

PARA UMA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA SOCIOAMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL: LIÇÕES DE UM EXPERIMENTO NO SEMIÁRIDO NORDESTINO^{1,2,3}

Marcel Bursztyn⁴

Wesly Jean⁵

Juliana Dalboni Rocha⁶

Daniela Nogueira⁷

Diego Lindoso⁸

A matriz elétrica brasileira sempre foi caracterizada pelo seu caráter limpo, já que tem como base essencialmente a geração a partir do aproveitamento do potencial hidráulico. Entretanto, diante da crise climática e de frequentes momentos de escassez hídrica, tem havido uma crescente utilização de energia gerada a partir de fontes fósseis e da biomassa, que geram maior efeito estufa. O artigo questiona até que ponto o sistema elétrico brasileiro é, de fato, renovável, limpo e socialmente justo. Um experimento de geração de energia solar com famílias de agricultores familiares no Semiárido nordestino é apresentado como possível modelo para uma adaptação da matriz energética, com base nas seguranças hídrica, energética, alimentar e socioambiental de populações vulneráveis. Lições tiradas do experimento apontam para o imperativo da integração de ações governamentais, que geralmente se dão de forma fragmentada e, por vezes, contraditória.

Palavras-chave: transição energética; energia solar; empreendedorismo; agricultura familiar; Semiárido nordestino.

TOWARDS A SOCIO-ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE ENERGY TRANSITION: LESSONS FROM AN EXPERIMENT IN THE BRAZILIAN NORTHEAST SEMI-ARID REGION

The Brazilian electricity system has always been considered as clean, since it is essentially based on generation from the use of hydraulic potential. However, in view of the climate crisis and frequent instances of water scarcity, there has been an increasing reliance on power stations that use fossil fuels and biomass, which have a higher greenhouse effect. The article questions the extent to which the Brazilian electricity system is, in fact, renewable, clean, and socially fair. An experiment with families of small farmers, based on the generation of solar energy, in the semi-arid northeast region,

1. DOI: <https://dx.doi.org/10.38116/ppp71art8>.

2. Esta edição da revista PPP atende à chamada temática de 2024, que recepcionou artigos submetidos até junho de 2025. A enumeração da edição segue a ordem original da revista, referente ao último período de 2024.

3. Este trabalho teve o apoio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Observatório das Dinâmicas Socioambientais (INCT-Odisseia): Sustentabilidade e adaptação às mudanças climáticas, ambientais e demográficas (chamada INCT – MCTI/CNPq/Capes/FAPs nº 16/2014). Também teve o apoio da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede Clima).

4. Professor titular no Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília (CDS/UnB).

5. Pesquisador colaborador pleno no Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

6. Professora visitante no Departamento de Engenharia de Energia da UnB, *campus* Gama.

7. Pesquisadora colaboradora no CDS/UnB.

8. Professor adjunto no CDS/UnB.

is presented as a possible model for adapting the energy grid, based on the water, energy, food, and socio-environmental securities of vulnerable populations. Lessons learned from the experiment suggest integrating government actions, which are generally carried out in a fragmented and, at times, contradictory manner.

Keywords: energy transition; solar energy; entrepreneurship; family farming; Brazilian semi-arid northeast.

HACIA UNA TRANSICIÓN ENERGÉTICA SOCIOAMBIENTALMENTE SOSTENIBLE: LECCIONES DE UN EXPERIMENTO EN LA REGIÓN SEMIÁRIDA DEL NORDESTE BRASILEÑO

El sistema eléctrico brasileño siempre ha sido considerado limpio, ya que se basa esencialmente en la generación a partir del uso del potencial hidráulico. Sin embargo, ante la crisis climática y los frecuentes episodios de escasez hídrica, se ha observado un uso creciente de energía térmica con uso de combustibles fósiles y biomasa, que tienen un mayor efecto invernadero. El artículo cuestiona hasta qué punto el sistema eléctrico brasileño es, de hecho, renovable, limpio y socialmente justo. Se presenta un experimento con familias de pequeños agricultores, basado en la generación de energía solar, en la región semiárida del nordeste, como un posible modelo para la adaptación de la matriz energética, considerando las seguridades hídrica, energética, alimentaria y socioambiental de las poblaciones vulnerables. Las lecciones aprendidas del experimento sugieren la integración de las acciones gubernamentales, que generalmente se llevan a cabo de manera fragmentada y, en ocasiones, contradictoria.

Palabras clave: transición energética; energía solar; emprendimiento; agricultura familiar; nordeste semiárido brasileño.

JEL: Q01; Q42; Z18.

1 INTRODUÇÃO

Há cerca de 250 anos, a Grã-Bretanha foi o berço da Revolução Industrial. Um dos pilares daquele processo foi o uso intensivo da energia a vapor obtida pela queima de combustível fóssil (carvão) e o aproveitamento da força motriz dos cursos d'água.

Do ponto de vista das transformações socioeconômicas foi, de fato, uma revolução: mudou o nível de produtividade do trabalho humano, mudaram as relações sociais de produção, mudaram os mercados, a demografia e os sistemas políticos. E mudou também o grau de apropriação dos recursos naturais pela humanidade (Polanyi, 2011). Não por acaso, ao tratarmos hoje das mudanças climáticas, sempre nos referimos aos padrões de temperatura e aos níveis de emissão de carbono na atmosfera comparativamente à era pré-industrial.

Em setembro de 2024, o Reino Unido anunciou um evento de grande significado simbólico: a desativação de sua última usina termelétrica a carvão. Um ciclo se fechou.⁹ O carvão passou de importante vantagem comparativa da industrialização inglesa e pilar do desenvolvimento à condição de um dos vilões

9. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/videos/c98ye7ewwlwo>. Acesso em: 6 jun. 2025.

do aquecimento global e de todas as suas consequências negativas. O carvão, como base energética do nascimento da industrialização moderna, se tornou uma fonte indesejada. Uma grande lição deste fato é a confirmação de que as tecnologias têm um ciclo de vida; mesmo que surjam como panaceia, podem se tornar obsoletas e até nocivas, e serem substituídas por novas soluções.

O exemplo britânico, ao encerrar o ciclo do carvão na produção de energia, traz à luz uma reflexão: será que a outra fonte energética da Revolução Industrial – a hidráulica – não deve também ser repensada, diante dos desafios das mudanças no clima e dos impactos socioambientais que provoca?

A respeito do caráter renovável, realmente os recursos hídricos são um atributo natural com tais características, mas os recentes episódios de extremos climáticos têm mostrado que o seu fluxo e a sua disponibilidade vêm registrando frequentes crises.¹⁰ Eventos de enchentes e de estiagem representam instabilidade do sistema. Enchentes provocam prejuízos materiais e humanos. As secas têm sido recorrentes e são compensadas com o acionamento de usinas termelétricas, que utilizam combustível fóssil ou biomassa. Isso leva a dois efeitos: uma maior emissão de carbono (o que compromete o caráter limpo da matriz energética) e um custo mais elevado, que é transferido a quem consome energia (o que compromete o argumento de que a hidroeletricidade é barata).

O presente artigo explora três aspectos que historicamente servem como vantagem comparativa da matriz energética brasileira: o caráter limpo, justo e renovável. Analisa-se o padrão recente de disponibilidade hídrica para a geração energética de forma sustentável, diante dos frequentes e intensos episódios de seca. Discute-se, também, se esse modelo é socialmente justo, no sentido de peso sobre o orçamento familiar dos usuários de menor nível de renda e dos impactos sobre populações, geralmente penalizando os mais vulneráveis.

Como estudo de caso, este artigo analisa a experiência do projeto LabSOLar+, implantado no assentamento Jacaré-Curitiba, em Sergipe, e também junto a famílias de pequenos agricultores em Alagoas, como uma iniciativa representativa de transição energética justa na região semiárida brasileira (Jean *et al.*, 2025). O experimento pode servir de referência para a transição rumo a uma matriz do sistema energético que seja, ao mesmo tempo: i) mais segura (do ponto de vista da continuidade); ii) mais limpa (do ponto de vista das emissões de gases de efeito estufa – GEE); iii) econômica (do ponto de vista dos custos incidentes sobre os usuários); iv) socialmente justa (do ponto de vista do peso que representa sobre o orçamento das famílias mais vulneráveis); e v) mais respeitosa dos direitos humanos, considerando as populações ribeirinhas originalmente residentes em locais de grandes obras hidráulicas.

10. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/01/201ca-era-dos-extremos-ja-chegou-ao-brasil201d-avalia-pesquisador-do-cemaden/nota-tecnica-cemaden-sei_mcti-12567552-sumario-2024.pdf. Acesso em: 6 jun. 2025

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a elaboração do presente artigo, que foi concebido como um ensaio, foram adotados diferentes passos.

A seção 3, que tem como foco a análise da matriz do sistema elétrico brasileiro, foi desenvolvida a partir da literatura e de bases de dados públicos disponíveis, que são citadas ao longo do texto. A consideração do caráter “limpo” do modelo hidrelétrico tem como fundamento aspectos como emissões diretas de carbono equivalente (por parte dos reservatórios das usinas) e indiretas (quando se leva em conta o fato de que a geração termelétrica é um componente do sistema cada vez mais presente).

Acerca do aspecto “justo”, foi utilizado o conceito de justiça energética (Carvalho, Gomes e Corazza, 2022), consagrado na literatura. Levou-se em consideração o aumento do acesso por parte de populações que até recentemente eram excluídas do sistema, assim como o ônus incidente sobre o contingente de atingidos por barragens, que têm seu modo de vida afetado.

A respeito do aspecto “renovável”, a análise partiu da evidência de que, sendo uma matriz historicamente baseada na geração hidrelétrica, tem como fonte um recurso natural inesgotável. Entretanto, diante das mudanças climáticas e do comprometimento da regularidade do regime de chuvas, o recurso a fontes complementares, como a queima de combustíveis fósseis e o uso da biomassa, comprometem tanto o caráter “limpo” quanto o argumento de que é renovável.

A seção 4, a qual trata dos dilemas do modelo energético brasileiro, que tem seu fundamento na geração hidrelétrica, foi desenvolvida com base em dados disponíveis em plataformas de acesso público e de literatura publicada em periódicos científicos. Fontes específicas de dados e procedimentos de cálculo das emissões são apresentados ao longo das análises.

A seção 5, que apresenta o estudo de caso do LabSOLar+, foi desenvolvida a partir de um experimento social implantado na região semiárida do nordeste brasileiro. O ponto de partida foi uma pesquisa do tipo *survey*, que foi aplicada a um universo de 109 famílias. Inicialmente prevista para ser implementada diretamente por membros da equipe do projeto, a operacionalização do levantamento (de caráter quali-quantitativo) foi devidamente adaptada em razão da pandemia da covid-19. Considerando a impossibilidade de participação presencial diante dos riscos à saúde dos pesquisadores e das famílias estudadas, optou-se pelo engajamento, como bolsistas, de membros da própria comunidade, que foram devidamente treinados remotamente. Essa contingência acabou se revelando muito positiva, na medida em que o próprio questionário, que havia sido previamente elaborado, passou por revisões que levaram em conta questões de interesse dos agricultores locais, que não haviam sido identificadas na formulação inicial e que foram sugeridas pelos “pesquisadores cidadãos”.

A quantidade de dióxido de carbono (CO₂) evitada anualmente a cada sistema fotovoltaico foi estimada a partir da geração elétrica anual de cada instalação, expressa em quilowatt-hora (kWh), multiplicada pelo fator de emissão médio de CO₂ referente aos últimos cinco anos (valor médio de 2019 até 2023) da matriz elétrica brasileira. Esse fator representa a média de emissões de CO₂ por unidade de energia gerada no país e permite quantificar, de forma clara e comparável, os benefícios ambientais da geração renovável em relação às fontes convencionais. Os dados utilizados foram obtidos no Sistema de Registro Nacional de Emissões (Sirene), mantido pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), que reúne e divulga informações oficiais e atualizadas sobre as emissões atmosféricas no Brasil.

Dessa forma, o cálculo não apenas avalia a eficiência energética dos sistemas solares, mas também evidencia seu impacto climático positivo, ao demonstrar a quantidade de GEE que deixam de ser emitidos na atmosfera, reforçando o papel estratégico da energia limpa na mitigação das mudanças climáticas e na construção de um futuro mais sustentável.

Como ferramentas conceituais e metodológicas, o estudo de caso se valeu de um conjunto de elementos, listados a seguir.

- 1) O conceito de estudo de caso, com a pretensão de servir de estudo de exemplo, útil para orientar decisões de política pública.
- 2) A noção de experimento social, que pressupõe o envolvimento das pessoas em uma ação de pesquisa, de modo a entender comportamentos e reações diante de situações que envolvem a própria dinâmica de funcionamento de grupos sociais específicos.
- 3) A organização das pessoas envolvidas (atores locais, pesquisadores e operadores de ações e políticas públicas) em torno de um “observatório cidadão” (Tonneau *et al.*, 2017), que envolve diferentes categorias de atores sociais que participam como sujeitos do processo de pesquisa.
- 4) A coconstrução de conhecimentos, na qual atores que se encontram fora do mundo acadêmico têm participação ativa e não hierarquizada no processo de aprendizado e socialização de resultados (Coudel *et al.*, 2022).
- 5) A abordagem transdisciplinar que envolve interdisciplinaridade, interinstitucionalidade e intersetorialidade de atores envolvidos (Bursztyrn e Purushothaman, 2022).

3 UM MODELO ELÉTRICO LIMPO, JUSTO E RENOVÁVEL?

O legado da era do carvão – e dos combustíveis fósseis como um todo – é crítico. Segundo dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), a temperatura da superfície do planeta atingiu 1,1 °C acima dos níveis de 1850-1900 entre 2011 e 2020. Os efeitos dessa mudança já são bem perceptíveis: os eventos climáticos extremos estão cada vez mais frequentes e mais intensos. As projeções climáticas e alertas de riscos no longo prazo estão se revelando cada vez mais graves e iminentes. O longo prazo está ficando mais curto. Mas a boa notícia é que ainda podemos reduzir boa parte dos efeitos deletérios das mudanças climáticas com ações como a utilização de novas fontes de energia mais limpas e economicamente competitivas.

Diferentemente, por exemplo, dos Estados Unidos, que dispunham de grandes reservas de carvão mineral, o Brasil não teve um amplo processo de industrialização no século XIX (Furtado, 1976). A infraestrutura energética brasileira remonta ao final dos anos 1800 e se valeu de seu potencial hídrico para a produção de energia. Sempre se considerou tal modelo energético como limpo e renovável. Ao acionar turbinas, o fluxo de água não gera poluição ou emissões de carbono. Rios são alimentados por fontes e afluentes cujo fluxo varia ao longo do ano, mas sempre se renovam. Entretanto, hoje sabemos que há outros parâmetros a serem considerados para qualificar um padrão do sistema elétrico como limpo e para mensurar em que medida é mesmo renovável e seguro.

O caráter limpo da geração hidrelétrica brasileira é justificado pelo fato de que, diferentemente da energia termelétrica, por exemplo, não há queima de combustível fóssil ou mesmo de biocombustível. Mas há que se ter em conta que as grandes represas construídas para a geração de hidroeletricidade sobre as áreas em que a cobertura vegetal original é alagada geralmente implicam emissões de metano, que é um gás com elevado padrão de emissões que geram efeito estufa. Ademais, os grandes barramentos e lagos têm consequências ecológicas e socioambientais, tanto pela mudança no ecossistema aquático e terrestre quanto em decorrência do reassentamento de populações originariamente residentes no local. Há impactos negativos sobre os seus modos de vida, as suas raízes culturais e a sua relação com o ambiente.

3.1 A matriz elétrica brasileira é limpa?

A energia hidrelétrica é comumente apresentada como ambientalmente “limpa” (Collier, 2004; Mussa, Teka e Ayicho, 2018; With hydropower [...], 2022). Entretanto, a qualificação como “limpa” deve ser, no mínimo, relativizada, já que a emissão de carbono não é zero. A principal fonte de GEE das hidrelétricas provém da decomposição da vegetação submersa e localizada nas margens da área inundada pela construção dos grandes reservatórios, com destaque para a liberação de metano (CH₄) – Fearnside (2016).

Ainda assim, considerando todo o ciclo de vida, a produção de energia hidrelétrica é bem menos intensiva em emissões de carbono (entre 6 e 147 gCO₂e/KWh) quando comparada àquela produzida em termelétricas de base fóssil, como as movidas a gás natural (entre 403 e 513 gCO₂e/KWh) e a carvão (entre 751 e 1.095 gCO₂e/KWh) (IAEA, 2022). A expressiva participação de fontes renováveis (90%) na geração da eletricidade nacional coloca o Brasil em uma posição favorável nos esforços de mitigação do setor energético, e as hidroelétricas representam cerca de 60% dessa produção (Brasil, 2025). No contexto global, o Brasil aparece com a nona matriz elétrica menos intensiva em carbono, tendo apresentado, em 2023, um fator de emissão de 98 gCO₂e/KWh, valor substancialmente abaixo das médias dos países latino-americanos (259 gCO₂e/KWh) e mundial (481 gCO₂e/KWh) – Energy Institute (2024).¹¹

A relativamente baixa intensidade de carbono é um critério comumente usado para apresentar a hidroeletricidade como fonte limpa e sustentável. Mas esse aspecto não elimina os dilemas representados pelos conflitos e impactos socioambientais na escala local e regional, que frequentemente acompanham a construção do reservatório das hidrelétricas (Fearnside, 2016). Desde que passaram a vigorar legislações que determinam a obrigatoriedade de estudos de impacto ambiental de grandes obras hidráulicas no Brasil (a partir dos anos 1980), tornou-se evidente que tais empreendimentos são geradores de danos consideráveis à biodiversidade e ao ambiente natural em geral.

3.2 O modelo elétrico brasileiro é justo?

A análise da justiça energética (Carvalho, Gomes e Corazza, 2022) tem várias dimensões. A primeira delas considera a perspectiva do acesso. Ao cumprir vinte anos, o programa governamental Luz para Todos (PLT), lançado em 2003, já havia beneficiado uma população de 17 milhões de pessoas, boa parte delas vivendo no meio rural.¹² Sua implementação é um caso de sucesso, já que praticamente universalizou (99,8%) o atendimento no Brasil.¹³

Entretanto, o acesso não se restringe apenas a uma questão de oferta e infraestrutura. Também envolve a acessibilidade econômica, representada no custo da energia para o consumidor, que recai de forma desproporcional sobre as famílias socioeconomicamente vulnerabilizadas. Pesquisa realizada em 2024 pelo Instituto Pólis, em parceria com o Instituto Clima e Sociedade (ICS),¹⁴ indica que 30% dos brasileiros deixaram de comprar alimentos básicos para garantir energia em casa.

11. Veja também Ember, Yearly Electricity Data, 2024. Disponível em: <https://ember-energy.org/data/yearly-electricity-data/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

12. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/luz-para-todos-completa-20-anos-com-impacto-positivo-para-17-milhoes-de-pessoas>. Acesso em: 13 abr. 2025.

13. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/luz-para-todos-e-considerado-exemplo-de-universalizacao-da-energia>. Acesso em: 6 jun. 2025.

14. Disponível em: <https://climaesociedade.org/30-dos-brasileiros-mais-pobres-deixam-de-comprar-comida-para-pagar-luz/>. Acesso em: 6 jun. 2025.

Como será discutido mais adiante, a irregularidade da oferta de energia hidráulica, em função da irregularidade do regime de chuvas, normalmente é compensada pelo acionamento das termelétricas, o que encarece o custo da produção de eletricidade, o qual, por sua vez, é repassado ao consumidor, pesando sobremaneira no bolso das populações mais pobres.

Uma segunda dimensão da análise da justiça energética é a distribuição dos impactos da construção da infraestrutura de produção e distribuição da eletricidade. Os impactos da construção dos reservatórios das hidroelétricas são de especial interesse ao presente trabalho. Bermann (2007) lista uma série de externalidades socioambientais negativas associadas: i) surgimento e agravamento de conflitos pelo uso da água; ii) problemas de saúde pública decorrentes da piora da qualidade da água e da formação de ambientes propícios à proliferação de doenças; iii) sismos pelo sobrepeso da coluna de água do reservatório sobre o solo; e iv) alteração do regime hidrológico de rios, afetando a dinâmica social à jusante e à montante das barragens.

Os impactos ecossistêmicos e para a biodiversidade transcendem a escala do reservatório, interferindo na conectividade ecológica e fragmentação de habitats pelo barramento, e alterando o ciclo de cheias e vazantes, determinantes na ecologia de diversas comunidades aquáticas e de várzea (Wu *et al.*, 2019).

O Movimento de Atingidos por Barragens (MAB) estimou que 1 milhão de pessoas foram desalojadas e 3,4 milhões de hectares de terras produtivas foram perdidos no Brasil em razão dessas obras de engenharia (Nobrega, 2011). Cidades, florestas e terras produtivas foram inundadas. Identidades e patrimônios culturais foram transformados pela perda territorial e pelo deslocamento de populações.

3.3 A matriz elétrica brasileira é renovável?

Tecnicamente a hidroeletricidade é um recurso renovável. Mas a sua dependência do regime de chuvas torna a produção de energia hidráulica vulnerável a eventos prolongados de seca. Na prática, a pergunta que emerge nesse contexto é: o seu aproveitamento para a geração de energia hidrelétrica é suficiente frente à demanda crescente por eletricidade e a cenários de mudança do clima?

Embora o Brasil seja um dos maiores detentores de água doce do planeta, com cerca de 12% do recurso disponível mundialmente e 53% na América do Sul, a distribuição dessa água é altamente desigual (Chiquito *et al.*, 2021). Os dados hidrológicos históricos no Brasil mostram que a superfície coberta por água no país foi reduzida em quase 16% desde o início de 1990 (Tomasella, Cunha e Marengo, 2024).

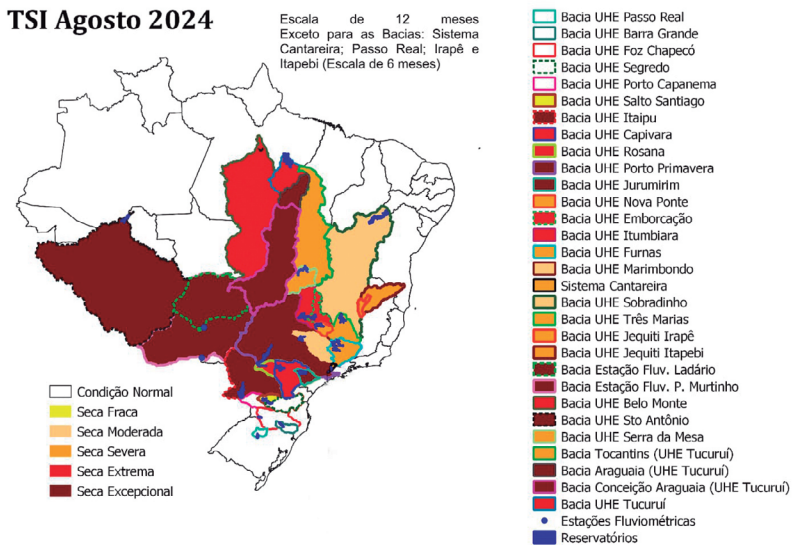
Na última década, eventos extremos, como secas prolongadas e enchentes devastadoras, se tornaram mais frequentes e intensos, estando intrinsecamente ligados às mudanças climáticas e refletindo um quadro de irregularidade climática que afeta a disponibilidade de recursos naturais essenciais (Getirana, Libonati e Cataldi, 2021; Marengo, Torres e Alves, 2017; Nobre *et al.*, 2016; Jasechko *et al.*, 2024; Yao *et al.*, 2023).

Em 2001, após uma sequência de anos mais secos, os principais reservatórios chegaram a níveis excepcionalmente baixos. O sistema de produção elétrica nacional chegou próximo ao colapso, cenário que foi evitado por um conjunto de medidas, entre as quais algumas drásticas, como o racionamento de energia elétrica (Carreno, Sanches e Padilha-Feltrin, 2006).

Em 2021, uma nova sequência de anos mais secos levou à depleção dos reservatórios a níveis críticos e à consequente queda na produção de energia hidrelétrica. A título de comparação, entre 2014 e 2023, as hidrelétricas responderam, em média, por 62% da eletricidade produzida no Brasil. Em 2021, essa participação caiu para 55% (Brasil, 2025).

Em 2023 e 2024, a região Amazônica registrou uma sequência de recordes de mínimos no nível do rio Negro (porto de Manaus). Em outubro de 2023, chegou a um mínimo histórico de 12,70 m; e em outubro de 2024, chegou à marca de 12,11 m.¹⁵ A seca na Amazônia foi a manifestação de um contexto mais amplo de seca hidrológica, como pode ser observado na figura 1.

FIGURA 1
Impacto da seca nos recursos hídricos no território brasileiro (levantamento dos reservatórios), mostrada para diferentes bacias hidrográficas de acordo com o Índice Padronizado Bivariado precipitação-vazão (ago. 2025)



Fonte: Cemaden (2024). Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br>. Acesso em: 7 abr. 2025.

Obs.: Ilustração reproduzida conforme o original (nota do Editorial).

15. Confira a base de dados Porto de Manaus, o coração da Amazônia. Disponível em: <https://portodemanaus.com.br/nivel-do-rio-negro/>. Acesso em: 6 jun. 2025.

A seca extrema de 2024 é um reflexo das mudanças climáticas, intensificadas pelo fenômeno climático natural El Niño (Clarke *et al.*, 2024). Em contrapartida, no mesmo ano, a região Sul do Brasil enfrentou chuvas extremas históricas, resultando em enchentes que afetaram mais de 580 mil pessoas no estado do Rio Grande do Sul, o que evidenciou a vulnerabilidade das populações às flutuações climáticas extremas (Brasil, 2024). A expectativa é de que o aumento da temperatura atmosférica e dos oceanos afete a circulação atmosférica e o padrão das chuvas, alterando a distribuição das chuvas nas diversas regiões brasileiras (Escobar, 2024; Brasil, 2023).

Adicionalmente ao impacto da mudança do clima na distribuição das chuvas, o caráter renovável da matriz hidroelétrica sofre pressão do aumento no consumo de eletricidade, associado ao crescimento demográfico e econômico. Entre 2014 e 2023, o consumo de eletricidade no país aumentou 12%. A Empresa de Pesquisa Energética (2024) projetou que o consumo total de eletricidade poderia aumentar entre 25-48% entre 2019 e 2030, um crescimento bastante expressivo.

No longo prazo, é esperado que mecanismos de retroalimentação entre a crise energética e a climática adicionem pressão extra ao sistema. Por exemplo, há uma expectativa de aumento no uso de ar-condicionado (um reflexo direto do aquecimento global). Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2018), as mais de 36 milhões de unidades de ar-condicionado no Brasil podem chegar a 160 milhões até 2050 – um crescimento aproximado de 350%. Isso resultará em uma demanda energética elevada que, nas condições atuais, só pode ser atendida com um aumento no uso de termelétricas que, como será discutido, são grandes emissoras de CO₂.

Ademais, há uma dimensão política subjacente às crises hídricas no Brasil, que se traduzem em diferentes visões setoriais sobre gestão das águas, com foco nos usos múltiplos (Lazaro *et al.*, 2023), evidentes na dificuldade de implementação do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Apesar de estabelecer diretrizes para a gestão sustentável das águas, o plano encontra obstáculos em razão dos conflitos de uso entre setores como o energético, o agrícola e o urbano. Em regiões como o Nordeste, onde a estiagem é historicamente mais severa e recorrente, soluções como a transposição das águas do rio São Francisco têm se mostrado insuficientes para resolver problemas estruturais de acesso à água.

Enfim, embora a matriz elétrica brasileira seja frequentemente classificada como renovável, essa definição demanda qualificações mais precisas quando examinada à luz dos desafios contemporâneos. A forte dependência da hidroeletricidade, ainda que tecnicamente baseada em um recurso renovável, mostra-se cada vez mais vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas, sobretudo diante da irregularidade crescente dos regimes hidrológicos. Além disso, os impactos socioambientais da construção de grandes reservatórios e as emissões significativas de metano, resultantes da decomposição

da matéria orgânica submersa, enfraquecem o argumento da hidroeletricidade como uma fonte inteiramente limpa e sustentável. Portanto, é possível afirmar que a matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável em termos formais, mas apresenta limitações estruturais e ambientais que comprometem sua resiliência e legitimidade como modelo sustentável e justo.

É nesse contexto que ganha relevância a ampliação de fontes renováveis alternativas, com destaque para a energia solar. O potencial solar do Brasil é um dos mais elevados do mundo, oferecendo uma fonte abundante, descentralizável e de baixa emissão, que pode contribuir decisivamente para a diversificação e descarbonização do sistema elétrico. Diferentemente das grandes hidrelétricas, a energia solar pode ser implementada em escala local, reduzindo os impactos socioambientais e ampliando o acesso justo à energia, sobretudo em regiões vulnerabilizadas. Os dados apresentados nesta seção corroboram diretamente a análise crítica apresentada na seção precedente: ao diagnosticar as fragilidades do atual modelo baseado quase exclusivamente na hidroeletricidade, justifica-se a urgência de uma transição energética pautada em alternativas realmente sustentáveis. A energia solar não apenas responde à necessidade de adaptação climática, mas também se apresenta como um vetor estratégico de justiça energética e desenvolvimento socioambiental equilibrado.

4 OS DILEMAS DO MODELO ELÉTRICO BRASILEIRO

A matriz elétrica brasileira enfrenta dilemas no contexto das mudanças demográfica e climática, que precisam ser mais bem integrados no debate e no planejamento. Por um lado, é inegável que a relevância da hidroenergia na matriz elétrica brasileira constitui um ativo no contexto da mitigação climática, conferindo ao país destaque mundial nos esforços de descarbonização do setor energético. Por outro lado, as crises hídricas recorrentes, e que tendem a se tornar mais frequentes com a mudança do clima, colocam em xeque a segurança energética do Brasil, explicitando um quadro de vulnerabilidade crescente ao longo do século XXI.

Diante da alta vulnerabilidade climática, é necessário investir na adaptação climática do sistema elétrico para lidar com a redução drástica nos níveis dos reservatórios. Entretanto, as estratégias de adaptação devem ser acompanhadas de uma avaliação cuidadosa das escolhas.

4.1 O paradoxo da adaptação com base em fonte fóssil

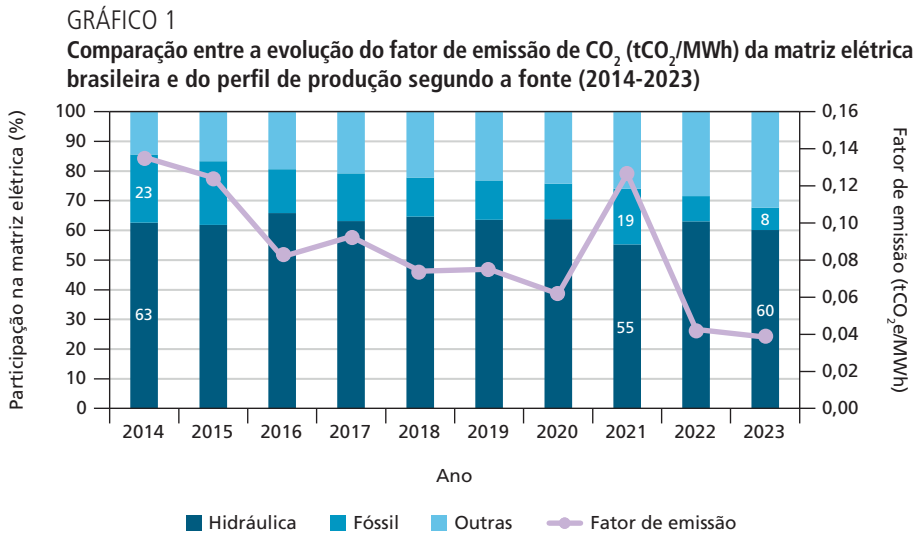
Atualmente a opção pelo acionamento de usinas termelétricas para assegurar a oferta energética em anos de baixa dos reservatórios enseja um dilema: ela aumenta substancialmente os custos energéticos e as emissões de dióxido de carbono. Originalmente o acionamento das termelétricas era pensado como uma medida de

contingência para o enfrentamento de episódios de seca extrema, dado o caráter dependente da matriz elétrica brasileira em relação às hidrelétricas. No entanto, nos últimos anos, essa estratégia, que era concebida como recurso a ser acionado nos raros momentos de escassez hídrica, mudou, impulsionada pela maior frequência de secas hidrológicas severas. As termelétricas são acionadas nos momentos de crise hídrica cada vez mais frequentes, especialmente nos períodos de maior demanda por energia, como nos meses mais quentes, que demandam maior refrigeração.

Um levantamento do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), de 2022, mostra a situação das usinas termelétricas no Brasil. A geração dessas usinas aumentou de 30,6 TWh, em 2000, para 84,8 TWh em 2020, triplicando em quase vinte anos. Para o período entre 2026 e 2030, há a previsão da instalação de mais 8 GW em termelétricas a gás, espalhadas em todas as regiões do país (IEMA, 2022).

O inventário do IEMA indicou que as 72 usinas termelétricas brasileiras registradas no relatório emitiram 32,7 milhões de tCO₂e. Vale assinalar que 49% dessas emissões foram concentradas em apenas dez usinas, sendo que seis delas utilizam carvão mineral, e as demais, gás natural como combustível primário.

Essa concentração de emissões reflete a predominância de fontes altamente poluentes, o que já antecipa um quadro de impactos ambientais e sociais preocupantes. As usinas a carvão, em particular, contribuem para problemas ambientais graves ao liberarem não só CO₂, mas também dióxido de enxofre (SO₂), óxido de nitrogênio (NOx), material particulado (MP) e mercúrio (Hg) – Oberschelp *et al.* (2019). Essas emissões poluentes impactam a saúde humana, deterioram ecossistemas e contribuem para a poluição do ar e da água, além de estarem entre as principais responsáveis pela formação de chuvas ácidas, fenômeno que acelera a degradação do solo e dos recursos hídricos, afetando, portanto, a biodiversidade e os ecossistemas de maneira ampla e persistente (Asif *et al.*, 2022). Como pode ser observado no gráfico 1, a expansão das termoelétricas e o acionamento em anos de secas hidrológicas pioram o fator de emissão da matriz elétrica, como foi o caso em 2021.



Fonte: Brasil (2025).

Soma-se a isso o fato de que contratos robustos e de longa duração entre as termelétricas e o governo estabelecem uma espécie de compromisso com essas fontes de geração. Esse vínculo configura um panorama em que a previsibilidade do acionamento termelétrico gera segurança para o setor, porém, ao mesmo tempo, sedimenta uma dependência que é paradoxal frente à necessidade urgente de reduzir emissões de GEE.

A pressão política a favor das termelétricas se faz sentir, por exemplo, no projeto de Lei nº 15.097/2025, que regula as turbinas eólicas *offshore*. Emendas externas à proposta, inseridas durante a tramitação do projeto de lei, fortalecem a permanência e expansão das termelétricas até 2050, além de potencialmente aumentar o preço da eletricidade para o consumidor final. As emendas foram vetadas pelo presidente brasileiro na promulgação da lei, mas ainda dependem da decisão do Congresso Nacional em manter ou derrubar os vetos.

Se esse modelo continuar a ser seguido, o país optará por uma estagnação no cumprimento das metas de descarbonização do setor elétrico. Para além das questões climáticas, a previsão da constância das termelétricas impõe também uma significativa externalidade econômica negativa à população. Estima-se um encarecimento de 11% das contas de energia elétrica e emissões na ordem de 274 milhões de tCO₂e pelos próximos 25 anos (Observatório do Clima e Coalizão Energia Limpa, 2024).

4.2 A potencialidade da adaptação de base renovável

Um outro vetor de estratégia adaptativa do setor elétrico à mudança climática é a transição para uma matriz mais diversificada em fontes renováveis, como a solar e a eólica (Jean e Brasil Junior, 2022; Bursztyn, 2020; Nobre *et al.*, 2019). Tal aumento na participação de renováveis pode manter a característica de baixo carbono da matriz elétrica, ao mesmo tempo em que reduz a vulnerabilidade climática do sistema. Ao invés de dilema, nesse cenário há uma convergência entre mitigação e adaptação.

Fontes renováveis como energia solar e eólica, que já representam cerca de 22% da capacidade instalada no Brasil (ONS, 2024), são alternativas viáveis e menos vulneráveis às oscilações climáticas. O investimento nessas tecnologias, aliado ao fortalecimento da infraestrutura de armazenamento hídrico e à educação para o uso racional da água, é essencial para garantir a resiliência do sistema nacional.

A geração fotovoltaica desponta como uma possível solução para a transição energética global, atendendo à crescente demanda por fontes sustentáveis e acessíveis. No Brasil, a abundância de potencial solar é muito superior aos níveis de países líderes no setor, como Alemanha, França e Espanha. Com um mínimo de 4.444 Wh/m² por dia (Jean e Brasil Junior, 2022), o Brasil possui características naturais únicas para alavancar sua capacidade instalada de energia solar.

Apesar da contribuição ainda modesta na matriz elétrica, a energia solar vem se expandindo aceleradamente na última década, ampliando sua produção, em média, de 66% ao ano desde 2020 (Brasil, 2025). Essa expansão, impulsionada por avanços tecnológicos e metas ambientais, como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, contribui para a redução da dependência de fontes não renováveis e da energia hidráulica (Brasil, 2016).

5 UMA VIA SUSTENTÁVEL E JUSTA PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA – LABSOLAR+

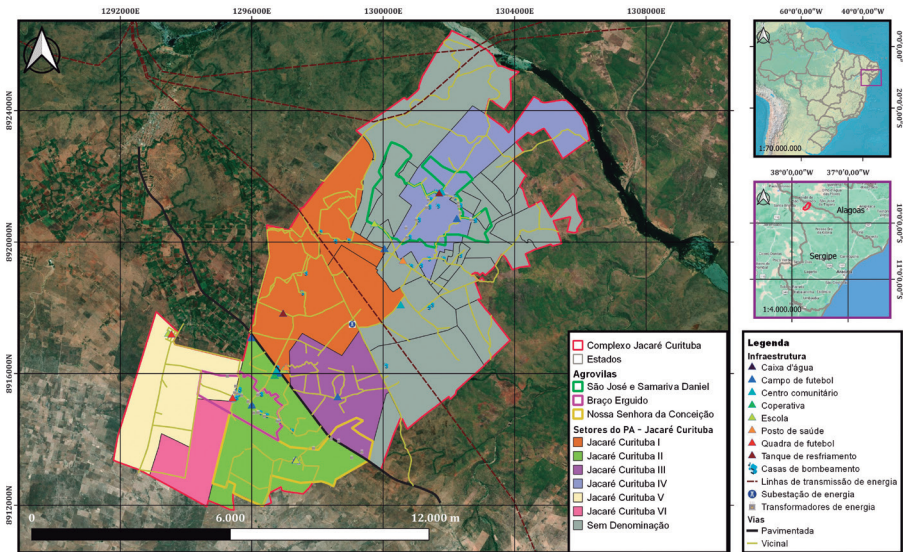
No contexto nacional, o Semiárido brasileiro emerge como um território estratégico para o avanço da energia solar, diante de desafios como a escassez de infraestrutura e da exclusão socioeconômica de comunidades rurais vulnerabilizadas (Nobre *et al.*, 2019). Sistemas solares instalados nessas áreas têm o potencial de transformar a realidade local, proporcionando acesso à energia e promovendo vias sustentáveis de desenvolvimento.

O LabSOLar+ é uma iniciativa que tem como base a energia solar como catalisadora de transformação e desenvolvimento nessa região. Por meio da pesquisa e da instalação de sistemas adaptados às condições locais, busca-se conectar a inovação tecnológica às necessidades reais das comunidades (Jean *et al.*, 2024).

Um experimento implantado no assentamento Jacaré-Curitiba – AJ-C (destacado na figura 2), no Semiárido de Sergipe, às margens do rio São Francisco, serve

de referência para a consideração de como a implantação de tecnologias renováveis pode superar barreiras históricas e oferecer soluções efetivas com inclusão social. Complementarmente foram também implantados *kits* de geração de energia solar, junto a outras famílias de agricultores, fora do perímetro do AJ-C, de forma a permitir uma comparação de desempenho (aceitação, empreendedorismo, sentido de pertencimento e responsabilidade) em contextos sociais e institucionais diferenciados.

FIGURA 2
Localização e infraestrutura do assentamento Jacaré-Curituba



Fonte: Jean *et al.* (2025).

Obs.: Ilustração reproduzida conforme o original (nota do Editorial).

Dados levantados pelo projeto INCT-Odisseia no AJ-C, em pesquisa junto a 109 famílias, revelam que mais de 65% das famílias consideram que o custo de energia afeta mais de 12% da renda familiar, sendo que mais de 45% são beneficiários do programa do governo federal de transferência de renda, Programa Bolsa Família (PBF) – Jean *et al.* (2024).

Essa experiência-piloto combina a geração de energia de baixa emissão de carbono com benefícios diretos para as comunidades rurais. Inspirado pelo conceito Nexus+ (Araujo *et al.*, 2019), o projeto aborda quatro dimensões de segurança (energética, hídrica, alimentar e socioambiental), promovendo transformações profundas para as famílias agricultoras que enfrentam desafios como a escassez hídrica, altos custos de energia e insegurança alimentar.

Os módulos solares têm potência de 555 Wp cada. Há quatro sistemas fotovoltaicos que contam com oito módulos solares, e cinco com dezesseis módulos

solares. Desse total, cinco famílias foram selecionadas no AJ-C, em Sergipe, e as demais são produtoras rurais em municípios de Alagoas. Um dos casos é um coletivo de membros do quilombo Sítio Rolas (Dávalos *et al.*, 2024; Jean *et al.*, 2024). A tabela 1 apresenta a configuração técnica dos sistemas do LabSOLar+. A iniciativa inclui configurações inovadoras: sistemas convencionais para telhados (figura 3A), *carports* solares (figura 3B) e sistemas agrovoltaicos (figura 3C). Os sistemas agrovoltaicos integram a agricultura e a estrutura física da produção de energia solar, podendo servir como abrigo para veículos; não há um telhado convencional, e sim módulos fotovoltaicos destinados a captar a luz do sol. As famílias contempladas foram selecionadas a partir de um conjunto de critérios, tendo como base principalmente a sua capacidade de resposta ao aporte tecnológico oferecido pelo LabSOLar+.¹⁶

Cada solução é projetada para otimizar o uso do espaço, em integração com outras tecnologias já difundidas no Semiárido, como a captação de água da chuva e irrigação de pequenas hortas, potencializando a sustentabilidade em múltiplas frentes. A energia excedente gerada pelos sistemas oferece uma alternativa adicional: pode ser monetizada com distribuição do excedente na rede elétrica – *smart grid* (Jean e Brasil Junior, 2022), em conformidade com as normas estabelecidas pelo setor elétrico e condicionada às práticas adotadas pelas empresas operadoras; ou ser direcionada para iniciativas produtivas, ampliando a renda familiar e incentivando o empreendedorismo local. Esse arranjo promove a sinergia entre as seguranças hídrica, energética, alimentar e socioambiental.

FIGURA 3

Modelos de sistemas de geração solar instalados

3A – Sistemas convencionais para telhados

3B – *Carports* solares

16. Seis grupos de critérios serviram de base para a seleção das famílias participantes do experimento: i) estar conectada à rede elétrica; ii) família liderada por mulher; iii) empreendedorismo; iv) produção e comercialização de produtos preexistentes; v) uso de equipamentos elétricos para a produção; e vi) participação de jovens na atividade produtiva.

3C – Sistemas agrovoltaicos



Fonte: LabSOLar+. Disponível em: <https://odisseia.unb.br>.
Obs.: Ilustração reproduzida conforme o original (nota do Editorial).

TABELA 1
Descrição dos sistemas instalados

Sistema	Telhado	Agrovoltaico	Telhado	Carport
Número de painéis	16	8	8	16
Tipo inversor	Enphase	Enphase	Enphase	Enphase
Quantidade de inversor	16	8	8	16
Geração estimada (kWh/mês)	1.046	546	546	1.046
Estimativa de CO ₂ (ton/ano) evitado	4,6	2,3	2,3	4,6
Sistemas instalados	4	2	2	1

Fonte: LabSOLar+. Disponível em: <https://odisseia.unb.br>. Acesso em: 6 maio 2025.

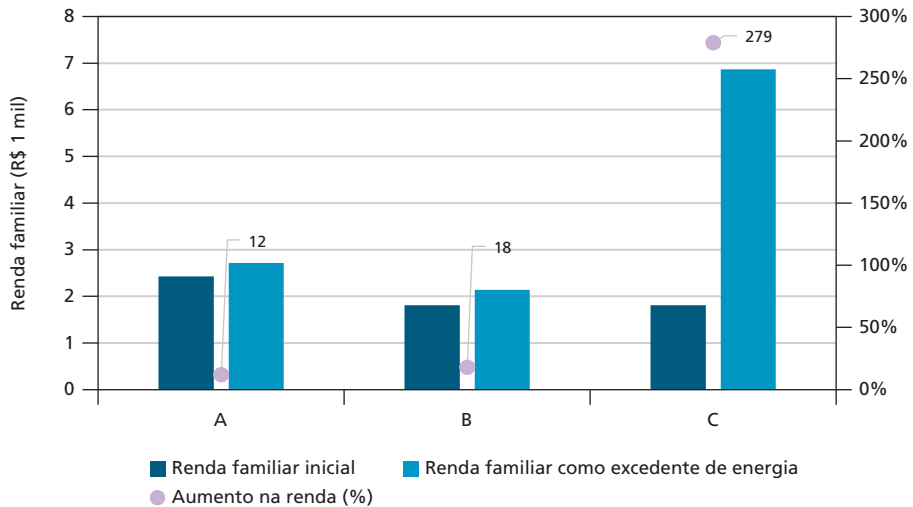
Um aspecto que merece destaque na iniciativa LabSOLar+ é a sua economicidade. A título de comparação, o custo total de implementação de um sistema com dezesseis painéis fotovoltaicos equivale a quatro anos do benefício médio recebido por uma família pelo PBF. Contudo, o impacto do sistema vai muito além: sua vida útil de 25 anos garante rendimentos que ultrapassam em muito o investimento inicial, transformando custos em oportunidades de geração de renda. Vale assinalar que não se trata de contrapor a proposta do LabSOLar+ (que é uma proposta que tem como fundamento a participação das famílias na geração de renda) ao PBF (que é um instrumento de transferência de renda).

Os resultados iniciais são promissores. As famílias participantes registraram redução de cerca de 60% em suas contas de energia, o que representa diminuição na participação dos gastos com energia no conjunto da renda familiar. Pequenos negócios emergiram com base no uso do excedente energético, provocando um aumento médio de 102,66% na renda familiar, conforme dados levantados no monitoramento junto às famílias selecionadas para o experimento.

O gráfico 2 mostra o resultado do aumento de renda em três famílias parceiras da pesquisa do LabSOlar+, com base em dados coletados em abril de 2024. Esse aumento está relacionado exclusivamente ao surgimento de pequenos negócios que usam o excedente de energia elétrica para operar. O incremento financeiro é uma transformação econômica impulsionada pela energia solar e que se traduz não apenas em números, mas na melhoria da qualidade de vida, autoestima e autonomia para as famílias, com destaque ao papel das mulheres.

GRÁFICO 2

Análise do aumento de renda por meio do surgimento dos negócios provocados pelo excedente de energia



Elaboração dos autores.

O impacto ambiental também é significativo. Cada sistema instalado pode evitar, em média, a emissão de 4,6 toneladas de CO₂ por ano¹⁷ em relação às emissões oriundas do consumo de eletricidade fornecida pelo Sistema Integrado Nacional (SIN), considerando o fator de emissão médio de 2020 (Jean *et al.*, 2024). Há que se considerar, no entanto, que o ciclo de vida dos painéis solares, desde sua produção até a disposição final, tem algum impacto ambiental, mas o avanço tecnológico dos últimos anos tem viabilizado tanto uma maior duração dos equipamentos quanto a reciclagem dos materiais empregados.

É fato que a contribuição dos poucos casos, no âmbito do projeto, para a redução do volume total de emissões de carbono do setor elétrico é insignificante, porém os resultados dos pilotos mostram que o conceito tem grande potencial se ganhar escala.

17. Tomando por base o fator médio de emissão do SIN (2017-2020) de 0,379975 kg CO₂/KWh.

Há desafios e oportunidades para a disseminação em maior escala, que não são desenvolvidos neste trabalho, mas que merecem uma breve consideração geral e aprofundamento em futuras pesquisas. Por exemplo, o ganho de escala depende da disponibilidade de insumos (exemplo: painéis solares) e da capacidade técnica para a implantação e manutenção dos sistemas LabSOLar+.

Se, por um lado, isso pode ser um gargalo, por outro pode ser uma oportunidade de gerar mais cobenefícios socioeconômicos no próprio território. O fomento a uma cadeia produtiva local ou regional em torno da ampliação da energia solar, além de baratear o custo da tecnologia, pode gerar polos de inovação e emprego no Semiárido, induzindo um desenvolvimento alinhado com as ambições de uma transição energética limpa e justa.

À semelhança do ocorrido no Programa 1 Milhão de Cisternas (P1MC),¹⁸ também seria oportuno fomentar as economias locais por meio do envolvimento e da capacitação de membros das comunidades na implantação e, especialmente, na manutenção dos painéis, fortalecendo os laços comunitários, especialmente se incluir a formação de jovens na estratégia. Há ainda desafios regulatórios e outros próprios da agricultura familiar, como acesso a financiamento, assistência técnica adequada e mercado.

O último Censo Agropecuário (IBGE, 2017) registrou, no Semiárido, 1.446.842 estabelecimentos caracterizados como de agricultura familiar, dos quais 16% não tinham acesso à eletricidade. Em uma estimativa preliminar, se fossem instalados 1 milhão de sistemas LabSOLar+, as emissões evitadas de CO₂ seriam da ordem de 1,7 milhão de toneladas/ano, valor equivalente, por exemplo, a cerca de 40% das emissões do setor de energia do Distrito Federal (SEEG, 2024). Do ponto de vista financeiro, o investimento necessário para implementação seria em torno de R\$ 35 bilhões, em valores de abril de 2025, o que equivale a 21% do orçamento do PBF em 2024.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os desafios e as oportunidades do setor elétrico brasileiro diante das mudanças climáticas são diversos. Como tratado neste artigo, a elevada participação de fontes renováveis, com destaque para a hidroeletricidade, é um ativo ambiental que confere ao país uma matriz de baixo carbono, o que é uma condição relativamente rara no contexto global. Por outro lado, considerando os efeitos já verificados e os cenários de mudança do clima, que indicam um regime de chuvas mais irregular, marcado por extremos de seca cada vez mais severos e frequentes, é previsível – e já mesmo verificável – um incremento da vulnerabilidade climática da oferta de hidroenergia, colocando em risco a segurança energética nacional.

18. Veja mais em: <https://asabrazil.org.br/projeto/p1mc/>. Acesso em: 7 jun. 2025.

O artigo questiona o caráter limpo, justo e renovável da matriz do setor elétrico brasileiro, que tem na geração hidrelétrica seu principal pilar. A partir de um experimento implementado no Semiárido nordestino, são apresentados elementos que permitem uma reflexão sobre a possível reversão dos gargalos apresentados. Ainda que o experimento envolva um pequeno número de famílias, é possível vislumbrar subsídios à adoção de políticas públicas que contribuam para melhorias nas seguranças hídrica, energética, alimentar e socioambiental, com expressiva redução nas emissões de gases de efeito estufa.

Diante disso, para fortalecer o perfil da matriz elétrica de base renovável como um ativo em um contexto de transição energética, é fundamental adaptar o setor à própria mudança do clima. No presente, a estratégia adaptativa do setor elétrico tem sido, no mínimo, ambígua. Embora outras fontes renováveis tenham ampliado a sua participação na matriz, como a eólica e a solar, a aposta – subsidiada pelo Estado – tem sido a expansão das termelétricas de base fóssil (carvão e gás natural) ou queima de biomassa, o que representa um contrassenso diante do imperativo de descarbonização.

A premissa defendida no presente trabalho é que, ainda que o abandono das fontes fósseis não seja algo no horizonte temporal de curto prazo, a trajetória a ser almejada deve buscar se afastar dela o mais rápido possível. É preciso pensar em um futuro no qual outras formas de geração energética limpas, como a solar e a eólica, se tornem pilares de uma matriz que seja não apenas mais sustentável, mas também mais justa. Sem justiça energética como base dessa transição, correremos o risco de replicar um modelo em que poucos lucram e muitos pagam um preço alto.

O Brasil está diante de uma oportunidade histórica para adotar um conjunto integrado de políticas que reflita as complexas interações entre os sistemas naturais e sociais, rompendo com práticas que, mesmo sendo renováveis, não são justas e provocam impactos socioambientais. Uma das medidas neste sentido seria investir em tecnologias de armazenamento e na continuidade da diversificação da matriz energética como resposta à urgente necessidade de adaptação e mitigação climática e como forma de garantir a estabilidade energética no país.

Cabe ressaltar, finalmente, que há desafios normativos e institucionais a serem enfrentados. A discussão sobre o marco regulatório do setor elétrico brasileiro é um tema relevante por suas implicações sobre a possibilidade de adoção de modelos alternativos de geração energética, em particular no caso da produção doméstica e da distribuição de energia excedente na rede. O tema é objeto de ampla literatura (Pinto Junior e Dutra, 2022) e merece ser devidamente considerado na esfera político-institucional.

REREFÊNCIAS

ARAUJO, M. *et al.* The socio-ecological Nexus+ approach used by the Brazilian research network on global climate change. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 39, p. 62-70, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.08.005>.

ASIF, Z. *et al.* Update on air pollution control strategies for coal-fired power plants. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 24, p. 2329-2347, maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02328-8>.

BERMANN, C. Impasses e controvérsias da hidreletricidade. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 139-153, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142007000100011>.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **O compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: produção e uso da energia**. Rio de Janeiro: EPE, jun. 2016.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Estudo do Cemaden e do Inpe identifica pela primeira vez a ocorrência de uma região árida no país. **Gov.br**, 14 nov. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/estudo-do-cemaden-e-do-inpe-identifica-pela-primeira-vez-a-ocorrencia-de-uma-regiao-arida-no-pais>.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Mudança climática dobrou a probabilidade de ocorrência de chuvas extremas no Sul do Brasil. **Gov.br**, 3 jun. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/06/mudanca-climatica-dobrou-a-probabilidade-de-ocorrencia-de-chuvas-extremas-no-sul-do-brasil>.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2025: ano base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, maio 2025. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/>.

BURSZTYN, M. Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: o desafio da integração de políticas públicas. **Estudos Avançados**, v. 34, n. 98, p. 167-186, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.3498.011>.

BURSZTYN, M.; PURUSHOTHAMAN, S. Interdisciplinary and transdisciplinary scholarship for a civilisation in distress: questions for and from the Global South. **Global Social Challenges Journal**, v. 1, n. 1, p. 94-114, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1332/LBEQ6699>.

CARRENO, E. M.; SANCHES, T. L.; PADILHA-FELTRIN, A. Consumer behavior after the Brazilian power rationing in 2001. *In: IEEE/PES TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA*, 2006, Caracas. **Proceedings** [...]. Caracas: IEEE/PES, 2006. p. 1-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TDCLA.2006.311375>.

CARVALHO, Y. C.; GOMES; G. N.; CORAZZA, R. I. Um olhar aos resultados do Programa Luz para Todos: informado pelos conceitos e enfoques da justiça energética (2004-2010). **Cuadernos de Geografía: revista colombiana de geografía**, Bogotá, v. 31, n. 2, p. 501-518, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.89699>.

CHIQUITO, G. *et al.* Unveiling water security in Brazil: current challenges and future perspectives. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 5, p. 759-768, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1899182>.

CLARKE, B. *et al.* **Climate change, not El Niño, main driver of extreme drought in highly vulnerable Amazon River Basin**: report. [S. l.]: Center for Environmental Policy, 2024. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10044/1/108761>.

COLLIER, U. **Hydropower and the environment**: towards better decision-making. Godalming: WWF, 2004. Disponível em: <https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/hydropowerenvironmentdecisionmaking.pdf>.

COUDEL, E. *et al.* Co-producing knowledge with family farming organizations: a citizen science observatory in Santarém, Brazilian Amazon. **Cahiers Agricultures**, v. 32, n. 1, p. 1-14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/cagri/2021035>.

DÁVALOS, N. *et al.* A segurança socioambiental e a abordagem Nexus+: reflexões para análise territorial e de governança ambiental no estudo de caso do Assentamento Jacaré-Curitiba. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, n. 32, p. 183-194, jul.-dez., 2024. ISSN 2177-1847. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/brua32>.

ENERGY INSTITUTE. **Statistical review of world energy**. Londres: EI, 2024. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review>.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA . **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Brasília: MME, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2024>.

ESCOBAR, H. Quebra da circulação do Atlântico aumentaria risco de colapso da Amazônia, alerta estudo, 2024. **Jornal da USP**, 4 dez. 2024. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/quebra-da-circulacao-do-atlantico-aumentaria-risco-de-colapso-da-amazonia-diz-estudo/>.

FEARNSIDE, P. M. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams in tropical forests. *In*: LEHR, J.; KEELEY, J.; KINGERY, T. B. (ed.). **Alternative energy and shale gas encyclopedia**. Nova York: John Wiley & Sons Publishers, 2016. p. 428-438. DOI: 10.1002/9781119066354.ch42.

FURTADO, C. **Formação econômica do Brasil**. 14. ed. São Paulo: Nacional, 1976.

GETIRANA, A.; LIBONATI, R.; CATALDI, M. Brasil is in water crisis: it needs a drought plan. **Nature**, v. 600, p. 218-220, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-03625-w>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017**: resultados definitivos. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/>.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Climate change and nuclear power 2022**: securing clean energy for climate resilience, 2022. Disponível em: <https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea-ccnp2022-body-web.pdf>.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The future of cooling**: opportunities for energyefficient air conditioning. [S. l.]: IEA, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>.

IEMA – INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas**: geração de eletricidade, emissões e lista de empresas proprietárias das termelétricas a combustíveis fósseis e de serviço público do Sistema Interligado Nacional (ano-base 2020). São Paulo: IEMA, 2022. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/inventario-de-emissoes-atmosfericas-em-usinas-termeletricas>.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2023**: synthesis report – Summary for policymakers. Geneva: IPCC, 2023, p. 1-34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

JASECHKO, S. *et al.* Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. **Nature**, v. 625, p. 715-721, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>.

JEAN, W. *et al.* Estudo sobre pobreza energética e segurança energética no seminário brasileiro: vulnerabilidade e resiliência socioambiental. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, n. 32, p. 35-44, jul.-dez. 2024. ISSN 2177-1847. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/brua32>.

JEAN, W. *et al.* Energy security assessment in rural communities in Brazil: a contribution to public policies. **Energy Nexus**, v. 17, n. 100350, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100350>.

JEAN, W.; BRASIL JUNIOR, A. C. P. Solar model for rural communities: analysis of impact of a grid-connected photovoltaic system in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 10, n. 3, set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.13044/j.sdwes.d9.0405>.

LAZARO, L. L. B. *et al.* Assessing water scarcity narratives in Brazil – challenges for urban governance. **Environmental Development**, v. 47, n. 100885, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100885>.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil: past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1189-1200, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MUSSA, M.; TEKA, H.; AYICHO, H. Environmental impacts of hydropower and alternative mitigation measures. **Current Investigations in Agriculture Current Research**, v. 2, n. 2, 12 abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.32474/CIACR.2018.02.000133>.

NOBRE, C. *et al.* Some Characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, p. 252-262, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022>.

NOBRE, P. *et al.* Solar smart grid as a path to economic inclusion and adaptation to climate change in the Brazilian Semiarid Northeast. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, v. 11, n. 4, p. 499-517, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-09-2018-0067>.

NOBREGA, R. S. Os atingidos por barragem: refugiados de uma guerra desconhecida. **Revista Interdisciplinar da Mobilidade Humana**, ano XIX, n. 36, p. 125-143, jan.-jun. 2011. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4070/407042013007.pdf>.

OBERSCHELP, C. *et al.* Global emission hotspots of coal power generation. **Nature Sustainability**, n. 2, p. 113-121, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0221-6>.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA; COALIZÃO ENERGIA LIMPA. **Posicionamento do Observatório do Clima e da Coalizão Energia Limpa sobre o PL das Eólicas Offshore**. [S. l.]: Observatório do clima; Coalizão Energia Limpa, 2024. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/Posicionamento-do-Observatorio-do-Clima-e-da-Coalizao-Energia-Limpa-sobre-o-PL-das-Eolicas-Offshore-1.pdf>.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Evolução da capacidade instalada no SIN**. Novembro 2024/dezembro 2028 (2024). Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.

PINTO JUNIOR, M.E.; DUTRA, J. C. (org.). **Concessões no setor elétrico brasileiro: evolução e perspectivas**. Rio de Janeiro: Synergia, 2022. ISBN: 978-65-88214-72-7.

POLANYI, K. **A grande transformação: as origens da nossa época**. São Paulo: Elsevier, 2011.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Observatório do Clima, 2024**. Disponível em <https://seeg.eco.br/#emissoes>.

TOMASELLA, J.; CUNHA, A. P. A.; MARENGO, J. A. **Elaboração dos mapas de índice de aridez e precipitação total acumulada para o Brasil**. [S. l.]: Cemaden/MCTI, 2024. (Nota técnica). Disponível em: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/estudo-do-cemaden-e-do-inpe-identifica-pela-primeira-vez-a-ocorrencia-de-uma-regiao-arida-no-pais/nota-tecnica_aridas.pdf.

TONNEAU, J. P. *et al.* Les observatoires territoriaux: des outils de la société de la connaissance? **Revue Internationale de Géomatique**, v. 27, n. 3, p. 335-354, 2017. DOI: 10.3166/rig.2017.00035.

WITH HYDROPOWER, we can create a renewable and resilient energy system. **International Hydropower Association**, mar. 2022. Disponível em: <https://www.hydropower.org/blog/with-hydropower-we-can-create-a-renewable-and-resilient-energy-system>.

WU, H. *et al.* Effects of dam construction on biodiversity: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 221, p. 480-489, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.001>.

YAO, F. *et al.* Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. **Science**, v. 380, n. 6646, p. 743-749, maio 2023. DOI: 10.1126/science.abo2812.

Data da submissão em: 17 abr. 2025.

Primeira decisão editorial em: 6 jun. 2025.

Última versão recebida em: 9 jun. 2025.

Aprovação final em: 11 jul. 2025.

