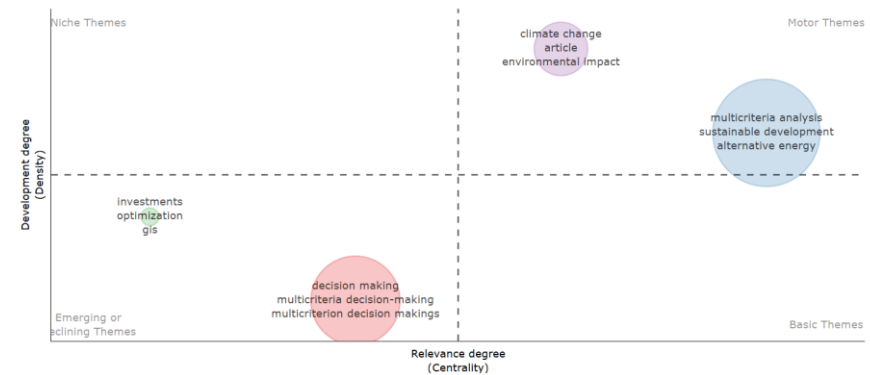
Figura 2 – Percurso metodológico adotado



Fonte: Os autores (2025) - elaborado com auxílio da ferramenta *Bibliometrix*

Em uma primeira análise observa-se uma acentuação dos estudos nos últimos 05 anos, denotando a atualidade do tema, no qual, notadamente a partir de 2021 ganha maior relevância. Também se observou que, mesmo excluindo artigos maiores que 5 anos de sua publicação, a amostra total (368) teve apenas 56 artigos removidos, ratificando ser uma temática emergente.

Figura 3 – Mapa temático



Fonte: Os autores (2025) - elaborado com auxílio da ferramenta *Bibliometrix*

De modo a corroborar os aspectos mencionados acima, o mapa temático traz como temas emergentes os métodos multicritérios adotados para seleção de investimentos e alternativas visando a transição energética. Por outro lado, os temas que impulsionaram os resultados giram em torno das mudanças climáticas e impacto ambiental, bem como o foco em desenvolvimento sustentável. O mesmo pôde ser constatado ao observado no comportamento das palavras-chaves dos artigos obtidos ao longo dos últimos anos, com destaque para as metodologias de tomada de decisão e transição energética.

4.2. Resultados da revisão crítica de literatura (RCL)

Entre outros aspectos, como resultados obtidos e metodologia, a RCL buscou mapear as variáveis de estudo adotadas, bem como lacunas e oportunidades. Foram selecionados 15 artigos na revisão, abrangendo aplicações de métodos multicritério e abordagens híbridas na avaliação da transição energética e sustentabilidade. As principais variáveis concentram-se em consumo de energia, participação de renováveis, emissões de CO₂, eficiência energética, investimentos, governança, capacidade institucional e indicadores socioeconômicos. Observa-se ainda uma predominância de análises voltadas ao desempenho energético e ambiental, com crescente inclusão de dimensões financeiras e regulatórias.

Aspectos sociais como justiça energética aparecem, porém ainda com baixa integração territorial e fundiária, indicando lacuna relevante para estudos aplicados a políticas públicas.

A revisão da literatura mostra que, mesmo os métodos multicritério sendo amplamente utilizados na área de energia e sustentabilidade, ainda falta muito para que essas ferramentas sejam usadas como diagnósticos voltados para a justiça territorial. Ao adotarmos o método WASPAS, como forma de medir como as Estados estão preparadas, consolidando aspectos energéticos, sociais e de terras com dados públicos que podem ser seguidos, este estudo ajuda a dar um passo adiante na prática da transição energética justa nos Estados do Brasil.

4.3. Definição de critérios para aplicação do método

A partir dos insights obtidos nas revisões de literatura, chegamos então aos seguintes critérios:

(1) IDHM (2020)

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil. (Pnud Brasil, Ipea e FJP, 2022.)

Mede desenvolvimento humano, diretamente relacionado à equidade energética.

Benefício: quanto maior, melhor.

(2) Consumo de Energia Per Capita

Fonte: EPE – Balanço Energético Nacional

Indicador energético clássico (kWh/hab/ano) comparável entre municípios.

Custo: quanto maior, pior.

(3) População Residente

Fonte: Censo 2022 (IBGE)

Expressa pressões urbanas, demanda energética para compensar eventuais déficits de consumo.

Custo: quanto maior, pior.

(4) Conflitos Fundiários

Fonte: Justiça em Números (CNJ)

Expressa insegurança fundiária e vulnerabilidade jurídica, essencial para políticas territoriais. Custo: quanto maior, pior.

Neste caso, serão utilizadas como alternativas os estados brasileiros. O método poderá ser replicado para municipalidades e quaisquer outros territórios que disponham dos dados acima.

4.4. Proposta de solução: APLICAÇÃO DO MÉTODO WASPAS

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir da aplicação do método WASPAS, um método multicritério que combina as abordagens de Soma Ponderada (WSM) e Produto Ponderado (WPM), ampliando a robustez da avaliação (ZAVADSKAS et al., 2012). Inicialmente, foram definidos as alternativas e os critérios de decisão, classificados como critérios de benefício ou de custo, e organizados em uma matriz de decisão composta por dados quantitativos. Em seguida, os valores da matriz foram normalizados para garantir comparabilidade entre critérios de diferentes naturezas, adotando procedimentos específicos conforme o tipo de critério. Os pesos atribuídos refletiram a importância relativa de cada critério, respeitando a condição de soma unitária. A partir disso, foram calculados os escores individuais por meio do modelo de soma ponderada e do modelo de produto ponderado, cujos resultados foram posteriormente agregados por meio de um coeficiente de combinação λ , adotado como 0,5, conforme recomendação da literatura (ZAVADSKAS et al., 2012; AYDIN; KAÇTIOĞLU, 2024).

O índice final do WASPAS foi interpretado neste estudo não como instrumento de ranqueamento competitivo, mas como medida diagnóstica do grau de preparo dos territórios urbanos, permitindo avaliar de forma integrada dimensões sociais, energéticas, urbanas e fundiárias no contexto da transição energética justa.

1. **Construir a matriz de decisão** $X = [x_{ij}]$, com m alternativas e n critérios (dados quantitativos).
2. **Classificar cada critério** como **benefício** (maximizar) ou **custo** (minimizar) e **normalizar** a matriz:

- Benefício: $\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i(x_{ij})}$ de

- Custo: $\tilde{x}_{ij} = \frac{\min_i(x_{ij})}{x_{ij}}$

3. **Definir os pesos** w_j dos critérios (importância relativa).

Tabela 1 – Matriz de decisão definida (ponderações e classificações dos critérios)

PESOS	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%	L
TIPO	MAX	MIN	MIN	MIN	0,5
ESTADO	IDHM	Consumo (GWh)	População Residente	Conflitos Funditários	
ACRE	0,710	114.749,34	830.018,00	194	
ALAGOAS	0,684	406.074,78	3.127.683,00	358	
AMAPÁ	0,688	706.986,80	733.759,00	1.001	
AMAZONAS	0,700	126.069,74	3.941.613,00	387	
BAHIA	0,691	2.281.065,84	14.141.626,00	2.623	
CEARÁ	0,734	1.197.401,43	8.794.957,00	1.081	
DISTRITO FEDERAL	0,814	556.036,00	2.817.381,00	1.554	
ESPÍRITO SANTO	0,771	1.036.526,05	3.833.712,00	1.132	
GOIÁS	0,737	1.752.735,44	7.056.495,00	1.284	
MARANHÃO	0,676	1.401.946,00	6.776.699,00	1.473	
MATO GROSSO	0,736	5.636.444,88	3.658.649,00	30.895	
MATO GROSSO DO SUL	0,742	554.008,63	2.757.013,00	915	
MINAS GERAIS	0,774	1.036.444,97	20.539.989,00	8.219	
PARÁ	0,690	2.192.770,60	8.120.131,00	1.719	
PARAÍBA	0,698	526.560,37	3.974.687,00	568	
PARANÁ	0,769	1.232.166,12	11.444.380,00	1.790	
PERNAMBUCO	0,719	446.936,00	9.058.931,00	1.228	
PIAUÍ	0,690	3.170.586,16	3.271.199,00	3.314	
RIO DE JANEIRO	0,762	2.897.033,67	16.055.174,00	3.827	
RIO GRANDE DO NORTE	0,728	500.932,00	3.302.729,00	694	
RIO GRANDE DO SUL	0,771	370.961,46	10.882.965,00	827	
RONDÔNIA	0,700	123.117,10	1.581.196,00	329	
RORAIMA	0,699	2.606.975,12	636.707,00	16.039	
SANTA CATARINA	0,792	2.407.749,21	7.610.361,00	3.522	

SÃO PAULO	0,806	341.544,30	44.411.238,00	607
SERGIPE	0,702	12.120.177,97	2.210.004,00	19.041
TOCANTINS	0,731	300.030,23	1.511.460,00	648

Fonte: Adaptado de Baldini (2025)

4. Calcular o WSM (soma ponderada) para cada alternativa i :

$$IR_i^{(WSM)} = \sum_{j=1}^n \tilde{x}_{ij} w_j$$

Tabela 2 – Matriz da Importância Relativa Aditiva Ponderada

	C1	C2	C3	C4	Output 1
Acre	0,2181	0,2500	0,1918	0,2500	0,9098
Alagoas	0,2101	0,0706	0,0509	0,1355	0,4671
Amapá	0,2113	0,0406	0,2169	0,0485	0,5173
Amazonas	0,2150	0,2276	0,0404	0,1253	0,6082
Bahia	0,2122	0,0126	0,0113	0,0185	0,2545
Ceará	0,2254	0,0240	0,0181	0,0449	0,3124
Distrito Federal	0,2500	0,0516	0,0565	0,0312	0,3893
Espírito Santo	0,2368	0,0277	0,0415	0,0428	0,3488
Goiás	0,2264	0,0164	0,0226	0,0378	0,3030
Maranhão	0,2076	0,0205	0,0235	0,0329	0,2845
Mato Grosso	0,2260	0,0051	0,0435	0,0016	0,2762
Mato Grosso do Sul	0,2279	0,0518	0,0577	0,0530	0,3904
Minas Gerais	0,2377	0,0277	0,0077	0,0059	0,2790
Pará	0,2119	0,0131	0,0196	0,0282	0,2728
Paraíba	0,2144	0,0545	0,0400	0,0854	0,3943
Paraná	0,2362	0,0233	0,0139	0,0271	0,3005
Pernambuco	0,2208	0,0642	0,0176	0,0395	0,3421
Piauí	0,2119	0,0090	0,0487	0,0146	0,2843
Rio de Janeiro	0,2340	0,0099	0,0099	0,0127	0,2665
Rio Grande do Norte	0,2236	0,0573	0,0482	0,0699	0,3989
Rio Grande do Sul	0,2368	0,0773	0,0146	0,0586	0,3874
Rondônia	0,2150	0,2330	0,1007	0,1474	0,6961
Roraima	0,2147	0,0110	0,2500	0,0030	0,4787
Santa Catarina	0,2432	0,0119	0,0209	0,0138	0,2898
São Paulo	0,2475	0,0840	0,0036	0,0799	0,4150
Sergipe	0,2156	0,0024	0,0720	0,0025	0,2925
Tocantins	0,2245	0,0956	0,1053	0,0748	0,5003

Fonte: Adaptado de Baldini (2025)

5. Calcular o WPM (produto ponderado) para cada alternativa i :

$$IR_i^{(WPM)} = \prod_{j=1}^n (\tilde{x}_{ij})^{w_j}$$



Tabela 03 – Matriz da Importância Relativa Multiplicativa Ponderada

	C1	C2	C3	C4	Output 2	Output (Q)	Rank
Acre	0,9664	1,0000	0,9359	1,0000	0,9044	0,9071	1
Alagoas	0,9574	0,7291	0,6717	0,8580	0,4023	0,4347	6
Amapá	0,9588	0,6347	0,9652	0,6635	0,3897	0,4535	5
Amazonas	0,9630	0,9768	0,6340	0,8414	0,5018	0,5550	3
Bahia	0,9599	0,4736	0,4606	0,5215	0,1092	0,1819	24
Ceará	0,9745	0,5564	0,5187	0,6509	0,1830	0,2477	16
Distrito Federal	1,0000	0,6740	0,6895	0,5944	0,2762	0,3328	10
Espírito Santo	0,9865	0,5768	0,6384	0,6434	0,2337	0,2913	14
Goiás	0,9755	0,5058	0,5481	0,6235	0,1686	0,2358	17
Maranhão	0,9546	0,5349	0,5536	0,6024	0,1703	0,2274	18
Mato Grosso	0,9751	0,3777	0,6459	0,2815	0,0670	0,1716	27
Mato Grosso do Sul	0,9771	0,6746	0,6932	0,6786	0,3101	0,3502	9
Minas Gerais	0,9875	0,5768	0,4196	0,3920	0,0937	0,1864	23
Pará	0,9595	0,4783	0,5292	0,5796	0,1408	0,2068	21
Paraíba	0,9623	0,6832	0,6326	0,7645	0,3180	0,3561	8
Paraná	0,9859	0,5524	0,4857	0,5738	0,1518	0,2261	19
Pernambuco	0,9695	0,7118	0,5149	0,6305	0,2240	0,2830	15
Piauí	0,9595	0,4362	0,6642	0,4919	0,1367	0,2105	20
Rio de Janeiro	0,9836	0,4461	0,4463	0,4745	0,0929	0,1797	26
Rio Grande do Norte	0,9725	0,6918	0,6626	0,7271	0,3242	0,3615	7
Rio Grande do Sul	0,9865	0,7458	0,4918	0,6959	0,2518	0,3196	11
Rondônia	0,9630	0,9826	0,7966	0,8763	0,6605	0,6783	2
Roraima	0,9626	0,4580	1,0000	0,3316	0,1462	0,3125	12
Santa Catarina	0,9932	0,4672	0,5378	0,4845	0,1209	0,2054	22
São Paulo	0,9975	0,7613	0,3460	0,7519	0,1976	0,3063	13
Sergipe	0,9637	0,3119	0,7326	0,3177	0,0700	0,1813	25
Tocantins	0,9735	0,7864	0,8056	0,7397	0,4562	0,4782	4

Fonte: Adaptado de Baldini (2025)

6. Agregar WSM e WPM no WASPAS com $\lambda \in [0,1]$:

$$IRT_i = \lambda \cdot IR_i^{(WSM)} + (1 - \lambda) \cdot IR_i^{(WPM)}$$

Tabela 04 – Matriz da Importância Relativa Multiplicativa Ponderada

	C1	C2	C3	C4	Output 1
Acre	0,2968	28687,3360	170085,2312	48,5000	198821,3640
Alagoas	0,2941	39346,3246	236973,8419	56,5278	276376,9883
Amapá	0,2945	45196,5717	164923,7068	73,0970	210193,6700
Amazonas	0,2958	29370,0973	251080,6374	57,6393	280508,6698
Bahia	0,2948	60574,1212	345556,8957	93,0017	406224,3134
Ceará	0,2993	51559,9646	306869,0983	74,5157	358503,8779
Distrito Federal	0,3071	42562,6240	230863,9502	81,5932	273508,4746
Espírito Santo	0,3030	49733,3510	249344,3881	75,3794	299153,4215
Goiás	0,2996	56712,8874	290430,3422	77,7916	347221,3208
Maranhão	0,2932	53633,4197	287507,5647	80,5085	341221,7862
Mato Grosso	0,2995	75945,8388	246447,7819	172,2913	322566,2115
Mato Grosso do Sul	0,3001	42523,7738	229617,2073	71,4738	272212,7549
Minas Gerais	0,3033	49732,3784	379354,0970	123,7360	429210,5146
Pará	0,2947	59979,2412	300805,3014	83,6778	360868,5151
Paraíba	0,2955	41986,9868	251605,6914	63,4422	293656,4159
Paraná	0,3028	51930,1986	327750,0711	84,5288	379765,1012
Pernambuco	0,2977	40300,8310	309146,2373	76,9291	349524,2953
Piauí	0,2947	65771,4713	239646,7084	98,6006	305517,0750
Rio de Janeiro	0,3021	64304,4537	356696,1988	102,2129	421103,1675
Rio Grande do Norte	0,2987	41466,4982	240222,1016	66,7008	281755,5993
Rio Grande do Sul	0,3030	38466,6943	323654,4147	69,6896	362191,1015
Rondônia	0,2958	29196,5985	199821,0119	55,3465	229073,2527
Roraima	0,2957	62630,6456	159176,7500	146,2465	221953,9378
Santa Catarina	0,3050	61398,1775	295968,8749	100,1126	357467,4700
São Paulo	0,3064	37680,3067	460010,7142	64,5043	497755,8315
Sergipe	0,2960	91966,5546	217266,6119	152,6560	309386,1184
Tocantins	0,2990	36479,0837	197580,4143	65,5670	234125,3639



Fonte: Adaptado de Baldini (2025)

Tabela 05 – Matriz da Importância Relativa Multiplicativa Ponderada

	C1	C2	C3	C4	Output 2	Output (Q)	Rank
Acre	1,0438	18,4051	28,7198	3,7321	2059,2219	100440,2930	27
Alagoas	1,0414	19,9178	31,2026	3,8778	2509,7620	139443,3751	20
Amapá	1,0418	20,6201	28,4994	4,1351	2531,6068	106362,6384	26
Amazonas	1,0429	18,5136	31,6569	3,8967	2381,7869	141445,2284	19
Bahia	1,0421	22,1864	34,2882	4,3918	3481,5019	204852,9077	4
Ceará	1,0460	21,3105	33,2854	4,1551	3082,8986	180793,3883	8
Distrito Federal	1,0528	20,3129	30,9995	4,2504	2817,7246	138163,0996	21
Espírito Santo	1,0492	21,1192	31,6020	4,1670	2918,0372	151035,7294	16
Goiás	1,0463	21,8241	32,8303	4,2000	3148,5142	175184,9175	11
Maranhão	1,0406	21,5216	32,7474	4,2362	3106,9068	172164,3465	12
Mato Grosso	1,0462	23,4769	31,5098	5,1237	3965,3159	163265,7637	13
Mato Grosso do Sul	1,0467	20,3083	30,9575	4,1120	2705,9565	137459,3557	22
Minas Gerais	1,0495	21,1191	35,0975	4,7167	3669,1561	216439,8354	2
Pará	1,0420	22,1317	33,1197	4,2773	3266,8344	182067,6748	7
Paraíba	1,0427	20,2439	31,6734	3,9913	2668,5124	148162,4642	17
Paraná	1,0491	21,3486	33,8377	4,2881	3249,6538	191507,3775	5
Pernambuco	1,0447	20,0375	33,3469	4,1883	2923,5642	176223,9297	10
Piauí	1,0420	22,6477	31,2902	4,4564	3290,5997	154403,8373	15
Rio de Janeiro	1,0485	22,5204	34,5613	4,4967	3669,5129	212386,3402	3
Rio Grande do Norte	1,0455	20,1808	31,3089	4,0415	2669,7368	142212,6680	18
Rio Grande do Sul	1,0492	19,8055	33,7315	4,0861	2864,1733	182527,6374	6
Rondônia	1,0429	18,4862	29,9003	3,8573	2223,6141	115648,4334	24
Roraima	1,0428	22,3724	28,2478	4,9180	3241,1022	112597,5200	25
Santa Catarina	1,0510	22,2615	32,9858	4,4734	3452,3732	180459,9216	9
São Paulo	1,0521	19,7035	36,8304	4,0079	3060,1204	250407,9760	1
Sergipe	1,0431	24,6276	30,5326	4,9710	3899,0167	156642,5676	14
Tocantins	1,0457	19,5446	29,8161	4,0243	2452,3809	118288,8724	23

Fonte: Adaptado de Baldini (2025)

Podemos interpretar o resultado como IRT_i : maior IRT_i indica um melhor desempenho global (neste caso, o índice de preparo/diagnóstico, não necessariamente “prioridade”).

Tabela 06 – Classificação geral

	IDHM	Consumo (GWh)	População Residente	Conflitos Fundiários	Output 2	Output (Q)	Rank
São Paulo	1,0521	19,7035	36,8304	4,0079	3060,1204	250407,9760	1
Minas Gerais	1,0495	21,1191	35,0975	4,7167	3669,1561	216439,8354	2
Rio de Janeiro	1,0485	22,5204	34,5613	4,4967	3669,5129	212386,3402	3
+Bahia	1,0421	22,1864	34,2882	4,3918	3481,5019	204852,9077	4
Paraná	1,0491	21,3486	33,8377	4,2881	3249,6538	191507,3775	5
Rio Grande do Sul	1,0492	19,8055	33,7315	4,0861	2864,1733	182527,6374	6
Pará	1,0420	22,1317	33,1197	4,2773	3266,8344	182067,6748	7
Ceará	1,0460	21,3105	33,2854	4,1551	3082,8986	180793,3883	8
Santa Catarina	1,0510	22,2615	32,9858	4,4734	3452,3732	180459,9216	9

Pernambuco	1,0447	20,0375	33,3469	4,1883	2923,5642	176223,9297	10
Goiás	1,0463	21,8241	32,8303	4,2000	3148,5142	175184,9175	11
Maranhão	1,0406	21,5216	32,7474	4,2362	3106,9068	172164,3465	12
Mato Grosso	1,0462	23,4769	31,5098	5,1237	3965,3159	163265,7637	13
Sergipe	1,0431	24,6276	30,5326	4,9710	3899,0167	156642,5676	14
Piauí	1,0420	22,6477	31,2902	4,4564	3290,5997	154403,8373	15
Espírito Santo	1,0492	21,1192	31,6020	4,1670	2918,0372	151035,7294	16
Paraíba	1,0427	20,2439	31,6734	3,9913	2668,5124	148162,4642	17
Rio Grande do Norte	1,0455	20,1808	31,3089	4,0415	2669,7368	142212,6680	18
Amazonas	1,0429	18,5136	31,6569	3,8967	2381,7869	141445,2284	19
Alagoas	1,0414	19,9178	31,2026	3,8778	2509,7620	139443,3751	20
Distrito Federal	1,0528	20,3129	30,9995	4,2504	2817,7246	138163,0996	21
Mato Grosso do Sul	1,0467	20,3083	30,9575	4,1120	2705,9565	137459,3557	22
Tocantins	1,0457	19,5446	29,8161	4,0243	2452,3809	118288,8724	23
Rondônia	1,0429	18,4862	29,9003	3,8573	2223,6141	115648,4334	24
Roraima	1,0428	22,3724	28,2478	4,9180	3241,1022	112597,5200	25
Amapá	1,0418	20,6201	28,4994	4,1351	2531,6068	106362,6384	26
Acre	1,0438	18,4051	28,7198	3,7321	2059,2219	100440,2930	27

Fonte: Adaptado de Baldini (2025)

A aplicação do método WASPAS, considerando todas as unidades federativas brasileiras, permitiu mensurar, de forma integrada, o grau de preparo territorial para a implementação de projetos de energia renovável justa, a partir de critérios socioeconômicos, energéticos, urbanos e fundiários. Os resultados indicam que estados com maiores níveis de desenvolvimento humano, maior capacidade institucional e menor incidência relativa de conflitos fundiários tendem a apresentar valores mais elevados do índice agregado, refletindo maior preparo estrutural para a transição energética. Esse padrão é consistente com a lógica do

método, uma vez que critérios de benefício, como o IDHM, contribuem positivamente para o índice, enquanto critérios de custo, como consumo energético elevado, densidade populacional e conflitos fundiários, exercem efeito redutor sobre o desempenho global.

4.5. Discussão do resultado

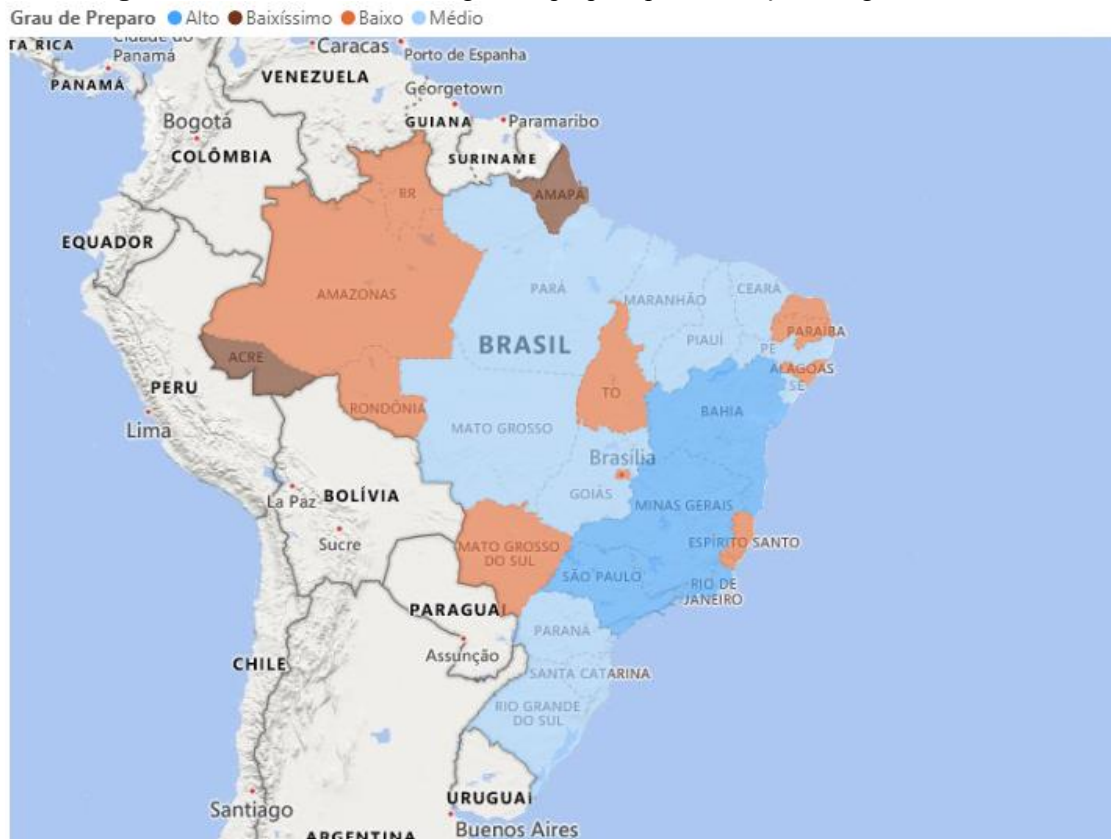
A revisão crítica de literatura evidenciou que os métodos multicritério vêm sendo amplamente empregados na avaliação da transição energética e da sustentabilidade, sobretudo para comparar países, regiões ou cidades a partir de indicadores energéticos, ambientais e socioeconômicos (BRODNY; TUTAK, 2021; TUTAK; BRODNY; GREBSKI, 2025). Entretanto, observa-se que esses estudos mantêm uma lógica de ranqueamento competitivo, cujo foco recai na identificação dos “melhores desempenhos”. Tal abordagem, embora metodologicamente consistente, mostra-se limitada quando aplicada ao contexto da transição energética justa, pois tende a reproduzir desigualdades territoriais pré-existent, favorecendo localidades com maior capacidade institucional e infraestrutura consolidada (CARLEY; KONISKY, 2020).

Outro aspecto recorrente identificado na literatura é a predominância de indicadores técnico-energéticos e ambientais, com menor atenção às dimensões fundiária e socioespacial. Mesmo estudos que incorporam justiça energética o fazem, em geral, de forma normativa ou conceitual, sem operacionalizá-la por meio de indicadores mensuráveis aplicáveis à tomada de decisão pública (SIKSNELYTE-BUTKIENE; STREIMIKIENE; BALEZENTIS, 2022; KAMALI; STREIMIKIENE, 2024). A ausência de variáveis associadas à segurança fundiária e à vulnerabilidade urbana limita a capacidade desses modelos de refletirem a complexidade territorial, especialmente em contextos do Sul Global, como o brasileiro, onde conflitos fundiários e desigualdade urbana são elementos estruturantes do planejamento energético (ALVES, 2021).

O WASPAS, ao combinar os modelos WSM e WPM, mostrou-se adequado para lidar com múltiplas dimensões e escalas, sendo utilizado aqui como ferramenta diagnóstica para orientar políticas de capacitação territorial. Dessa forma, os resultados reforçam que a transição energética justa não deve começar necessariamente pelos territórios mais preparados, mas sim ser orientada por diagnósticos que revelem onde estão as maiores fragilidades e oportunidades de intervenção estrutural, em consonância com as abordagens mais recentes da literatura internacional sobre energia, sustentabilidade e equidade territorial.

A partir destes resultados, foi possível traçar uma classificação, com vistas a avaliar o grau de preparo dos estados brasileiros, sendo aqueles com resultados dos outputs superiores, portanto com melhor desempenho no ranking, indicados como alto preparo, na sequência àqueles que tiveram valores médios e por fim, os menores, valores, sendo os últimos indicados no ranqueamento obtido.

Figura 4 – Estados brasileiros e grau de preparo para transição energética



Fonte: Os autores (2025) - elaborado com auxílio da ferramenta Microsoft *Power BI*

Por fim, ao articular os resultados da RCL com a aplicação empírica do WASPAS, este estudo contribui para avançar a literatura ao reposicionar os métodos multicritério no campo da transição energética justa. A incorporação de indicadores fundiários, o uso exclusivo de bases públicas oficiais (IBGE, CNJ, IPEA e EPE) e a interpretação do índice como ferramenta diagnóstica representam avanços frente às limitações identificadas nos estudos anteriores. Assim, o modelo proposto oferece um arcabouço metodológico replicável e alinhado às demandas do planejamento urbano e energético, reforçando o papel do MCDA como instrumento estratégico para a redução de desigualdades territoriais no processo de transição energética.

5. Considerações Finais

Como considerações finais, cabe destacar a apresentação de uma proposta de abordagem multicritério para mensurar o grau de preparo territorial dos estados brasileiros para a implementação de projetos de energia renovável justa, integrando dimensões socioeconômicas, energéticas, urbanas e fundiárias a partir de dados públicos oficiais. A combinação entre revisão crítica de literatura e aplicação empírica do método WASPAS permitiu traduzir conceitos amplamente discutidos na literatura, como justiça energética e desigualdade territorial, em um conjunto operacional de indicadores aplicáveis ao planejamento público.

Os resultados evidenciam que o preparo territorial para a transição energética não é homogêneo e está fortemente associado a fatores estruturais, como desenvolvimento humano, capacidade institucional e segurança fundiária, notadamente concentrado na região sudeste brasileira. Essa constatação reforça achados internacionais e amplia sua compreensão ao contexto brasileiro, contribuindo para preencher lacunas identificadas na literatura, especialmente no que se refere à incorporação da dimensão fundiária em modelos de avaliação energética.

Em síntese, como principal contribuição, o artigo oferece um arcabouço metodológico replicável, alinhado às necessidades da gestão pública, que pode subsidiar políticas urbanas e energéticas mais sensíveis às desigualdades territoriais. Ao enfatizar a mensuração do preparo territorial, a proposta amplia o uso dos métodos multicritério como instrumentos estratégicos para apoiar decisões públicas orientadas à equidade e à efetividade da transição energética justa.



REFERÊNCIAS

- ALVES, H. P. F. **Vulnerabilidade socioambiental nas três principais regiões metropolitanas da Macrometrópole Paulista: uma análise de indicadores socioambientais.** Ambiente & Sociedade, v. 24, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200030r2vu2021L1AO>.
- ATLAS BRASIL. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil.** Pnud Brasil, Ipea e FJP, 2022. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/ranking>.
- AYDIN, T.; KAÇTIĞOĞLU, S. **A case about the selection of appropriate renewable energy source for Turkey by using CRITIC and WASPAS methods.** Istanbul Commerce University Journal of Technologies and Applied Sciences, v. 6, n. 2, p. 53–80, 29 fev. 2024.
- ANJUM, M. Navigating complexity with spherical fuzzy decision making: examining urban planning with SWARA–WASPAS. Symmetry, v. 16, n. 6, p. 670, 2024.
- BALDINI, Fabio; COELHO, Leandro dos Santos; MARIANI, Viviana Cocco. **MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO - WASPAS em MICROSOFT EXCEL (VBA) v1.0**
- Base de Dados - **Portal CNJ.** Disponível em: <https://www.cnj.jus.br/pesquisas-judiciarias/justica-em-numeros/base-de-dados>.
- BHATNAGAR, S.; SHARMA, D.; SINGH, V. V. **Green Finance and Investment in India: Unveiling Enablers and Barriers for a Sustainable Future.** Journal of Cleaner Production, p. 144908, 30 jan. 2025.
- BOOTH, A.; SUTTON, A.; PAPAIOANNOU, D. **Systematic approaches to a successful literature review.** 2. ed. London: Sage, 2021.
- BRODNY, J.; TUTAK, M. **Assessing sustainable energy development in the central and eastern European countries and analyzing its diversity.** Science of The Total Environment, v. 801, p. 149745, 20 dez. 2021.
- CABEÇA, A. S. et al. A multicriteria classification approach for assessing the current governance capacities on energy efficiency in the European Union. Energy Policy, v. 148, p. 111946, jan. 2021.
- CARLEY, S.; KONISKY, D. M. **The justice and equity implications of the clean energy transition.** Nature Energy, v. 5, p. 569–577, 2020.
- CHECKLAND, P. **Systems thinking, systems practice.** 1981.
- CONSELHO NACIONAL DE JUSTIÇA (CNJ). **Justiça em números 2024.** Brasília: CNJ, 2024. Disponível em: <https://justica-em-numeros.cnj.jus.br/>.
- DADOS. da **Definição de um Marco Legal para Regularização Fundiária.**, v. 67, n. 3, 1 jan. 2024.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2024: ano-base 2023.** Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional>
- INDRAJAYANTHAN, V. et al. **Investigation on Current and Prospective Energy Transition Scenarios in Indian Landscape Using Integrated SWOT-MCDA Methodology.** Sustainability, v. 14, n. 9, p. 4940, 20 abr. 2022.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico 2022: população e domicílios.** Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao.html>.
- KAMALI Saraji, M.; STREIMIKIENE, D.; CIEGIS, R. **A novel Pythagorean fuzzy-SWARA-TOPSIS framework for evaluating the EU progress towards sustainable energy development.** Environmental Monitoring and Assessment, v. 194, n. 1, 22 dez. 2021.



KONWAR, A. et al. **A HyF-WASPAS method based on similarity measure to evaluate renewable energy technologies from sustainable perspective**. Research in Applied Mathematics and Decision Sciences, 2025.

MAHYAR, Kamali Saraji; STREIMIKIENE, D. **A novel multicriteria assessment framework for evaluating the performance of the EU in dealing with challenges of the low-carbon energy transition: an integrated Fermatean fuzzy approach**. Sustainable environment research, v. 34, n. 1, 5 abr. 2024.

NAEGLER, T. et al. **Integrated Multidimensional Sustainability Assessment of Energy System Transformation Pathways**. Sustainability, v. 13, n. 9, p. 5217, 7 maio 2021.

OTTENBURGER Sadeeb Simon et al. **A Novel MCDA-Based Methodology Dealing with Dynamics and Ambiguities Resulting from Citizen Participation in the Context of the Energy Transition**. Algorithms, v. 15, n. 2, p. 47–47, 28 jan. 2022.

PAPAPOSTOLOU, A. et al. **Attracting Financing for Green Energy Projects: A City Readiness Index**. Lecture Notes in Business Information Processing, p. 159–170, 2023.

PAUL, J.; CRIADO, A. R. **The art of writing literature review: What do we know and what do we need to know?** International Business Review, v. 29, n. 4, p. 101717, 2020.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD); INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA); FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). **Atlas do desenvolvimento humano no Brasil: IDHM 2010**. Brasília: PNUD, IPEA, FJP, 2013. Disponível em: <https://www.atlasbrasil.org.br/>.

POLYANSKA, A. et al. **A Multicriteria Approach to the Study of the Energy Transition Results for EU Countries**. Energies, v. 18, n. 20, p. 5406, 14 out. 2025.

SAMARAS, P. et al. **Readiness to Adopt the Smart Readiness Indicator Scheme Across Europe: A Multi-Criteria Decision Analysis Approach**. p. 268–273, 12 jun. 2024.

SEPEHR HENDIANI; WALTHER, G. **Sustainability performance evaluation of renewable energy systems using a new multi-expert multi-criteria interval type-2 fuzzy distance to ideal solution approach**. Applied Energy, v. 347, p. 121436–121436, 1 out. 2023.

SIKSNELYTE-BUTKIENE, I.; STREIMIKIENE, D.; BALEZENTIS, T. **Addressing sustainability issues in transition to carbon-neutral sustainable society with multi-criteria analysis**. Energy, v. 254, p. 124218, set. 2022.

SNYDER, H. **Literature review as a research methodology: An overview and guidelines**. Journal of Business Research, v. 104, p. 333–339, 2019.

TUTAK, M.; BRODNY, J.; GREBSKI, W. W. **Entropy–Evolutionary Evaluation of Sustainability (E3): A Novel Approach to Energy Sustainability Assessment—Evidence from the EU-27**. Energies, v. 18, n. 20, p. 5481, 17 out. 2025.

YANG, Y.; XIA, S.; HUANG, P.; QIAN, J. **Energy transition: Connotations, mechanisms and effects**. Energy Strategy Reviews, 2024. DOI: 10.1016/j.esr.2024.101320.

ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z.; ANTUCHEVICIENE, J. **Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment**. Electronics and Electrical Engineering, v. 122, n. 6, 11 jun. 2012.