

urbe

Revista Brasileira de Gestão Urbana

[scielo.br/urbe](http://scielo.br/urbe)

PUCPRESS

# Análise de indicadores de sustentabilidade energética dos estados da Amazônia legal brasileira

*Analysis of energy sustainability indicators in the states of the Brazilian legal Amazon*

Lucas Mateus Coelho Nunes <sup>[a]</sup> 

Belém, PA, Brasil

<sup>[a]</sup> Universidade do Estado do Pará (UEPA)

Heloiza Santos Borges <sup>[a]</sup> 

Belém, PA, Brasil

<sup>[a]</sup> Universidade do Estado do Pará (UEPA)

Marcelo José Raiol Souza <sup>[a]</sup> 

Belém, PA, Brasil

<sup>[a]</sup> Universidade do Estado do Pará (UEPA)

Altem Nascimento Pontes <sup>[a]</sup> 

Belém, PA, Brasil

<sup>[a]</sup> Universidade do Estado do Pará (UEPA)

**Como citar:** Nunes, L. M. C., Borges, H. S., Souza, M. J. R., & Pontes, A. N. (2026). Análise de indicadores de sustentabilidade energética dos estados da Amazônia legal brasileira. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 18, e20250322, 2026. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.018.e20250322>

LMCN é Doutorando em Ciências Ambientais (PPGCA-UEPA), e-mail: [lucasmateusnunes13@gmail.com](mailto:lucasmateusnunes13@gmail.com)

HSB é doutoranda no Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPGCA-UEPA), e-mail: [santosheloiza@gmail.com](mailto:santosheloiza@gmail.com)

MJRS é doutor em Engenharia de Recursos Naturais pela Universidade Federal do Pará, e-mail: [mraiol@yahoo.com.br](mailto:mraiol@yahoo.com.br)

ANP é doutor em Ciências, na modalidade Física, pela Universidade Estadual de Campinas (2001). Professor Titular da Universidade Federal do Pará e Professor Adjunto IV da Universidade do Estado do Pará, e-mail: [altempontes@gmail.com](mailto:altempontes@gmail.com)

## Resumo

A sustentabilidade energética constitui um dos grandes desafios da Amazônia Legal, em razão das disparidades territoriais, logísticas e socioeconômicas que marcam a região. Este estudo analisou os indicadores energéticos dos nove estados amazônicos, contemplando as dimensões ambiental, energética e social, com o objetivo de identificar padrões estruturais e promover uma leitura integrada da sustentabilidade regional. Foram aplicadas análises de correlação para revelar associações significativas entre variáveis e técnicas multivariadas para identificar perfis energéticos distintos. Os resultados mostraram correlações positivas expressivas entre emissões de CO<sub>2</sub>, demanda energética e população, evidenciando o impacto do crescimento urbano sobre o meio ambiente. Também foi identificada uma substituição quase perfeita entre fontes fósseis e renováveis, além de uma associação significativa entre o acesso a combustíveis limpos e a presença de fontes fósseis na matriz, revelando desafios na logística e distribuição. As análises multivariadas agruparam os estados em cinco grupos, com destaque para Mato Grosso e Maranhão, que possuem matrizes diversificadas, e para o Amazonas, marcado pela dependência de fontes fósseis. A pesquisa aponta para a necessidade de estratégias regionais específicas de transição energética, com foco na diversificação das fontes, na equidade social e na segurança ambiental, contribuindo para o fortalecimento de políticas públicas sustentáveis.

**Palavras-chave:** Amazônia. Desenvolvimento sustentável. Indicadores. Transição energética. Política energética.

## Abstract

*Energy sustainability is a critical challenge in the Brazilian Legal Amazon, driven by marked territorial, logistical, and socioeconomic disparities. This study assessed environmental, energy, and social indicators across nine Amazonian states to identify structural patterns and provide an integrated perspective on regional sustainability. Correlation analyses revealed strong positive associations between CO<sub>2</sub> emissions, energy demand, and population, underscoring the environmental impacts of urban growth. A near-perfect substitution between fossil and renewable sources was observed, alongside a significant link between access to clean fuels and the presence of fossil sources, indicating logistical and distribution constraints. Multivariate analyses classified the states into five distinct groups, highlighting the diversified energy portfolios of Mato Grosso and Maranhão, and the fossil fuel dependence of Amazonas. The results point to the urgent need for region-specific energy transition strategies emphasizing source diversification, social equity, and environmental security, to support robust and sustainable public policies.*

**Keywords:** Brazilian Legal Amazon; Sustainable development; Indicators; Energy transition; Energy policy.

---

## Introdução

A sustentabilidade é um equilíbrio entre as dimensões sociais, ambientais e econômicas das necessidades humanas, em constante mudança devido ao crescimento populacional e ao aumento do consumo (Olmos-Gomez et al., 2020). Como essas dimensões são interdependentes, trata-se de um conceito dinâmico e não estático (Stefenon; Nied, 2019). Essa natureza exige abordagens inovadoras no consumo de energia, buscando atender à demanda crescente sem comprometer o meio ambiente. A transição para fontes renováveis, como solar e eólica, supre a necessidade de alternativas mais limpas e estimula o crescimento econômico pela criação de empregos e indústrias verdes (Zahoor; Khan; Hou, 2021). Integrar a sustentabilidade às políticas públicas também promove equidade social, beneficiando comunidades marginalizadas e ampliando o acesso a recursos (Zhou et al., 2023).

Para atingir a verdadeira sustentabilidade energética, é essencial ampliar o uso de fontes renováveis — solar, eólica e hidrelétrica — reduzindo a pegada de carbono e a dependência de combustíveis fósseis (Kumar; Rathore, 2023). Essa mudança se alinha às metas do desenvolvimento sustentável, que buscam harmonizar crescimento econômico, gestão ambiental e justiça social (Dalabajan et al., 2022). Nesse contexto, políticas inovadoras e participação comunitária são fundamentais para consolidar uma cultura de sustentabilidade (Bokolo, 2023).

A mensuração da sustentabilidade é importante para orientar o desenvolvimento. Indicadores são ferramentas amplamente reconhecidas por resumirem e condensarem informações complexas, orientando políticas públicas e avaliando desempenho nas dimensões econômica, ambiental, social e tecnológica (Ninno Muniz, 2020; Novas et al., 2021). Seu objetivo é fornecer aos tomadores de decisão uma avaliação integrada dos sistemas naturais e sociais, identificando ações prioritárias (Shah et al., 2019). No setor energético, esses indicadores revelam a complexidade dos sistemas e oferecem dados relevantes para o público (Gibellato et al., 2023).

A Amazônia é estratégica na geração de energia elétrica renovável no Brasil. Abriga quatro das cinco maiores hidrelétricas do país e contribui para que 82% da eletricidade nacional seja de origem renovável (Arias, 2020). Contudo, parte da população local depende de combustíveis fósseis, caros e poluentes. Em 2020, a região gerou mais de 26% da energia elétrica nacional, mas consumiu apenas 8% desse total (Atkins, 2020). A análise dos indicadores de sustentabilidade energética na região deve considerar a dinâmica socioambiental que influencia produção e consumo (Mariosa; Benedicto; Sugahara, 2019). A dependência de combustíveis fósseis nas comunidades locais, mesmo com abundância de energias renováveis, evidencia uma disparidade que compromete a sustentabilidade (Londres et al., 2023).

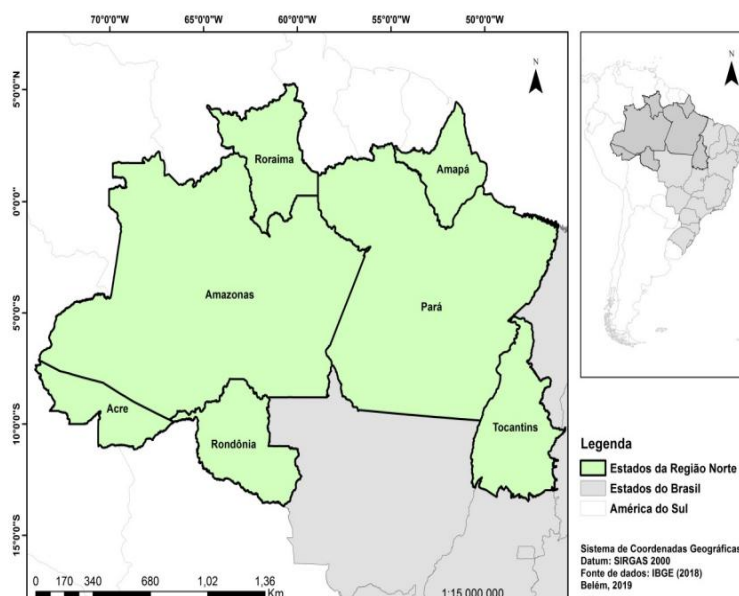
Esse paradoxo é intensificado pelas mudanças climáticas, que afetam ecossistemas, disponibilidade de recursos e segurança energética (Chávez, 2023). Iniciativas locais de eficiência e uso de tecnologias renováveis podem reduzir essa lacuna e fortalecer o protagonismo comunitário (Bodjongo; Ekome; Essomme, 2021). Nesse contexto, o estudo analisa indicadores de sustentabilidade energética dos estados da Amazônia Legal, identificando padrões, assimetrias e fatores críticos para apoiar políticas públicas ajustadas às realidades estaduais. Espera-se, assim, que os resultados contribuam para indicar prioridades territoriais na transição energética e orientar investimentos em fontes renováveis, infraestrutura de distribuição e acesso a combustíveis limpos, contribuindo para um planejamento regional mais justo e sustentável.

## Metodologia

### Área de Estudo

A pesquisa focou na análise dos indicadores de sustentabilidade energética na região da Amazônia Legal, composta pelos seguintes estados brasileiros: Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, parte do Maranhão e parte do Mato Grosso. Essa região foi escolhida devido à sua importância em termos de biodiversidade, impactos ambientais e potencial para o desenvolvimento sustentável.

**Figura 1** - Mapa de Localização dos estados da Amazônia legal



Fonte: Aguiar *et al.* (2020).

### Coleta de Dados

Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura referente a indicadores de sustentabilidade energética. Com base nos resultados dessa revisão, foram identificados doze indicadores fundamentais: Emissões de CO<sub>2</sub> pelo uso de energia, Fósseis na Matriz elétrica (ME), Fósseis na Matriz energética (MENE), Renováveis na matriz elétrica (ME), Renováveis na Matriz Energética (MENE), Produção de energia, Capacidade instalada de energia elétrica, Demanda total de energia, PIB per capita, População, Percentagem da população com acesso primário a combustíveis e tecnologias limpas, Percentagem da população com acesso à eletricidade.

O método proposto baseia-se nas dimensões da sustentabilidade. Os indicadores foram agrupados em três dimensões complementares: ambiental, energética e socioeconômica. (Abbasi *et al.*, 2023). Essas três dimensões oferecem uma representação mais abrangente da multidimensionalidade da sustentabilidade energética e fornecem um ponto de partida aceitável para a definição de sustentabilidade (Muniz *et al.*, 2023).

Os indicadores ambientais refletem os impactos ecológicos e o grau de descarbonização dos sistemas estaduais; os energéticos, a autonomia e a eficiência das infraestruturas regionais; e os socioeconômicos, a equidade no acesso e os efeitos distributivos do sistema energético (Oliveira et al., 2020). Essa combinação foi projetada para averiguar as características dos sistemas estaduais da Amazônia Legal, considerando suas particularidades territoriais.

Os indicadores foram coletados da plataforma SIE BRASIL (Sistema de informações energéticas), do Ministério de Minas e Energia (MME), e do IEPA (Instituto de Pesquisa de Economia Aplicada), conforme tabela 1. Essas plataformas disponibilizam informações sobre as dimensões ambientais, energéticas e socioeconômicas para a análise da sustentabilidade das energias, fornecendo indicadores específicos relacionados às características de cada estado da Amazônia legal.

Os indicadores coletados foram submetidos a uma análise, levando em consideração diferentes dimensões da sustentabilidade energética: ambiental, social e econômica. A análise utilizou dados disponíveis do ano de 2000 a 2021, com variações na cobertura temporal conforme a disponibilidade de cada indicador.

**Tabela 1** - Indicadores e Dimensões da Sustentabilidade Energética na Amazônia Legal

Dimensões	Indicadores	Descrição	Fonte
Ambiental	Emissões de CO <sub>2</sub> pelo uso de energia	Mede a quantidade de dióxido de carbono emitida devido ao consumo de energia (MtCO <sub>2</sub> )	SIE BRASIL
	Fósseis na Matriz elétrica (ME)	Representa a participação de fontes fósseis na geração de energia elétrica (%)	SIE BRASIL
	Fósseis na Matriz energética (MENE)	Indica a proporção de fontes fósseis no total da matriz energética (%).	SIE BRASIL
	Renováveis na matriz elétrica (ME)	Mede a participação de fontes renováveis na geração de eletricidade (%).	SIE BRASIL
	Renováveis na Matriz Energética (MENE)	Refere-se à contribuição de fontes renováveis no total da matriz energética (%).	SIE BRASIL
Energética	Produção de energia	Quantifica a quantidade total de energia produzida, considerando todas as fontes (TWh).	SIE BRASIL
	Capacidade instalada de energia elétrica	Refere-se à potência máxima disponível para geração de energia em uma região (TWh).	SIE BRASIL
	Demanda total de energia	Indica o total de energia consumida por todos os setores em um período determinado (TWh).	SIE BRASIL
Socioeconômica	PIB per capita	Refere-se à média de riqueza produzida por habitante em um país (R\$).	SIE BRASIL
	População	Representa o número total de habitantes de uma região (Milhões).	SIE BRASIL
	Percentagem da população com acesso primário a combustíveis e tecnologias limpas	Percentual das pessoas que utilizam combustíveis e tecnologias limpas para cozimento, aquecimento e iluminação em relação ao total da população (%).	IPEA
	Percentagem da população com acesso à eletricidade	Proporção da população que tem acesso à eletricidade em seus domicílios (%).	IPEA

Fonte: MME (s.d); IPEA (s.d.).

## Análise de Dados

Para analisar as relações entre as variáveis energéticas, socioeconômicas e ambientais da Amazônia Legal, aplicou-se correlação de Pearson e de Spearman, identificando associações relevantes e eventuais sobreposições de informação. Utilizou-se Pearson quando os dados apresentaram normalidade, por ser adequado a relações lineares entre variáveis contínuas (Schober, Boer, & Schwarte, 2018). Para variáveis com assimetria ou outliers, adotou-se Spearman, alternativa não paramétrica baseada em postos (Scharf et al., 2022).

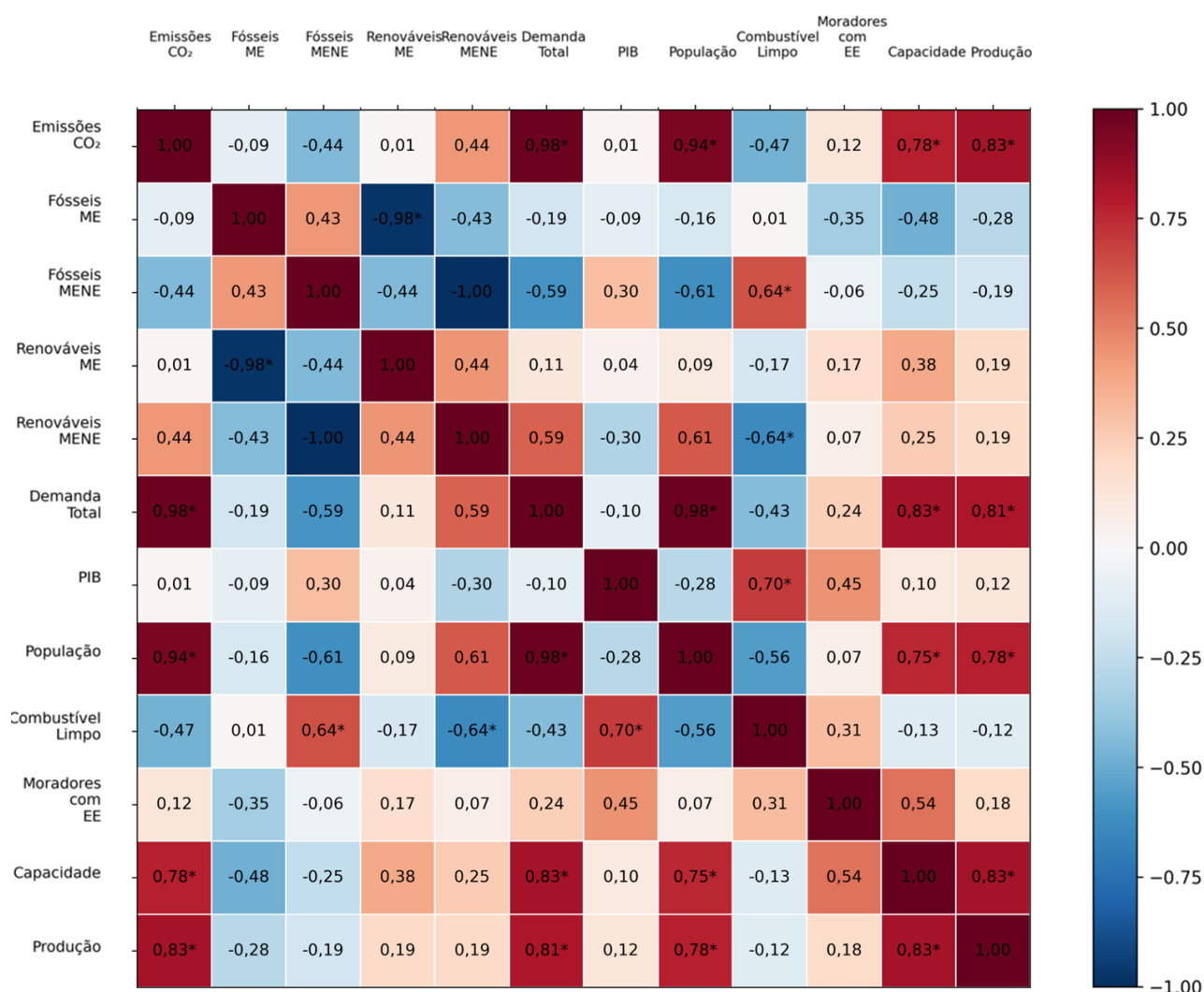
Com a finalidade de verificar as similaridades estruturais entre os estados amazônicos em relação à capacidade e produção de energia, foi aplicada uma estatística multivariada. Para tanto, foram empregadas a análise de componentes principais (PCA) e a análise hierárquica de agrupamentos (HCA). A partir das componentes principais, elaborou-se gráficos que evidenciou agrupamentos de estados com perfis energéticos semelhantes. Para confirmar os padrões observados na PCA, utilizou-se a HCA por meio de um dendrograma, o qual reforçou os grupos identificados e permitiu uma tipologia regional. Para a realização das análises estatísticas, foram utilizados o software BioEstat e o Minitab 22, adequados para procedimentos de correlação e estatística multivariada em pesquisas aplicadas (Ferreira, Ríos, & Freire, 2023).

## Resultados e discussão

### *Análise da relação entre as variáveis energéticas, socioeconômicas e ambientais*

A partir da construção de uma matriz de correlação entre os indicadores (Figura 2), procedeu-se inicialmente ao teste de normalidade de Shapiro–Wilk. Os resultados indicaram que a maioria das variáveis apresentava distribuição aproximadamente normal, à exceção da capacidade instalada de energia elétrica (MW), do percentual de domicílios com acesso a combustíveis limpos e do percentual de domicílios com acesso à eletricidade. Para essas variáveis, adotou-se o coeficiente de correlação de Spearman ( $\rho$ ), enquanto as demais foram analisadas por meio do coeficiente de Pearson ( $r$ ). Dessa forma, a matriz de correlação apresentada na Figura 2 combina coeficientes de Pearson e Spearman, de acordo com o comportamento estatístico de cada indicador.

Figura 2 – Matriz de correlação entre os indicadores



Legenda: \* correlação significativa (p-valor ≤ 0,05). Fonte: Autores (2025).

Na dimensão ambiental, as emissões de CO<sub>2</sub> pelo uso de energia apresentaram forte associação com a demanda total de energia ( $r = 0,98$ ;  $p < 0,001$ ) e com a população dos estados ( $r = 0,94$ ;  $p < 0,001$ ). Isso sugere que estados com maior porte demográfico e maior consumo energético concentram os maiores volumes de emissão de gases de efeito estufa. Rondônia, Mato Grosso e o Pará apresentaram os maiores volumes de emissões absolutas, enquanto Acre e Roraima se destacaram por suas emissões reduzidas. É importante destacar que as emissões estão fortemente associadas à estrutura energética dos estados, especialmente ao uso de fontes fósseis (Liu et al., 2023).

Estudos que empregam dados regionais revelam que a população e o PIB per capita são os principais fatores de emissão, com as emissões crescendo significativamente devido ao aumento do consumo de energia, incluindo combustíveis fósseis, apesar da dependência do Brasil de fontes de energia renováveis, mas seus efeitos variam de acordo com o estágio de desenvolvimento e a estrutura econômica local (Somoye et al., 2023).

Além disso, as emissões de CO<sub>2</sub> também apresentaram correlação significativa com a capacidade instalada de energia ( $\rho = 0,78$ ;  $p = 0,012$ ) e com a produção efetiva de energia elétrica ( $r = 0,83$ ;  $p = 0,002$ ), evidenciando que a expansão da infraestrutura energética está diretamente associada ao aumento das emissões, especialmente quando não acompanhada de uma matriz limpa.

Segundo Tolstaya (2022), a correlação entre as emissões de CO<sub>2</sub> e a dinâmica energética no Brasil, destacando que o aumento da capacidade instalada de energia e a produção de eletricidade, particularmente a partir de combustíveis fósseis, contribuem significativamente para as emissões de CO<sub>2</sub>. Na Amazônia, o desmatamento e as mudanças no uso da terra exacerbam ainda mais as emissões. A transição para fontes de energia renováveis é enfatizada como uma estratégia para mitigar essas emissões e, ao mesmo tempo, atingir as metas de desenvolvimento sustentável (Mataveli et al., 2021).

As correlações negativas entre fontes fósseis e renováveis na matriz elétrica ( $r = -0,98$ ;  $p < 0,001$ ) e na matriz energética ( $r = -1,00$ ;  $p < 0,001$ ) evidenciam a polarização entre estados com perfis energéticos distintos. Embora as fontes renováveis, como solar, eólica, biogás e hidrelétrica, sejam projetadas para atender às demandas de energia, eles são intermitentes e exigem uma conexão de rede confiável para estabilidade. A integração de recursos renováveis visa minimizar a dependência de combustíveis fósseis, mas a matriz energética ainda depende da confiabilidade da rede durante períodos de baixa geração renovável (Dasí-Crespo et al., 2023).

Estados como Pará, Tocantins e Mato Grosso possuem matrizes predominantemente limpas, devido à grande disponibilidade de geração hidráulica, enquanto estados como Amazonas e Roraima apresentam maior dependência de combustíveis fósseis, em parte por limitações logísticas e dificuldade de integração ao Sistema Interligado Nacional. Essa heterogeneidade territorial reforça a importância de estratégias regionalizadas de transição energética, respeitando as restrições locais (Santos et al., 2023)

No que se refere à dimensão energética, os indicadores energéticos também apresentaram forte correlações. A capacidade instalada, a produção de energia e a demanda energética total mostraram correlações significativas entre si, como, por exemplo, entre capacidade instalada e produção ( $\rho = 0,83$ ;  $p = 0,005$ ), entre capacidade e demanda ( $\rho = 0,83$ ;  $p = 0,026$ ) e entre produção e demanda ( $r = 0,81$ ;  $p = 0,005$ ). Esses resultados indicam que os estados com maior infraestrutura instalada são também os que apresentam maior consumo e maior geração efetiva de energia.

O estado do Pará destacou-se como o principal produtor e exportador de energia da região, com mais de 135 mil GWh gerados anualmente, seguido por Mato Grosso e Amazonas. Em contraste, estados como Acre, Roraima e Amapá apresentaram baixos volumes de produção e capacidade instalada. Essas diferenças também se refletem na dependência de importações de energia e em vulnerabilidades quanto à segurança do fornecimento.

O crescimento da capacidade instalada, principalmente de fontes de energia renováveis, como eólica e solar, influencia diretamente a quantidade de energia produzida. (Arias-Gaviria et al., 2022). Por exemplo, estudos recentes demonstram que o aumento da capacidade instalada eólica e fotovoltaica melhora a adequação de novas energias nos sistemas de energia, aumentando a confiabilidade e as taxas de consumo (Singh, 2023).

A demanda de energia elétrica tem um impacto positivo e significativo na produção de energia, indicando que, à medida que a demanda de energia aumenta, a produção de energia também aumenta, embora em um ritmo mais lento. (Haouraji et al., 2022).

O mix de capacidade instalada, particularmente em relação de fontes de energia renováveis, desempenha um papel fundamental no atendimento da demanda total de energia. A otimização da capacidade instalada, considerando aspectos ambientais e de custo, é essencial para atender com eficiência às demandas de energia de carga base (Xue et al., 2022).

Na dimensão socioeconômica, a população mostrou forte relevância, apresentando correlação significativa com emissões de CO<sub>2</sub> ( $r = 0,94$ ;  $p < 0,001$ ), demanda energética ( $r = 0,98$ ;  $p < 0,001$ ), capacidade instalada ( $\rho = 0,75$ ;  $p = 0,025$ ) e produção de energia ( $r = 0,78$ ;  $p = 0,005$ ). Isso confirma seu papel determinante na configuração do sistema energético e nos impactos ambientais. O aumento populacional eleva a demanda por energia e as emissões, especialmente em regiões de rápido crescimento, como observado nos países do BRICS (grupo de países emergentes que inclui Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), que demandam mais recursos e apresentam maior intensidade energética e de emissões (Zarco-Periñán et al., 2021; Oak, 2023).

Ainda que tenha se correlacionado moderadamente com o percentual de domicílios com combustível limpo ( $\rho = 0,70$ ) e com acesso à eletricidade ( $\rho = 0,45$ ), os respectivos p-valores não indicaram significância estatística. Isso sugere que a renda média estadual não é um bom preditor da sustentabilidade energética na Amazônia Legal, o que pode ser atribuído a fatores como a presença de subsídios, políticas centralizadas e desigualdades internas nos estados.

O Maranhão e o Pará têm as maiores populações da região, com demandas e impactos proporcionais. Pokhriyal et al. (2022) observaram, no Senegal, que o rápido crescimento populacional não acompanha o aumento do acesso a combustíveis limpos e eletricidade, indicando correlação negativa e evidenciando a necessidade de políticas específicas para ampliar o acesso à energia.

A análise mostrou que o percentual de domicílios com acesso a combustíveis limpos para cocção tem correlação positiva e significativa com o PIB per capita ( $\rho = 0,70$ ;  $p = 0,035$ ), indicando que estados com maior renda tendem a usar mais GLP e gás natural. Isso evidencia que fatores econômicos influenciam diretamente o acesso a tecnologias energéticas seguras e a adoção de práticas residenciais sustentáveis.

Khan et al. (2024) analisaram a relação entre crescimento econômico, acesso a combustíveis limpos e tecnologias de cozinha e consumo de energia renovável nas economias do sul da Ásia, com foco em dados de Bangladesh, Índia e Paquistão (2000–2020), e identificaram forte correlação positiva entre PIB per capita e acesso a tecnologias limpas, com a Índia apresentando as maiores melhorias, seguida por Paquistão e Bangladesh.

Os resultados evidenciaram que o percentual de domicílios com acesso a combustíveis limpos na preparação de alimentos apresentou correlação positiva e significativa com a participação de fontes fósseis na matriz energética ( $\rho = 0,64$ ;  $p = 0,02$ ) e negativa com a participação de fontes renováveis ( $\rho = -0,64$ ;  $p = 0,02$ ). Esse padrão, revela um paradoxo presente na região: embora fontes fósseis sejam ambi-

entalmente mais impactantes, sua disponibilidade e logística de distribuição ainda desempenham papel central no atendimento energético domiciliar, especialmente em áreas isoladas ou com infraestrutura limitada, conforme contatado em Šimová et al. (2023).

A maior cobertura de domicílios com acesso a combustíveis considerados limpos, como o gás liquefeito de petróleo (GLP), ainda depende fortemente da cadeia de suprimento baseada em combustíveis fósseis, em oposição às fontes renováveis, cuja inserção no uso residencial permanece incipiente em muitos estados amazônicos. A transição energética na Amazônia Legal deve considerar não apenas a substituição tecnológica das fontes de geração em escala, mas também a infraestrutura de distribuição e o uso final da energia nas residências.

### **Análise das similaridades estruturais entre os estados amazônicos em relação à capacidade e produção energética**

**Tabela 2** – Dados da capacidade instalada de energia elétrica por estado (MW)

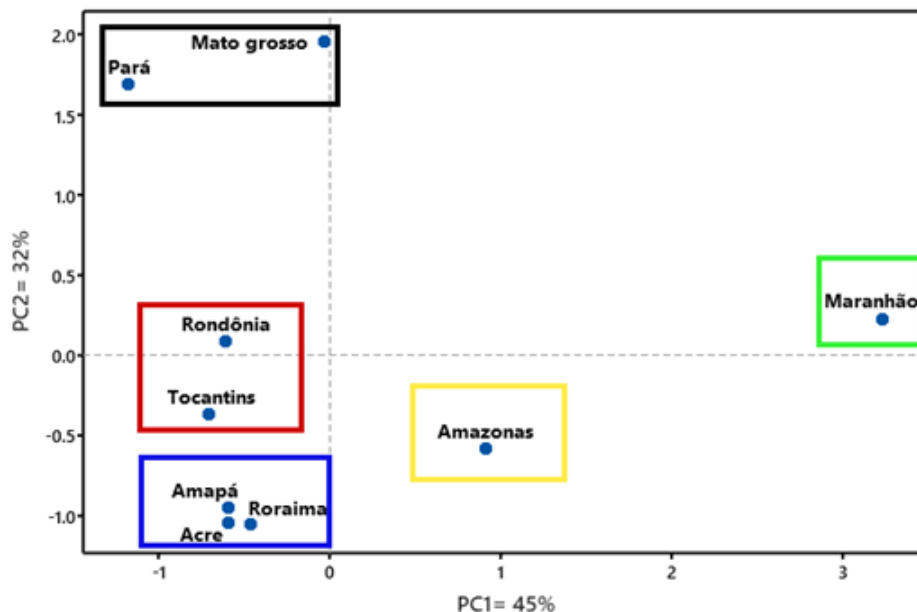
Estados	Hidráulica	Térmica	Eólica	Solar
Pará	17.223,40	444,65	0,00	74,29
Rondônia	7.372,54	559,12	0,00	27,55
Mato Grosso	4.609,89	871,45	0,00	223,55
Tocantins	2.381,23	86,27	0,00	44,80
Maranhão	662,59	2.390,80	307,34	62,85
Amapá	637,32	152,51	0,00	7,80
Amazonas	274,71	2.033,57	0,00	16,21
Roraima	5,00	281,69	0,00	2,92
Acre	0,00	110,63	0,00	7,09

Fonte: SIE BRASIL.

Com base nas análises multivariadas da capacidade instalada de energia elétrica nos estados da Amazônia Legal (Tabela 2), foi possível refinar a segmentação regional a partir da aplicação combinada da Análise de Componentes Principais (PCA) e da Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA). Os resultados obtidos permitem descrever os diferentes perfis energéticos da região.

A figura 3 apresenta o plano fatorial da PCA, no qual os dois primeiros componentes explicam conjuntamente 77% da variância total dos dados. O primeiro componente (CP1=45%) está fortemente correlacionado com as fontes térmica e eólica, enquanto o segundo componente (CP2=32%) se relaciona principalmente com as fontes hidráulica e solar. Essa estrutura indica que CP1 reflete um eixo de diversificação tecnológica moderna, enquanto CP2 representa um gradiente de predominância hidráulica tradicional.

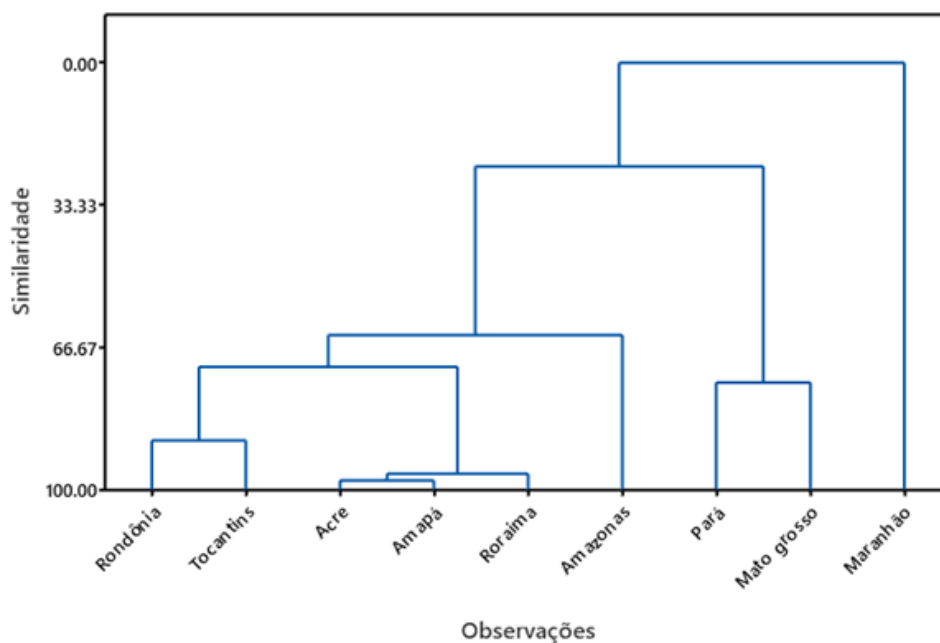
**Figura 3** - Análise de Componentes Principais capacidade instalada de energia elétrica nos estados da Amazônia Legal



Fonte: Autores (2025).

A figura 4, correspondente ao dendrograma da HCA (ligação completa com distância euclidiana), confirma visualmente os agrupamentos obtidos pela PCA, revelando cinco distintos de estados com perfis energéticos bem delineados.

**Figura 4** - Análise de Componentes hierárquicos de capacidade de energia nos estados da Amazônia Legal



Fonte: Autores (2025).

O primeiro grupo, composto por Acre, Amapá e Roraima, representa o segmento mais vulnerável do ponto de vista energético. Esses estados possuem capacidade instalada extremamente reduzida, geralmente inferior a 800 MW, e operam com baixa complexidade tecnológica. A matriz é dominada por pequenas centrais térmicas, muitas delas movidas a combustíveis fósseis como óleo diesel ou gás natural, com pouquíssima presença de fontes modernas como solar ou eólica. O agrupamento estatístico entre eles sugere baixa resiliência e alta dependência de importação de energia, características que impactam diretamente na segurança energética, no custo de fornecimento e na sustentabilidade ambiental. A presença dessas regiões no extremo inferior do plano fatorial da PCA reforça sua distância estrutural em relação aos centros energéticos da região.

Regiões como Acre, Amapá e Roraima apresentam uma alta dependência das importações de energia devido à produção local limitada de energia e aos desafios de infraestrutura. (Costa & Borges, 2022). Essa dependência complica o fornecimento de energia nesses estados, particularmente em Roraima, onde a expansão do mercado de gás natural é dificultada por especificidades regionais e conflitos de interesse. A introdução de projetos de GNL de pequena escala, como o Projeto Azulão-Jaguatirica II, visa mitigar essa dependência e aprimorar a matriz energética regional (Passos et al., 2024).

O segundo grupo, formado por Rondônia e Tocantins, representa um estágio de consolidação intermediária. Embora ainda distantes dos grandes produtores, esses estados possuem capacidade instalada significativamente superior aos do primeiro grupo e infraestruturas mais estáveis, centradas principalmente em geração hidráulica. Rondônia tem visto um aumento notável na utilização de energia hidrelétrica, particularmente desde 2012, com a construção de grandes usinas hidrelétricas como Santo Antônio e Jirau (Brunoro; Cavalcante, 2024).

No plano fatorial da PCA, aparecem próximos do eixo de predominância hidráulica, e no dendrograma da HCA, agrupam-se de forma clara, evidenciando afinidade tecnológica e potencial para transição energética mais planejada e escalável. Sua posição intermediária no mapa de agrupamento pode indicar viabilidade para ampliação da diversificação, desde que amparada por políticas de investimento e inovação. A tendência geral indica uma demanda crescente por fontes de energia renováveis nos dois estados, com projeções de aumento do consumo de energia no Brasil atingindo 741 TWh até 2026 (Deliza et al., 2020).

O terceiro grupo, composto apenas pelo Amazonas, apresenta perfil crítico. Com cerca de 2.300 MW instalados, depende majoritariamente de térmicas fósseis, sobretudo óleo diesel e gás natural para localidades isoladas. A falta de renováveis modernas e o baixo aproveitamento hidráulico tornam o sistema ineficiente e ambientalmente oneroso. Seu isolamento na PCA e HCA evidencia a desigualdade entre oferta e potencial renovável, reforçando a urgência de políticas de transição para fontes limpas e descentralizadas.

Apesar da interconexão com o Sistema Interligado Nacional (SIN), há uma necessidade premente de incorporar fontes renováveis adicionais para melhorar o fornecimento e a confiabilidade de energia em condições críticas (Beyza & Yusta, 2021). À luz da crescente escassez de combustíveis fósseis, há um interesse crescente em fontes de energia renováveis, particularmente sistemas híbridos de energia renovável, como uma solução viável para melhorar o fornecimento de energia em localidades isoladas na Amazônia (Natividad; Benalcazar, 2023).

No quarto grupo estão Pará e Mato Grosso, principais centros de geração da Amazônia Legal. O Pará, com mais de 17 mil MW instalados, lidera a produção regional com matriz quase totalmente hidráulica voltada à exportação e à indústria eletrointensiva. O Mato Grosso, com cerca de 5.700 MW, incorpora crescente participação solar, mostrando maior diversificação. Ambos ocupam posições altas no eixo CP2 da PCA, refletindo a predominância hidráulica e potencial tecnológico complementar. Suas infraestruturas robustas os consolidam como eixos da matriz elétrica amazônica e estratégicos para o SIN, embora a dependência hídrica implique riscos climáticos.

Embora o Pará tenha grande potencial para energia renovável, seu aproveitamento deve equilibrar conservação ambiental e uso sustentável da terra. A inclusão de biomassa e energia das marés pode ampliar o acesso à energia e impulsionar o desenvolvimento regional, desde que considerados seus impactos ambientais e sociais (Biernacka, 2022). Já o Mato Grosso apresenta fortes conexões energéticas com o sistema nacional e mercados do Centro-Oeste e Sudeste, mas sua infraestrutura ainda precisa de modernização e expansão para atender à demanda crescente (Carvalho; Gomes, 2022).

O quinto grupo, composto apenas pelo Maranhão, tem perfil inovador e diversificado. Com cerca de 3.400 MW instalados, é o único da região com participação relevante de energia eólica e solar. Apesar da predominância térmica, destaca-se pela diversificação, aparecendo no PCA no extremo do componente de diversificação tecnológica (CP1) e, no HCA, como o último a se agrupar. Seu perfil o posiciona como modelo de transição energética, passível de replicação para tornar o sistema regional mais sustentável.

A capacidade de energia no Estado do Maranhão inclui um potencial significativo para geração de energia eólica e maremotriz. A geração eólica é viável na costa oeste, com velocidades médias de vento de 8,0 a 8,5 m/s e densidade de energia em torno de 350 W/m<sup>2</sup>. (Lozer dos Reis et al., 2021). A energia das marés mostra um potencial ainda maior, com dados de energia atingindo até 2.260 W/m<sup>2</sup> em baías específicas como Turiaçu, estuário do Bacanga e Ilha do Medo, indicando um caminho promissor para a diversificação de energia renovável na região (Czizewski et al., 2020)

Com base nas análises multivariadas da produção de energia nos estados da Amazônia Legal (Tabela 3), foi possível identificar cinco perfis energéticos distintos a partir da aplicação integrada da Análise de Componentes Principais (PCA) e da Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA). A combinação dessas abordagens permitiu revelar com clareza as diferenças estruturais quanto à origem da energia gerada, à escala produtiva e ao nível de diversificação da matriz estadual.

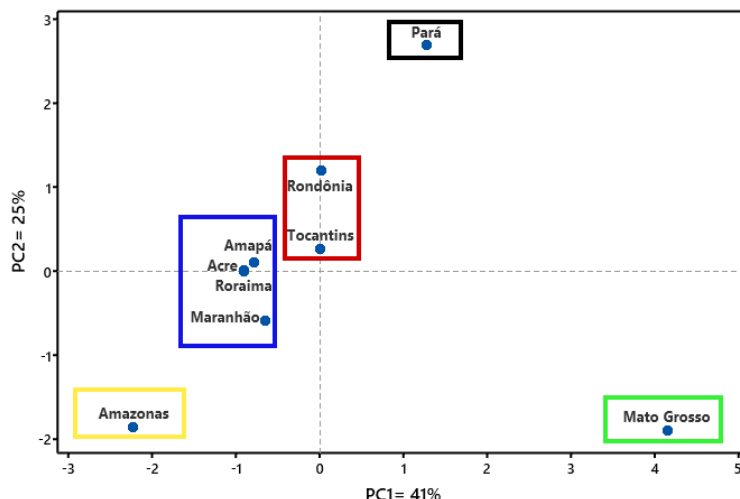
**Tabela 3** – Dados da produção de energia por estado (GWh)

Estados	Petróleo	Gás Natural	Energia Elétrica	Hidráulica	Eólica	Solar	Etanol	Biodiesel
Rondônia	0,00	0,00	19.231,85	20.598,76	0,00	18,18	8,06	8,14
Acre	0,00	0,00	254,69	0,00	0,00	3,92	3,11	0,00
Amazonas	1.574,39	4.461,81	8.849,03	1.290,95	0,00	9,01	5,67	0,00
Roraima	0,00	0,00	403,74	14,00	0,00	3,64	0,00	0,00
Pará	0,00	0,00	45.384,08	44.602,57	0,01	43,22	43,37	1,46
Amapá	0,00	0,00	2.145,10	1.833,48	0,00	8,25	0,00	0,00
Tocantins	0,00	0,00	9.252,23	9.155,84	0,00	28,20	136,24	75,70
Maranhão	3,40	1.479,45	9.741,18	2.532,37	1.098,66	32,51	158,61	12,48
Mato Grosso	0,00	0,00	14.761,97	13.833,24	0,00	135,84	1.514,91	759,30

Fonte: SIE BRASIL.

A figura 5 representa o plano fatorial da PCA, onde os dois primeiros componentes explicam 66% da variância total. O Componente Principal 1 (CP1) é fortemente correlacionado com fontes fósseis, como petróleo e gás natural, enquanto o Componente Principal 2 (CP2) reflete principalmente a participação de fontes renováveis, especialmente energia hidráulica, elétrica de origem renovável, solar, etanol e biodiesel. Essa estrutura interpretativa posiciona CP1 como um eixo de dependência fóssil e CP2 como um gradiente de intensidade e diversidade renovável.

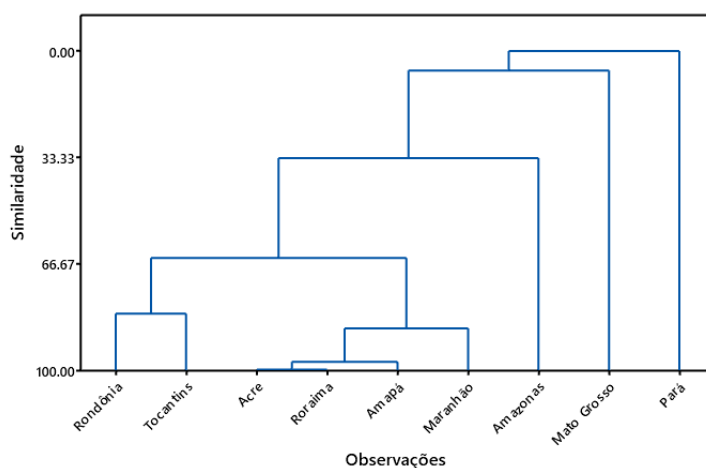
**Figura 5** - Análise de Componentes Principais da produção de energia elétrica nos estados da Amazônia Legal



Fonte: Autores (2025).

Já a figura 6, que exibe o dendrograma da HCA baseado em distância euclidiana e ligação completa, reforça a tipologia formada por agrupamentos coerentes com os padrões do PCA.

**Figura 6** - Análise de Componentes Principais capacidade instalada de energia elétrica nos estados da Amazônia Legal



Fonte: Autores (2025).

O primeiro grupo é composto por Rondônia e Tocantins, com produção energética de média escala e forte predominância hidrelétrica. Rondônia tem parque hidrelétrico consolidado e integrado ao SIN, atuando como exportador, enquanto Tocantins opera em menor escala, voltado sobretudo à própria demanda. Em ambos, a baixa diversificação da matriz aumenta a vulnerabilidade às flutuações hidrológicas e às pressões climáticas.

Embora avancem em fontes renováveis, esses estados ainda enfrentam dependência tecnológica, necessidade de expansão da infraestrutura e restrições econômicas. Em Rondônia, a combinação de hidrelétrica e solar acompanha seus recursos naturais, enquanto, em Tocantins, biodiesel e solar se articulam à base agrícola, contribuindo para a diversificação da matriz brasileira, ainda condicionada à superação de barreiras técnicas e à ampliação do apoio político (Silvestre et al., 2022; de Oliveira et al., 2022).

O segundo grupo reúne Acre, Amapá, Roraima e Maranhão, caracterizados por baixa escala de produção e forte dependência de fontes convencionais. Acre, Amapá e Roraima operam com base térmica e baixa integração ao SIN, o que eleva custos e emissões, enquanto o Maranhão, embora mais produtivo, mantém matriz híbrida ainda marcada por combustíveis fósseis, apesar da inserção de solar e eólica. Em comum, esses estados apresentam limitações estruturais, baixa resiliência energética e alta vulnerabilidade socioambiental, demandando políticas de descentralização e inserção de renováveis adaptadas às condições regionais.

Esses estados também enfrentam desafios de infraestrutura, gestão e limitações econômicas. A economia rural, especialmente no Acre e no Amapá, apresenta baixa produtividade e capitalização, o que dificulta o desenvolvimento e a implementação de projetos de energia (Lomba et al., 2020). Mesmo com avanços técnicos em projetos de energia renovável, a gestão permanece um ponto crítico para garantir seu sucesso e sustentabilidade (Abba et al., 2022).

O terceiro grupo é formado exclusivamente pelo Amazonas, cuja produção energética permanece fortemente centrada em combustíveis fósseis, sobretudo gás natural e petróleo. A matriz apresenta reduzida participação de fontes renováveis e forte presença de sistemas isolados em áreas remotas, configurando um caso crítico de dependência fóssil, com elevado custo ambiental e logístico, que aparece como outlier tanto no PCA quanto na HCA e demanda estratégias de transição energética justas e tecnicamente viáveis.

Essa situação se agrava com o avanço do debate sobre a exploração de petróleo na Margem Equatorial da Amazônia, uma das áreas ambientalmente mais sensíveis do país. Enquanto países desenvolvidos aceleram políticas de descarbonização e ampliam investimentos em renováveis, a expansão dessa fronteira petrolífera na região aponta para uma direção oposta.

O estado do Amazonas depende principalmente do diesel para gerar eletricidade em seus 95 sistemas isolados, que não estão conectados à rede elétrica nacional. Esses sistemas enfrentam desafios como baixa densidade populacional e restrições ao transporte de derivados de petróleo (Peyerl & Mendes, 2023). No entanto, a descoberta de reservas de gás natural em terra e a construção de gasodutos apresentam uma oportunidade de transição para o gás natural, o que pode reduzir significativamente os custos de combustível em mais de 40% e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, aumentando a sustentabilidade energética (Cristello et al., 2023).

O quarto grupo é representado apenas pelo Pará, maior produtor de energia da região, com mais de 17 GW de capacidade instalada, sendo mais de 98% de fonte hidrelétrica. O estado apresenta perfil produtivo altamente concentrado e centralizado, com papel estratégico no fornecimento de energia para o SIN. Porém, essa concentração em uma única fonte representa risco sistêmico diante das incertezas climáticas e dos impactos ambientais associados à expansão de grandes usinas. A baixa diversificação da matriz energética paraense reforça a necessidade de investimentos em fontes complementares — como solar e biomassa — e no fortalecimento da geração distribuída.

A produção de energia hidrelétrica no Pará é componente significativo da infraestrutura energética regional, tendo a barragem de Tucuruí como um dos exemplos mais proeminentes. Essa barragem, junto com outros projetos, desempenha papel central no atendimento às demandas de energia do Brasil, mas também gera impactos ambientais e sociais substanciais. A construção e operação dessas usinas levaram a mudanças na dinâmica dos rios, nas emissões de gases de efeito estufa e nas condições socioeconômicas da região (Catolico et al., 2021).

Contudo, o Pará tem um potencial significativo de geração de energia por meio de biomassa, principalmente a partir de resíduos de processamento de óleo de palma e cacau. Esses materiais foram identificados como tendo características energéticas satisfatórias para uso em usinas de gaseificação, o que pode ajudar a resolver problemas de acesso à energia em regiões rurais e agrícolas do estado (Bandeira et al., 2023).

Por fim, o quinto grupo é formado exclusivamente por Mato Grosso, estado que se sobressai por sua matriz multifonte e elevada diversificação produtiva. Além da significativa geração hidráulica, o estado lidera na produção de biocombustíveis (biodiesel e etanol) e possui participação expressiva da geração solar. Essa combinação confere ao Mato Grosso maior segurança energética e resiliência, com base em sinergias entre os setores agrícola e energético. Sua posição isolada no PCA reflete um estágio mais avançado de transição energética, o que o coloca como um modelo a ser observado para políticas públicas voltadas à sustentabilidade na região amazônica.

A produção de energia no estado de Mato Grosso é caracterizada por uma mistura diversificada de fontes, incluindo formas de energia tradicionais e renováveis. O setor energético do estado é importante para seu desenvolvimento econômico, com interações significativas com outras regiões brasileiras (Castelao et al., 2021). O cenário energético em Mato Grosso é moldado por seu domínio agrícola e exploração de combustíveis alternativos, como biodiesel e gás natural liquefeito (GNL) (Camargo et al., 2018).

## Conclusão

Os resultados deste estudo evidenciam relações fundamentais entre as dimensões energética, ambiental e social na Amazônia Legal, revelando como gestão dos sistemas energéticos regionais impactam diretamente a sustentabilidade. A forte associação entre as emissões de CO<sub>2</sub>, a demanda energética, o crescimento populacional, capacidade e produção instalada demonstra que a expansão da infraestrutura energética, quando orientada por matrizes fósseis, intensifica os impactos ambientais, sobretudo nas regiões mais populosas e economicamente dinâmicas. A correlação inversa entre a participação de fontes fósseis e renováveis nas matrizes elétrica e energética explicita a existência de dois modelos energéticos contrastantes: um centrado em fontes renováveis, geralmente mais diversificado

e ambientalmente responsável; outro ainda pautado na queima de combustíveis fósseis, mais vulnerável a oscilações externas e com maior impacto climático.

O percentual de domicílios com acesso a combustíveis limpos, por sua vez, apresentou uma correlação positiva com a presença de fontes fósseis e negativa com as renováveis, evidenciando a permanência de barreiras estruturais à adoção de tecnologias energéticas sustentáveis no uso residencial. Ainda que controversa, esse cenário revela que a infraestrutura logística e a distribuição seguem favorecendo as fontes convencionais, o que exige políticas públicas voltadas à universalização de soluções renováveis, seguras e acessíveis. A correlação positiva entre PIB per capita e acesso a combustíveis limpos reforça a necessidade de integrar a agenda energética à política social e ao desenvolvimento regional.

A análise multivariada permitiu identificar cinco perfis regionais distintos. Estados como Mato Grosso e Maranhão apresentam matrizes mais diversificadas, com forte presença de fontes renováveis, incluindo solar e eólica, e maior equilíbrio entre oferta e produção. Em contrapartida, estados como Acre, Roraima e Amapá apresentam estrutura limitada e baixa diversificação, refletindo vulnerabilidades logísticas e limitações históricas de investimento. Pará e Rondônia concentram grandes volumes de energia, mas com predomínio quase exclusivo da fonte hidráulica, o que, embora renovável, os torna estruturalmente dependentes e expostos a variações hidrológicas. Já o Amazonas destaca-se como um produtor com forte dependência de fontes fósseis, contrastando com os esforços globais de descarbonização. Essa dependência é agravada pelo avanço das discussões sobre a exploração de petróleo na Margem Equatorial, cuja localização próxima à foz do rio Amazonas implica riscos ambientais significativos.

Diante disso, o estudo indica que a construção de um sistema energético sustentável requer estratégias territorializadas, capazes de reconhecer as especificidades e desigualdades regionais. Assim, a Amazônia Legal abriga realidades energéticas contrastantes, que exigem políticas públicas diferenciadas, orientadas não apenas pela ampliação da oferta, mas está fortemente associada à sua origem, ao seu uso final e aos impactos sociais e ambientais.

Fortalecer a transição energética nos estados com baixa diversificação, apoiar soluções descentralizadas e investir na integração de fontes renováveis emergem como caminhos estratégicos para um futuro mais justo, resiliente e ambientalmente equilibrado na região. A transição energética na Amazônia exige, portanto, uma visão sistêmica, pautada em justiça territorial, inovação tecnológica e inclusão social.

## Declaração de disponibilidade de dados

O conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste artigo está disponível no SciELO DATA e pode ser acessado em <https://doi.org/10.48331/SCIELODATA.RZJ51H>.

## Referências

Abbasi, K. R., Shahbaz, M., Zhang, J., Irfan, M., & Alvarado, R. (2022). Analyze the environmental sustainability factors of China: The role of fossil fuel energy and renewable energy. *Renewable Energy*, 187, 390-402.

Abbasi, M. H., Abdullah, B., Castaño-Rosa, R., Ahmad, M. W., & Rostami, A. (2023). A Framework to Identify and Prioritise the Key Sustainability Indicators: Assessment of Heating Systems in the Built Environment. *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4308381>

Aguiar, E. S. D., Ribeiro, M. M., Viana, J. H., & Pontes, A. N. (2021). Panorama da disposição de resíduos sólidos urbanos e sua relação com os impactos socioambientais em estados da Amazônia brasileira. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 13, e20190263.

Arias, M. E., Farinosi, F., Lee, E., Livino, A., Briscoe, J., & Moorcroft, P. R. (2020). Impacts of climate change and deforestation on hydropower planning in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, 3(6), 430-436.

Arias-Gaviria, J., Arango-Aramburo, S., & Lamadrid, A. (2022). The effects of high penetrations of renewable energy sources in cycles for electricity markets: An experimental analysis. *Energy Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113014>

ATKINS, Ed. Contesting the 'greening' of hydropower in the Brazilian Amazon. *Political Geography*, v. 80, p. 102179, 2020.

Bandeira, F. J. S., Ribeiro Junior, J. R. S., Mesquita, A. L. A., Mesquita, A. L. A., & Torres, E. A. (2023). Potential use of palm oil and cocoa waste biomasses as sources of energy generation by gasification system in the state of Pará, Brazil. *Engenharia Agrícola*. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v43nepe20220151/2023>

Beyza, J., & Yusta, J. M. (2021). The effects of the high penetration of renewable energies on the reliability and vulnerability of interconnected electric power systems. *Reliability Engineering & System Safety*. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2021.107881>

Biernacka, M. (2022). Gestão ambiental de municípios do Brejo paraibano: Um modelo de gestão regional para o desenvolvimento sustentável. <https://doi.org/10.58203/licuri.839217>

Bodjongo, M. J. M., Ekome, G. C. E., & Epse Essomme, F. K. O. (2021). Analysis of the gap in enterprise access to renewable energy between rural and urban areas in Cameroon. *Environmental Economics*, 12(1), 39.

Anthony Jr, B. (2024). The role of community engagement in urban innovation towards the co-creation of smart sustainable cities. *Journal of the Knowledge Economy*, 15(1), 1592-1624.

Brunoro, G. R., & Cavalcante, M. M. D. A. (2024). Geografia do setor hidrelétrico e contradições socioambientais com a 2ª aproximação do Zoneamento Socioeconômico Ecológico do estado de Rondônia. *Geographia Opportuno Tempore*. <https://doi.org/10.5433/got.2024.v10.49669>

Camargo, F. H., Silveira, T. H. R., Shitsuka, R., & Silva, P. C. D. (2018). Estudo da Viabilidade da Aplicação da Energia Geotérmica como Fonte Complementar da Matriz Energética do Estado do Mato Grosso. *Research, Society and Development*. <https://doi.org/10.33448/RSD-V8I1.773>

Carvalho, B. do N., & Gomes, A. L. (2022). Setor energético do Mato Grosso e suas interações com o resto do Brasil: uma análise via Insumo-Produto. *Economia & Região*, 10(2), 95-114. <https://doi.org/10.5433/2317-627x.2022v10n2p95>

Castelao, R. A., de Souza, C. C., & Frainer, D. M. (2021). Southern Mato Grosso state (Brazil) productive system and its impact on emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/S10668-020-00760-8>

Castro, C. P. (2021). Hydropower and the geopolitics of renewable energies in the Amazon Basin. *Ambiente & Sociedade*, 24, e01291.

- Catolico, A. C. C., Maestrini, M., Strauch, J. C. M., Strauch, J. C. M., Giusti, F., & Hunt, J. (2021). Socioeconomic impacts of large hydroelectric power plants in Brazil: A synthetic control assessment of Estreito hydro-power plant. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111508>
- Costa, J. S. D. S., & Borges, W. L. (2022). Caracterização dos municípios do estado do amapá, amazônia oriental brasileira, quanto às diferenças nos níveis de desenvolvimento. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*. <https://doi.org/10.54399/rbgdr.v18i1.5094>
- Cristello, J. B., Yang, J. M., Hugo, R., Lee, Y., & Park, S. S. (2023). Feasibility analysis of blending hydrogen into natural gas networks. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.156>
- Czizeweski, A., Pimenta, F. M., & Saavedra, O. R. (2020). Numerical modeling of Maranhão Gulf tidal circulation and power density distribution. *Ocean Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/S10236-020-01354-8>
- Dasí-Crespo, D., Roldán-Blay, C., Escrivá-Escrivá, G., & Roldán-Porta, C. (2023). Integration of renewable resources into the electricity energy matrix. Practical case applied to a small rural municipality. *Renewable Energy & Power Quality Journal*. <https://doi.org/10.24084/repqj21.244>
- Deliza, E. E. V., de Almeida, F. M., Filho, F. de S. P., Calderaro, I. F. N., Arenhardt, V., & da Silva, D. G. (2020). Scenarios and Expansion perspectives for Small Hydropower Plants (SHPS) in the State of Rondônia (Brazil). *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 7(3), 131–138. <https://doi.org/10.22161/IJAERS.73.22>
- Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional (BEN) – relatório final. Rio de Janeiro, 2021. 292 p. Disponível em . Acesso em: 18 jun.2021.
- Ferreira, D. S., Ríos, E. M., & Freire, R. S. (2023). PCA para grandes bases de dados: Um tutorial aplicado. *Química Nova*, 46(7), 1050–1063.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (s.d.). ODS 7 - Energia acessível e limpa. Recuperado em 29 de janeiro de 2025, de <https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html>
- Kashif, M., Ali, M., Muaaz, S. H., Rafique, A., Nafees, I., Anwar, R., & Ilma. (2023). Indigenous Strategies to Building Climate-Resilient Communities: A Case Study of Majuli Island and Chehni Kothi Village. In *Indigenous Knowledge and Disaster Risk Reduction: Insight Towards Perception, Response, Adaptation and Sustainability* (pp. 567-604). Cham: Springer International Publishing.
- Khan, Z., Ali, A., Rizwan, M., & Imran, M. A. (2024). Economic Growth, Access to Clean Fuels & Technologies for Cooking, and Renewable Energy Consumption: Case of South Asian Economies. *iRASD Journal of Energy & Environment*, 5(1), 12–23. <https://doi.org/10.52131/jee.2024.0501.0042>
- Kumar, S., & Rathore, K. (2023). Renewable energy for sustainable development goal of clean and affordable energy. *International Journal of Materials Manufacturing and Sustainable Technologies*, 2(1), 1-15.
- Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., & Garrote, L. (2019). Influence of hydrologically based environmental flow methods on flow alteration and energy production in a run-of-river hydropower plant. *Journal of Cleaner Production*, 232, 1028-1042.

- Liu, Y., Xie, X., & Wang, M. (2023). Energy structure and carbon emission: Analysis against the background of the current energy crisis in the EU. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128129>
- Lomba, R. M., Schweitzer, A. F., & Porto, J. L. R. (2020). Ordenamento territorial e conflitos por terra no Amapá – Amazônia – Brasil. *Redes*. <https://doi.org/10.17058/REDES.V25I4.15214>
- Londres, M., Salk, C., Andersson, K. P., Tengö, M., Brondizio, E. S., Lopes, G. R., ... & Tourne, D. C. (2023). Place-based solutions for global social-ecological dilemmas: An analysis of locally grounded, diversified, and cross-scalar initiatives in the Amazon. *Global Environmental Change*, 82, 102718.
- Lozer dos Reis, M. M., Mazetto, B. M., & Malateaux da Silva, E. C. (2021). Economic analysis for implantation of an offshore wind farm in the Brazilian coast. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2020.100955>
- Mariosa, D. F., de Benedicto, G. C., & Sugahara, C. R. (2019). Study on the sustainable indicators and research methodology in the context of the sustainable development reserve of TUPÉ, AMAZONAS-BRAZIL. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade: GeAS*, 8(3), 3.
- Mataveli, G. A. V., Oliveira, G. de, Seixas, H. T., Pereira, G., Stark, S. C., Gatti, L. V., Basso, L. S., Tejada, G., Cassol, H. L. G., Anderson, L. O., & Aragão, L. E. O. C. (2021). Relationship between Biomass Burning Emissions and Deforestation in Amazonia over the Last Two Decades. *Forests*, 12(9), 1217. <https://doi.org/10.3390/F12091217>
- Ministério de Minas e Energia. (s.d.). SIE Brasil – Sistema de Informações Energéticas. Recuperado em 23 de abril de 2024, de <https://www.mme.gov.br/SIEBRASIL/>
- Muniz, R. N., de Sá, J. A. S., da Rocha, B. R. P., & da Costa, C. T. (2023). A new brazilian amazon energy sustainability index based on fuzzy systems. <https://doi.org/10.3233/jifs-235750>
- Natividade, L. E., & Benalcazar, P. (2023). Hybrid Renewable Energy Systems for Sustainable Rural Development: Perspectives and Challenges in Energy Systems Modeling. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16031328>
- Ninno Muniz, R., Frizzo Stefenon, S., Gouvêa Buratto, W., Nied, A., Meyer, L. H., Finardi, E. C., ... & Ramati Pereira da Rocha, B. (2020). Tools for measuring energy sustainability: A comparative review. *Energies*, 13(9), 2366.
- Novas, N., Garcia, R. M., Camacho, J. M., & Alcayde, A. (2021). Advances in solar energy towards efficient and sustainable energy. *Sustainability*, 13(11), 6295.
- Oak, H. (2023). Trends in energy consumption and emissions in brics: analyzing the data and the factors affecting energy efficiency. *International Journal of Social Science and Economic Research*. <https://doi.org/10.46609/ijsser.2023.v08i01.004>
- Oliveira, R. A. de, Paes-de-Souza, M., Menéndez Rodríguez, T. D., & Paes, D. C. A. de S. (2020). Policy and development in the legal amazon: analysis of indicators using the barometer of sustainability ## política e desenvolvimento na amazônia legal: análise de indicadores usando o barômetro de sustentabilidade. <https://doi.org/10.17648/AOS.V8I2.2012>

- Passos, G. P., Costa, H. K. de M., & Santos, E. M. D. (2024). Analysis of the Impacts of Small-Scale LNG Projects for Energy Supply of the North Region of Brazil: The Case of Roraima. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16052178>
- Peyerl, D., Cachola, C. da S., Alves, V. H., Mondragon, M., Macedo, S. F., Guichet, X., & dos Santos, E. M. (2022). Applying small-scale liquefied natural gas supply chain by fluvial transport in the isolated systems: The case study of Amazonas, Brazil. *Energy for Sustainable Development*, 68, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.03.010>
- Pokhriyal, N., Letouzé, E., & Vosoughi, S. (2022). Accurate intercensal estimates of energy access to track Sustainable Development Goal 7. *EPJ Data Science*. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-022-00371-5>
- RAZMJOO, Armin et al. A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO<sub>2</sub> emissions in a high potential area. *Renewable Energy*, v. 164, p. 46-57, 2021.
- Santos, M. A., Lopes, M. L. L., Demajorovic, J., Costa, N. L., & Martins, C. M. (2023). Conhecimento e senso de pertencimento territorial como indicadores de capital social em um município com economia de base mineral na Amazônia brasileira. *GeSec*. <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i3.1842>.
- Scharf, F., Widmann, A., Bonmassar, C., & Wetzel, N. (2022). A tutorial on the use of temporal principal component analysis in developmental ERP research: Opportunities and challenges. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 54, 101072. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101072>
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Shah, S. A. A., Zhou, P., Walasai, G. D., & Mohsin, M. (2019). Energy security and environmental sustainability index of South Asian countries: A composite index approach. *Ecological Indicators*, 106, 105507.
- Silvestre, R. P., Silva, F. S., Zonin, W. J., & Fontana, R. de F. (2022). Os suruí de rondônia: resistência e protagonismo em busca do desenvolvimento sustentável. *International Journal of Environmental Resilience Research and Science*. <https://doi.org/10.48075/ijerrs.v4i2.28158>
- Šimová, I., Ordoñez, A., & Storch, D. (2023). The dynamics of the diversity–energy relationship during the last 21,000years. *Global Ecology and Biogeography*, 32(5), 707–718. <https://doi.org/10.1111/geb.13649>
- Singh, U. (2023). The role of hosting capacity study in power system advancements: a review. *arXiv.Org*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.04765>
- Somoye, O. A., Ozdeser, H., Seraj, M., & Turuc, F. (2023). The determinants of CO<sub>2</sub> emissions in Brazil: The application of the STIRPAT model. *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2251921>
- Stefenon, S., & Nied, A. (2019). FEM Applied to Evaluation of the Influence of Electric Field on Design of the Stator Slots in PMSM. *IEEE Latin America Transactions*, 17(04), 590-596.
- Tolstaya, S. M. (2022). Energy transition and diversification: A pathway to achieve sustainable development goals (SDGs) in Brazil. *Energy*, 239, 122199. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122199>

Xue, Y., Jiang, F., Liu, Y., Yuan, J., Dou, W., & Wei, C. (2022, May 19). Optimal Capacity Allocation of Integrated Energy Systems Considering Renewable Energy Accommodation. *IEEE International Conference on Electro/Information Technology*. <https://doi.org/10.1109/eit53891.2022.9814037>

Zahoor, Z., Khan, I., & Hou, F. (2022). Clean energy investment and financial development as determinants of environment and sustainable economic growth: evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11), 16006-16016.

Zarco-Periñán, P. J., Zarco-Soto, I. M., & Zarco-Soto, Fco. J. (2021). Influence of Population Density on CO2 Emissions Eliminating the Influence of Climate. *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12091193>

Zhou, S., Gao, X., Wellstead, A. M., & Kim, D. M. (2023). Operationalizing social equity in public policy design: A comparative analysis of solar equity policies in the United States. *Policy Studies Journal*, 51(4), 741-772.

Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., & Kalogirou, S. (2020). Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable energy*, 146, 2430-2437.

---

**Editor responsável:** Luciene Pimentel da Silva

**Recebido:** 29-Aug-2025

**Aprovado:** 26-jan.-2026