Fontes Alternativas de Energia: Perspectivas Técnicas, Econômicas e Sociais

José Alexandre Matelli (org.)

Autores: Alexandre Nagy Iorio, Aloisio Sabadin de Moura Filho, Arthur Frade Polilo, Diego Bachion Borges, Gabriel Dupont Dias, Humberto Soares Moroni, João Vitor Hirotsug Tanno, Kalebe Chaves Freire, Kevin Arthur Rodrigues Uemura, Maria Julia Gulla Magacho, Matheus Caldeira Costa, Murillo Kendy Takeshita, Vinicius Alves Faria

unesp

Universidade Estadual Paulista
Campus de Guaratinguetá
Faculdade de Engenharia e Ciências
Departamento de Química e Energia

Arte da capa: Arthur Frade Polilo, Diego Bachion Borges e Kalebe Chaves Freire, com auxílio do Gemini 2.5

F683 Fontes alternativas de energia : perspectivas técnicas, econômicas e sociais / José Alexandre Matelli (organizador) ; Alexandre Nagy Iorio … [et al.]. – Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências, 2026.
Bibliografia

ISBN: 978-65-89235-06-4
Tipo do arquivo: Texto
Online

1. Energia - Fontes alternativas. 2 Energia solar 3. Sustentabilidade 4. Energia - aspectos sociais I. Matelli, José Alexandre II. Iorio, Alexandre.

CDU: 620.91

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária CRB-8: 9203

ÍNDICE

Prefácio 5

Fusão nuclear e subdesenvolvimento 7
Gabriel Dupont Dias; Vinicius Alves Faria

Geração de energia elétrica em áreas remotas por meio de micro usinas hidrelétricas 13
Arthur Frade Polilo; Diego Bachion Borges; Kalebe Chaves Freire

Desafios e perspectivas da tecnologia de pequenas turbinas eólicas no cenário energético atual 25
João Vitor Hirotsug Tanno; Murillo Kendy Takeshita

Energia solar no brasil: desafios técnicos, viabilidade econômica e perspectivas éticas de uma transição sustentável 29
Aloisio Sabadin de Moura Filho; Maria Julia Gulla Magacho

Desafios logísticos da bioenergia no Brasil 35
Alexandre Nagy Iorio; Humberto Soares Moroni

Fissão nuclear como complemento estratégico à matriz energética brasileira: desafios regulatórios e sociais frente à transição energética 43
Kevin Arthur Rodrigues Uemura; Matheus Caldeira Costa

We are learning by bitter experience that the organism which destroys its environment destroys itself.

Gregory Bateson (1904-1980)

PREFÁCIO

É com grande satisfação que apresentamos à comunidade universitária o livro Fontes Alternativas de Energia: Perspectivas Técnicas, Econômicas e Sociais, uma obra que condensa o esforço de reflexão e pesquisa dos estudantes de graduação da disciplina **Fontes Alternativas de Energia** (FAE). Oferecida pelo Departamento de Química e Energia da Unesp, Campus de Guaratinguetá, a disciplina se propõe a ir além da abordagem puramente técnica, propondo a discussão da transição energética no panorama socioeconômico contemporâneo, conforme preconizado nos objetivos dispostos no plano de ensino.

> Objetivos: Explorar diferentes tecnologias de geração e conversão de energia, em um contexto complexo de transição energética nacional e internacional que envolve aspectos técnicos, econômicos, ambientais, sociais e éticos.

O projeto deste livro se relaciona com os ODS n° 04 (educação de qualidade) e n° 07 (energia limpa e acessível). Os estudantes matriculados no segundo semestre de 2025 foram organizados em seis grupos de trabalho, cada um escolhendo um tema alinhado aos objetivos da disciplina: Energia Solar, Energia Eólica, Energia Hidráulica, Energia Nuclear, Bioenergia e Fusão Nuclear.

O resultado é um conjunto de ensaios que se destacam pela abordagem multidisciplinar. Um ensaio acadêmico é um texto para discutir determinado tema, com base teórica em livros, revistas, artigos publicados, entre outros. O ensaio consiste na exposição das ideias e pontos de vista do(s) autor(es) sobre um determinado tema, buscando originalidade no enfoque, sem, contudo, explorar o tema de forma exaustiva. Neste trabalho, cada ensaio é fruto de pesquisa bibliográfica e análise de cada grupo, em que se busca articular:

Aspectos Técnicos: Princípios de funcionamento, limitações e inovações tecnológicas de cada fonte.

Aspectos Econômicos: Viabilidade, custos de implantação, políticas públicas, normas e legislação.

Aspectos Éticos: Implicações ambientais, sociais, geopolíticas e de justiça energética.

No primeiro ensaio, “Fusão nuclear e subdesenvolvimento: porque o Brasil fica para trás”, os autores fazem uma dura crítica à dependência tecnológica do país, tendo como pano de fundo uma tecnologia que segue impondo inúmeros desafios técnicos para que seja dominada. No ensaio “Geração de energia elétrica em áreas remotas por meio de micro usinas hidrelétricas”, os autores exploram essa tecnologia de baixo custo e baixo impacto ambiental, discutindo as oportunidades e os potenciais problemas de sua adoção. Em os “Desafios e perspectivas da tecnologia de pequenas turbinas eólicas no cenário energético atual”, são analisadas as possibilidades da aplicação dessa tecnologia em centros urbanos, algo especialmente desafiador em virtude da imprevisibilidade do regime dos ventos nesses ambientes. Já em “Energia solar no Brasil: desafios técnicos, viabilidade econômica e perspectivas éticas de uma transição sustentável”, os autores defendem que a energia solar representa uma solução viável e necessária para a transição rumo a um modelo energético mais sustentável e justo. Os autores de “Desafios logísticos da bioenergia no Brasil” questionam a real sustentabilidade da bioenergia, tendo em vista que sua logística de transporte de matérias-primas depende fortemente de modais de transporte movidos a combustíveis fósseis. Finalmente, em “Fissão nuclear como complemento estratégico à matriz energética brasileira: desafios regulatórios e sociais frente à transição energética”, os autores defendem os reatores baseados em fissão nuclear como fonte estratégica de energia no contexto brasileiro, propondo sua integração como complemento necessário à matriz elétrica nacional.

O livro se materializa não apenas como uma demonstração do conhecimento adquirido e das competências desenvolvidas pelos alunos dos cursos das Engenharias Mecânica, Civil, Elétrica, de Produção e de Materiais, mas também como um importante exercício de cidadania científica. A geração de energia é um tema interdisciplinar por excelência, e a capacidade dos futuros engenheiros de dialogar sobre os riscos e as oportunidades de cada escolha é fundamental para a construção de um futuro energético mais sustentável e equitativo.

Disponibilizado no Repositório Institucional da Unesp, pelo que agradecemos a equipe da Biblioteca da FEG, esperamos que esta obra se torne uma fonte de consulta, um convite ao debate na comunidade universitária e, mais pretensiosamente, uma inspiração para iniciativas semelhantes em outras disciplinas da Faculdade de Engenharia e Ciências.

Prof. José Alexandre Matelli
Unesp/Campus de Guaratinguetá
Faculdade de Engenharia e Ciências
Departamento de Química e Energia

Guaratinguetá, verão 2025-2026

Declaração: este prefácio foi concebido com auxílio do Gemini 2.5, tendo sido revisado e validado pelo autor, que assume total responsabilidade sobre o texto, em conformidade com a Resolução Unesp n° 13, de 22 de abril de 2025.

FUSÃO NUCLEAR E SUBDESENVOLVIMENTO: PORQUE O BRASIL FICA PARA TRÁS

Gabriel Dupont Dias
Engenharia Mecânica
gabriel.dupont@unesp.br

Vinicius Alves Faria
Engenharia Elétrica
vinicius.a.faria@unesp.br

Resumo. *O presente ensaio aborda a relação entre o desenvolvimento da tecnologia de fusão nuclear e o persistente quadro de subdesenvolvimento brasileiro. Inicialmente, são apresentados de forma sucinta os princípios técnicos de funcionamento de um reator de fusão nuclear e os desafios científicos envolvidos em sua implementação. Em seguida, discute-se o potencial e dificuldades dessa tecnologia em dimensões econômicas, sociais e ambientais, debatendo se, ao todo, a implementação é verdadeiramente sustentável. Por fim, o trabalho analisa o (não) posicionamento do Brasil diante dessas inovações, evidenciando como a falta de investimento em pesquisa e infraestrutura científica contribui para a manutenção de um ciclo de atraso tecnológico e dependência externa. A reflexão propõe que a ausência de políticas voltadas à ciência de ponta, como a fusão nuclear, representa não apenas uma perda estratégica, mas também um fator determinante para a perpetuação do subdesenvolvimento nacional.*

Palavras-chave: *Fusão nuclear, Subdesenvolvimento, Energia, Brasil, Dependência*

1. INTRODUÇÃO

Para geração de energia e uso de combustíveis, não existe uma resposta universal, cada país gera energia de acordo com algumas características intrínsecas de seu desenvolvimento, como posição geográfica, elementos naturais daquela região, fatores históricos, riqueza e poder bélico, tendo cada uma seus pontos positivos e negativos. Ao longo dos anos, a comunidade científica e algumas instituições vêm trabalhando no avanço da fusão nuclear como energia do futuro, já que, dentre todas as formas de conversão de energia conhecidas, é a única que não deixa resíduo, tendo um impacto ambiental bastante reduzido (MOHAMED, 2024). Além disso, um reator de fusão é muito seguro, já que a reação de fusão nuclear (ao contrário da de fissão), se extingue instantaneamente quando o reator é desligado. No caso da energia hidrelétrica, é necessário inundar, em geral, uma área expressiva, afetando a fauna e flora do local. Na energia eólica, é preciso a instalação das torres com pás cada vez maiores, o que vem causando diversos problemas como morte de aves, destruição da vegetação e problemas sociais para comunidades locais (FERREIRA; CAMACHO; GUIMARÃES, 2019). No caso da energia solar, existe a questão da intermitência, a necessidade de armazenamento de energia para uso noturno, o risco de sobretensão e problemas na instalação. A energia nuclear como conhecemos, baseada na fissão nuclear, também pode ser muito problemática, como visto nos casos de Fukushima e Chernobyl.

Apesar da constante evolução ao longo dos anos, a fusão nuclear como fonte energética ainda enfrenta desafios tecnológicos críticos. Os sistemas experimentais de fusão apresentam balanço energético negativo, ou seja, a energia necessária para iniciar e manter o processo ainda é maior do que a energia gerada. Dentre os motivos desta relação desfavorável está principalmente a ausência de materiais e reatores capazes de estabilizar e conter eficientemente o plasma em condições extremas de temperatura e pressão.

Desse modo, a corrida pela estabilização da fusão nuclear continua ativa. Estudos atuais indicam que o isótopo helio-3 (He-3) pode desempenhar papel fundamental nesse processo por permitir uma reação mais estável e limpa em comparação aos combustíveis tradicionais como deutério e trítio (DE TEMMERMAN, 2021). Entretanto, esse recurso é escasso na Terra, sendo encontrado em abundância na superfície lunar, o que reabre a corrida espacial contemporânea entre grandes potências, como China e Estados Unidos.

Assim, evidencia-se que a transição energética envolve desafios em diversos escopos, considerando que todas as formas de geração de energia apresentam limitações próprias, incluindo a fusão nuclear. A superação desses obstáculos exige avanços científicos, investimentos contínuos e cooperação internacional para que novas matrizes energéticas possam ser efetivamente implementadas.

2. FUNDAMENTOS DA FUSÃO NUCLEAR

Durante a nossa história, a busca por fontes cada vez mais eficientes de energia acompanhou lado a lado o nosso desenvolvimento como espécie. Nós fomos do fogo até máquinas a vapor, nós domamos o vento, nós transformamos correntes de água em uma maneira de extrair energia útil para a humanidade. Porém, abastecer energeticamente toda a humanidade e o sistema vigente de produção de bens e serviços não é uma tarefa fácil. Estamos crescendo rapidamente e com isso a nossa demanda por energia também aumenta. E o que piora nossa situação é que hoje em dia cerca de 80% da

nossa energia vem de combustíveis fósseis (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). Eles não são renováveis e algumas estimativas apontam que alguns deles não vão durar mais 100 anos. Então encontrar novas formas de energia mais eficientes não é só mais uma necessidade, mas sim uma obrigação.

A busca pela geração de energia através da fusão nuclear representa um dos maiores desafios tecnológicos e científicos da humanidade. Inspirada nos processos que alimentam as estrelas, a fusão nuclear oferece a possibilidade de gerar grandes quantidades de energia limpa a partir de combustíveis abundantes e com baixa produção de resíduos radioativos. Apesar desse potencial, a concretização de reatores de fusão para geração elétrica em larga escala permanece como objetivo de longo prazo, devido às inúmeras barreiras técnicas envolvidas.

A fusão nuclear é proveniente da combinação entre núcleos mais leves, como os isótopos de hidrogênio. Essa combinação ocorre quando a repulsão eletrostática entre os núcleos leves é superada, formando assim núcleos mais pesados e liberando uma quantidade enorme de energia. Essa reação acontece naturalmente no Sol devido às altas temperaturas e pressões extremamente elevadas. No entanto, reproduzir essas condições na Terra ainda é algo inviável, exigindo o desenvolvimento de métodos alternativos para induzir a fusão de maneira controlada. No caso das estrelas, sua gravidade (oriunda de sua grande massa) atua para conter o plasma, confinando a reação no volume da própria estrela.

O principal meio estudado para a realização da fusão é o confinamento de plasma, um estado da matéria caracterizado pela ionização completa dos átomos. Na década de 1950, surgiu o conceito de confinamento magnético, com estruturas toroidais conhecidas como *tokamaks* e *stellarators*, capazes de aprisionar o plasma em uma "garrafa magnética". Os combustíveis mais promissores para fusão, deutério e trítio, são isótopos do hidrogênio, sendo o primeiro abundante na água do mar, o que posiciona esse processo como viável em termos de recursos naturais.

O desafio subsequente envolve aquecer o plasma a temperaturas superiores a 100 milhões de graus Celsius para que as reações de fusão ocorram de forma sustentada. Os primeiros experimentos enfrentaram dificuldades tanto no confinamento quanto no aquecimento eficiente do plasma, além da ausência de modelos matemáticos robustos para prever sua dinâmica. Em 1968, obteve-se a primeira fusão controlada em laboratório, embora ainda limitada em duração e estabilidade.

Como segunda opção à estratégia de confinamento magnético, desenvolveu-se a fusão inercial, na qual é utilizado lasers de alta potência a fim de comprimir pequenas cápsulas de combustível até que a ignição seja iniciada. Esse tipo de tecnologia também enfrentou desafios, principalmente relacionados ao desenvolvimento de lasers com energia suficiente para desencadear o processo.

Nas décadas seguintes, avanços significativos em supercondutividade e engenharia de materiais permitiram melhorias substanciais nos tokamaks, culminando em experimentos como o *Joint European Torus* (JET), que se aproximou do ponto de paridade energética, i.e., a condição em que a energia gerada pela fusão iguala a energia necessária para iniciar e manter a reação. Embora não tenha atingido o objetivo plenamente, o JET consolidou as bases para o maior empreendimento atual da área: o *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER). Previsto para iniciar operações no ano de 2025, com pleno funcionamento esperado para 2035, o ITER tem como meta gerar cerca de dez vezes mais energia do que a fornecida para o início da reação, constituindo-se como marco potencial para a viabilidade industrial desta tecnologia (MOHAMED et al., 2024).

Como plano de desenvolvimento para o futuro temos o reator chamado DEMO, com previsão para entrar em operação por volta de 2040, sendo o primeiro a entregar energia elétrica da fusão para a rede. Diferentemente do passado, em que previsões otimistas não se concretizaram, o conjunto ITER-DEMO representa um caminho tecnológico estruturado e fundamentado. Paralelamente, a fusão inercial atingiu importante conquista em 2021, com a ignição do combustível em laboratório, demonstrando que o processo pode se tornar uma alternativa competitiva no futuro (ZYLSTRA et al., 2022). Soma-se a isso o crescente investimento privado em reatores de fusão, impulsionando a exploração de conceitos mais simples e possivelmente mais rápidos de desenvolver.

Diante das limitações associadas ao uso do trítio, pesquisas também exploram combustíveis alternativos, entre os quais o hélio-3 (^{3}He) se destaca como uma promissora possibilidade futura. Reações de fusão envolvendo hélio-3, especialmente em combinação com deutério, apresentam como principal vantagem a ausência de produção direta de nêutrons de alta energia, reduzindo significativamente a radioatividade e facilitando a viabilização de reatores mais seguros e duradouros. Entretanto, o hélio-3 é extremamente escasso na Terra, encontrando-se disponível em quantidades mais expressivas na superfície da Lua e em outros corpos celestes que não possuem atmosfera protetora contra o vento solar. Esse fator implica não apenas desafios tecnológicos para sua obtenção, mas também potenciais implicações geopolíticas, uma vez que o domínio do acesso a esse combustível e consequentemente à geração de energia por fusão nuclear pode influenciar diretamente a soberania energética de futuras potências tecnológicas.

3. ANÁLISE ECONÔMICA DA FUSÃO NUCLEAR

Embora seja difícil mensurar precisamente o custo de uma tecnologia em desenvolvimento, TOSCHI (1997) argumenta que ele será dominado pelo custo do capital e dependente da redução de custo entre a primeira geração de reatores (ITER) e a décima geração, estimando que ela seria cerca de 80% maior que o custo de um reator de fissão em 1997. O autor sugere ainda que países que já operam reatores de fissão nuclear seriam capazes de obter o *know-how* necessário para operar reatores de fusão nuclear, destacando Brasil, Índia e China.

PLANAS (2024) destaca que ainda há diversos desafios para a finalização do ITER. Inicialmente estimado em 5 bilhões de euros, o custo atual já ultrapassa os 20 bilhões de euros. Apesar disso, diversos países e empresas trabalham no desenvolvimento dessa tecnologia, podendo citar investimentos da ordem de 3 bilhões de dólares em startups feitos por Chevron e Alphabet (PIVETTA, 2023).

Segundo PIVETTA (2023), existem aproximadamente 130 reatores experimentais de fusão nuclear no mundo hoje (em operação, construção ou planejamento), em cerca de 50 países. MISHRA E ANITHA (2020) trazem alguns reatores em projeto, dentre eles o chines CFETER, o indiano STT-2, o sul-coreano K-DEMO e o japonês DEMO. No hemisfério sul, o Brasil é o único país que possui reatores de fusão nucleares, três *tokamaks* de pequeno porte, sendo eles o TCABR, o ETE e o Nova.

4. ANÁLISE AMBIENTAL E SOCIAL

A definição de sustentabilidade de uma fonte de energia está geralmente relacionada à capacidade de consumo efetivo e virtualmente inesgotável dos recursos naturais associados. Desse ponto de vista, os combustíveis de um reator de fusão nuclear (lítio e deutério) satisfazem se enquadram na definição devido a abundância do elemento encontrado na água do mar. No entanto, FISCHER, HAMACHER E BRADSHAW (2011) argumentam que as análises do impacto causado pela exploração não recebem a devida atenção e que os debates dos limites da sustentabilidade e do desenvolvimento sustentável saíram da esfera econômica para a mídia e política.

4.1 Impactos ambientais

Embora os combustíveis para o reator sejam virtualmente inesgotáveis, pouca atenção é dada para a forma de extração e obtenção desses materiais. O lítio é abundante no mar, no entanto, o processo de extração a partir da água do mar não é seriamente cogitado como fonte viável industrialmente, além disso, para obtenção de 10 mil toneladas de lítio, equivalente ao consumo anual esperado quando se tornasse uma fonte global de energia, FISCHER, HAMACHER E BRADSHAW (2011) estimam que seria necessário processar 5×10^{10} toneladas de água do mar, causando perturbações expressivas nos ecossistemas marinhos. A demanda do lítio ainda é afetada pelo crescimento do uso de baterias de íon-lítio das indústrias automobilística e eletrônica, que podem esgotar as reservas terrestres conhecidas nas próximas décadas.

Saindo dos combustíveis, o berílio e chumbo, materiais essenciais para os multiplicadores de nêutrons, apresentam elevada toxicidade.

4.2 Desigualdade e implicações geopolíticas

Embora diversos países participem da construção do ITER e também desenvolvam seus próprios reatores, os países que hoje já dominam os reatores de fissão nuclear naturalmente terão vantagem durante a implementação da tecnologia. Mesmo assim, o processo de fabricação ainda será concentrado nos países desenvolvidos.

Além disso, TOSCHI (1997) argumenta que embora seja operacionalmente complexo e detectável, é possível a obtenção de materiais físicos com o uso dos reatores de fusão. Esse uso já pode garantir algumas restrições na comercialização e até mesmo no desenvolvimento dessa tecnologia com países subdesenvolvidos e/ou com relações ruins com as atuais potências.

Um fato que corrobora essa ideia é encontrada na conferência realizada em 2022 pelo Departamento de Energia Americano, onde Mark Herrmann, diretor do programa de design de armas e física do NIF (*National Ignition Facility*, uma instalação de pesquisa de fusão por confinamento inercial baseada em laser) comenta sobre o uso da tecnologia de fusão nuclear. Na ocasião, Hermmann afirmou que a geração de energia ainda estava muito distante da realidade e que o objetivo dos experimentos era conseguir dados para a pesquisa americana para seu arsenal nuclear.

5. O SUBDESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO BRASILEIRO

Para entender o atraso tecnológico e a dependência externa, é prudente analisarmos as origens do problema. Segundo ARENDT et al. (2023), as divergências nas políticas econômicas adotadas por países (que eram) emergentes como China, Coreia do Sul, Índia, Taiwan, Argentina, Brasil, México e Chile resultaram na formação de dois grupos caracterizados por capacidades econômicas distintas.

5.1 Raízes do problema

O primeiro grupo, composto principalmente por países asiáticos, foi chamado de independente, pois optou por desenvolver internamente suas capacidades tecnológicas, estimulando a criação de conhecimento e fomentando empresas nacionais sempre que possível. Já o segundo grupo, formado majoritariamente por países latino-americanos, seguiu um caminho diferente. Denominado integracionista, esse grupo buscou adquirir tecnologia por meio de compras internacionais e da atração de investimento estrangeiro direto, acreditando que isso impulsionaria a transformação estrutural de suas economias. Com o tempo, o grupo independente conseguiu criar e desenvolver seus próprios ativos baseados em conhecimento, enquanto a estratégia integracionista falhou em fazê-lo.

Durante o governo Kubitschek, o Brasil buscou acelerar o processo de substituição de importações iniciado por Vargas. No entanto, o Plano de Metas priorizou o capital estrangeiro, tanto na forma de investimentos produtivos quanto de financiamento, entregando o controle das principais indústrias (automobilística, naval, elétrica e mecânica) às empresas internacionais, mantendo o país dependente do exterior.

Enquanto isso, a Coreia do Sul seguiu uma trajetória oposta. Suas primeiras políticas de desenvolvimento concentraram-se em reformas agrárias e educacionais, na nacionalização do sistema bancário e em uma industrialização voltada para exportações. O governo coreano desencorajava o investimento estrangeiro direto e estimulava o aprendizado tecnológico interno. Nos anos 1980 e 1990, a Coréia passou a aprimorar bens importados e incentivar engenheiros locais, fortalecendo a pesquisa e o desenvolvimento com incentivos fiscais e financeiros, concentrando-se em inovação de produtos e processos, buscando autonomia tecnológica. O país avançou em áreas como semicondutores, telas e celulares, consolidando-se como uma economia baseada em conhecimento e inovação.

A ausência de uma capacidade interna sólida para liderar avanços tecnológicos deixou o Brasil estagnado. Mesmo hoje, o país ainda depende de capital e tecnologia estrangeira para revitalizar seu setor produtivo, não só mantendo-se preso a uma estratégia integracionista, mas radicalizando-a na adesão à agenda neoliberal na década de 1990, tanto institucional quanto tecnologicamente.

5.2 Exemplos atuais

Essa condição de dependência pode ser observada em diversos setores estratégicos. A indústria nacional carece de autonomia em segmentos fundamentais: não há produção de veículos, eletrônicos ou semicondutores com tecnologia integralmente desenvolvida no país e mesmo as grandes empresas nacionais enfrentam limitações estruturais que evidenciam essa dependência. A Embraer, referência mundial na aviação regional, ainda necessita importar motores e componentes eletrônicos de alta complexidade. A Petrobras, apesar de seu protagonismo na exploração de petróleo, não possui capacidade de refino suficiente para atender à demanda interna, obrigando o país a exportar petróleo bruto e importar derivados. No agronegócio, setor de maior peso nas exportações brasileiras, a dependência externa também é notável, sobretudo na importação de fertilizantes e insumos químicos.

Especificamente no setor da fusão nuclear, PIVETTA (2023) argumenta que o Brasil já teve maior destaque no campo e nas últimas décadas perdeu diversos pesquisadores. O autor reporta que em 2021 houve uma proposta, não implementada, de criação de um programa nacional de fusão nuclear, que criaria um laboratório nacional de fusão nuclear para concentrar e coordenar as atividades da área.

PLANAS (2024) argumenta que o sucesso do ITER trará avanços significativos em outras áreas, como medicina, transporte e exploração espacial, mas devido à falta de políticas brasileiras estáveis e de longo prazo, mais uma vez ficará em posição coadjuvante.

6. CONCLUSÃO

A fusão nuclear representa não apenas uma fronteira tecnológica voltada para o futuro energético da humanidade, mas também um divisor político que tende a ampliar ainda mais as desigualdades entre países centrais e economias dependentes. Embora os avanços recentes voltados à fusão nuclear demonstrem que sua viabilidade técnica se aproxima lentamente, o Brasil permanece à margem desse cenário como mero espectador. A falta histórica de políticas industriais contínuas e de investimentos estruturados em ciência e tecnologia perpetua um ciclo de dependência, limitando o país ao papel de importador de conhecimento e tecnologia.

Os desafios econômicos, ambientais e sociais da fusão nuclear são reais e exigem planejamento estratégico para que seus benefícios não fiquem restritos às grandes potências que já dominam tecnologias nucleares e detêm maior capacidade de investimento. Caso o Brasil continue sem iniciativas consistentes, corre-se o risco de que a transição energética global consolide uma nova forma de subdesenvolvimento, no qual o domínio de tecnologias limpas e de alto valor agregado determinará o futuro da competitividade internacional.

Desse modo, ampliar a participação brasileira na pesquisa em fusão nuclear não deve ser visto como luxo acadêmico, mas como ação essencial para a soberania energética e tecnológica nacional. Para que o país possa ocupar posição mais protagonista em um mercado energético em transformação, torna-se imprescindível construir políticas de longo prazo, fortalecer instituições científicas, reter talentos e estimular parcerias internacionais que transcendam a mera importação

de tecnologia. Somente assim a fusão nuclear poderá se consolidar como vetor de desenvolvimento, e não mais uma evidência de atraso estrutural que mantém o Brasil atrasado no novo ciclo industrial global.

7. REFERÊNCIAS

ANE NERGIA-NUCLEAR.NET. *O projeto de fusão nuclear ITER.* Disponível em: https://pt.energia-nuclear.net/que-e-a-energia-nuclear/fusao-nuclear/projeto-iter#google_vignette

TOSCHI, R. Nuclear fusion, an energy source. Fusion Engineering and Design, v. 36, n. 1, p. 1–8, 1997. DOI: 10.1016/S0920-3796(97)00007-0

AREND, Marcelo; FAGOTTI, Vinicius Zuniga; GUERRERO, Glaison Augusto; FONSECA, Pedro Cezar Dutra; BICHARA, Julimar da Silva. Development strategies and path dependence: Institutional elements for making sense of Brazil's falling behind and South Korea's forging ahead. PSL Quarterly Review, v. 76, n. 305, p. 155-180, 2023. DOI: 10.13133/2037-3643/15622.

BRADSHAW, A. M.; HAMACHER, T.; FISCHER, U. Is nuclear fusion a sustainable energy form? Fusion Engineering and Design, v. 86, n. 9-11, p. 2770-2773, 2011. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2010.11.040.

DE TEMMERMAN, G. The helium bubble: Prospects for ^{3}He-fuelled nuclear fusion. Joule, [s.l.], v. 5, n. 11, p. 2878–2897, 2021. Disponível em: https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(21)00207-5

FERREIRA, Fabiana; CAMACHO, Ramiro; GUIMARÃES, Rodrigo. Percepção dos impactos socioambientais da implantação de parques eólicos na comunidade de Ponta do Mel, Areia Branca/RN. Geosul, Florianópolis, v. 34, n. 73, p. 262-279, set./dez. 2019. Disponível em: https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/1982-5153.2019v34n73p262

MISHRA, A. K.; ANITHA, G. S. Nuclear Fusion Reactor – A Review Study. International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD), v. 4, n. 3, p. 690-695, Apr. 2020. ISSN 2456-6470.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

MOHAMED, M.; et al. Global development and readiness of nuclear fusion: overview of major programs including ITER. Sustainability, Basel, v. 16, n. 10, p. 4089, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16104089

MOHAMED, M. Global development and readiness of nuclear fusion for net-zero energy systems. Sustainability, Basel, v. 16, n. 10, p. 1-18, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16104089

PIVETTA, Marcos. Cerca de 90 reatores de fusão nuclear funcionam no mundo: três dessas máquinas experimentais, de pequeno porte, operam no Brasil. Revista Pesquisa FAPESP, edição 324, fev. 2023. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/cerca-de-90-reatores-de-fusao-nuclear-funcionam-no-mundo

PIVETTA, Marcos. Nuclear fusion experiment produces more energy than it consumes for the first time: The result achieved in the USA is a milestone, but there is still a long way to go to master the technology. Revista Pesquisa FAPESP, n. 324, fev. 2023. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/en/nuclear-fusion-experiment-produces-more-energy-than-it-consumes-for-the-first-time/

PLANAS, Oriol. O projeto de fusão nuclear ITER. pt.energia-nuclear.net, 06 maio 2014. Disponível em: <https://pt.energia-nuclear.net/que-e-a-energia-nuclear/fusao-nuclear/projeto-iter\>. Acesso em: 27 nov. 2025.

U.S. Department of Energy. Press Conference: Secretary Granholm & DOE leaders Announced Fusion Breakthrough by DOE National Lab. Youtube, 13 de dezembro de 2022. 33min32s. Disponível em: <https://youtu.be/K2ktAL4rGuY?t=1117>. Acesso em: 27 de dezembro de 2025.

ZYLSTRA, A. B.; HURRICANE, O. A.; CALLAHAN, D. A. et al. Burning plasma achieved in inertial fusion. Nature, London, v. 601, p. 542-548, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-021-04281-w

8. USO DE IA GENERATIVA E AVISO DE RESPONSABILIDADE

Em conformidade com a Resolução Unesp n° 13, de 22 de abril de 2025, os autores declaram o uso do ChatGPT-5 para ajuda na elaboração dos parágrafos, com uso principal voltado a melhora da escrita, fluidez e revisão gramatical. Os autores são os únicos responsáveis pelo material contido neste ensaio.

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ÁREAS REMOTAS POR MEIO DE MICRO USINAS HIDRELÉTRICAS

Arthur Frade Polilo
Engenharia Elétrica
arthur.frade@unesp.br

Diego Bachion Borges
Engenharia Elétrica
diego.bachion@unesp.br

Kalebe Chaves Freire
Engenharia Civil
kalebe.freire@unesp.br

Resumo. *Este ensaio analisa a viabilidade das Micro Usinas Hidrelétricas (MUH) como solução estratégica para a geração distribuída sustentável, especialmente em áreas remotas. O estudo compara tecnicamente as turbinas Francis e Michel-Banki, defendendo a tese de que, embora a Francis seja mais eficiente, a Michel-Banki apresenta melhor relação custo-benefício e robustez para pequenos aproveitamentos a fio d'água. A análise econômica demonstra a atratividade dos projetos através do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, destacando-se a redução drástica do tempo de retorno do investimento quando as MUHs são integradas a redes de abastecimento de água para substituir válvulas redutoras de pressão. Por fim, abordam-se os aspectos éticos e sociais, concluindo que, apesar do baixo impacto ambiental comparativo, a implementação bem-sucedida exige governança justa e o uso de metodologias de avaliação integrada para evitar conflitos comunitários e garantir a democratização do acesso à energia.*

Palavras-chave: *MUH, Hidrelétrica, Micro Usina, Michel-Banki, Francis; Viabilidade; Impactos socioambientais.*

1. INTRODUÇÃO

A microgeração de energia hidrelétrica refere-se à geração de eletricidade em pequena escala, com capacidade abaixo de 75 kW, utilizando quedas de água de corpos hídricos como rios, córregos ou canais para acionar turbinas. Essa abordagem é ideal para residências, fazendas ou comunidades isoladas, aproveitando recursos hídricos locais sem a necessidade de grandes barragens e, comumente, sem sequer utilizar barragens (TORRES, 2020).

Essa tecnologia permite a autossuficiência energética, reduzindo drasticamente o consumo da rede elétrica convencional. Os usuários podem gerar sua própria eletricidade, gerando economia nas contas de luz superiores a 50%, dependendo do sistema e da queda de água disponível, além de promover independência energética e estabilidade em regiões remotas ou com flutuações na rede. Somado a isso, é uma fonte renovável e limpa, com emissões de carbono praticamente nulas durante a operação, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. No entanto, exige planejamento para minimizar impactos ambientais, como alterações no ecossistema aquático ou sedimentação. Quando bem projetada, é altamente sustentável, com vida útil longa (até 50 anos) e baixa manutenção, utilizando água de forma cíclica sem consumo excessivo.

Comparada a fontes como solar ou eólica, a micro usina hidrelétrica (MUH) oferece geração contínua e previsível, não dependendo de condições climáticas variáveis, o que a torna mais confiável em áreas com fluxo hídrico constante. Enquanto painéis solares são mais acessíveis em instalações urbanas, a MUH destaca-se em regiões rurais ou montanhosas, acelerando a transição para energias renováveis, especialmente em países com abundância de corpos hídricos, como o Brasil.

2. ATUAL ESTADO TECNOLÓGICO DAS MICRO USINAS HIDRELÉTRICAS

2.1. Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento de micro usinas hidrelétricas (MUH) se baseia no Fio D'água (*Run-of-River*). Como característica típica, no sistema de microgeração é comumente construído com ausência de grandes barreiras ou reservatórios significativos, ou seja, em vez de inundar vastas áreas o projeto desvia apenas uma parcela do fluxo do rio, utilizando a queda natural do terreno para gerar energia e ao fim, devolve a água ao leito original a jusante (COGECOM, 2024). Isto é extremamente vantajoso do ponto de vista ambiental, pois a usina irá utilizar um espaço mínimo para que o volume de água passe pela turbina e converte a eletricidade, causando impactos mínimos, e talvez até nulos, no ambiente ao seu redor, não interferindo na fauna e flora local, como comumente ocorre com a presença de barreiras para aumentar o volume de água para o gerador.

A principal vantagem da MUH, e o pilar de sua viabilidade operacional, é a capacidade de fornecer energia firme de forma constante, 24 horas por dia. Ao contrário da energia solar (que é intermitente), a MUH é ideal para suprir cargas de base críticas em propriedades rurais (como sistemas de resfriamento, bombas e iluminação noturna), proporcionando uma segurança energética muito superior.

Além da aplicação convencional em cursos d'água naturais, micro usinas hidrelétricas também podem ser integradas a sistemas hidráulicos já existentes, como redes de distribuição de água. Nesses sistemas, onde normalmente são instaladas válvulas redutoras de pressão (VRP) para controlar níveis de pressão ao longo da tubulação, torna-se possível substituir esses dispositivos por turbinas do tipo Cross-Flow. Nessas configurações, a turbina assume simultaneamente o papel de controle de pressão e de conversão de energia hidráulica em energia elétrica, aproveitando um recurso que seria dissipado como perda. Essa possibilidade amplia o escopo de aplicação das MUH e permite que a geração de energia ocorra mesmo em locais sem quedas naturais ou leitos de rio, trazendo benefícios energéticos e operacionais para concessionárias e propriedades que operam sistemas pressurizados.

2.2. Princípio de operação

A potência da MUH é determinada pela conversão da energia potencial e cinética da água em energia mecânica, que é então convertida em eletricidade pelo gerador.

O princípio fundamental de operação de qualquer MUH é a maximização da Potência Mecânica (P_{mec}), que depende diretamente da Vazão (Q) e da Queda Líquida ($H_{líq}$).

Para verificar se é viável a implementação de uma MUH no local, deve-se atentar a, principalmente, estas duas variáveis fundamentais. Um estudo hidrológico deve ser considerado para aferir a vazão Q do corpo hídrico, de forma que seu desempenho seja determinado no longo prazo (ou seja, a vazão de projeto deve ser constante e exceder a vazão do corpo hídrico em mais de 90% do tempo, conforme Eq. 1). Além disso, a queda líquida é igualmente relevante. É determinada a partir da queda bruta (altura real da queda da água) subtraída de perdas de carga no sistema hidráulico, tais como conexões curvas, desvios, entre outros (Eq. 2).

$$Q_{proj} > Q_{90\%} \qquad (1)$$

$$H_{líq} = H_{bruta} - H_{perdas} \qquad (2)$$

2.3. Turbinas hidráulicas

Nesta seção, busca-se comparar duas turbinas destinadas a microgeração, e até para minigeração (ou seja, geração até 5 MW): turbina Francis e turbina Michel-Banki. Ambas possuem suas vantagens e desvantagens, mas de forma geral, a turbina Francis é destinada a projetos maiores, em que há maior orçamento e necessidade de máxima eficiência, enquanto a turbina Michel-Banki é direcionada para o custo-benefício, possuindo boa eficiência, mas que não é necessariamente a máxima possível, sendo mais simples e voltada para geração própria.

2.3.1. Turbina Francis

A turbina Francis é uma máquina hidráulica de reação com fluxo radial-axial, ou seja, a água entra radialmente e sai axialmente. Desenvolvida originalmente por James Bicheno Francis em 1847 e aperfeiçoada subsequentemente, é utilizada em muitas usinas hidrelétricas de grande porte (como Itaipu e Três Marias) devido à sua alta eficiência e versatilidade para uma ampla gama de vazões e alturas (ITAIPU BINACIONAL, 2023). Seu funcionamento caracteriza-se por (LOPES JACONDINO *et al.*, 2013):

1. Entrada de água: Sob pressão, a água entra por um duto circular de seção decrescente denominado voluta;
2. Distribuição: Um conjunto de pás estáticas (distribuidor) desvia a água para o rotor central;
3. Passagem pelo rotor: A água atravessa a parede lateral do rotor, empurrando um conjunto de pás;
4. Saída: A água sai pela base do rotor com pressão e velocidade muito reduzidas;
5. Conversão de energia: A água entra radialmente e é orientada para sair axialmente.

A Francis caracteriza-se ainda por possuir uma coroa de aletas que constituem uma série de canais hidráulicos capazes de receber água radialmente e orientá-la para saída em direção axial (LOPES JACONDINO *et al.*, 2013).

Em termos de custo, artigos e estudos não abordam de maneira explícita os valores. Entretanto, é deixado bem explícito que a turbina Francis é muito mais cara em relação a outras turbinas, sendo muitas ordens de grandeza mais caras que as do tipo Michel-Banki. Isso se deve ao fato de esta turbina se justificar em aplicações de alta potência, o que exige obras civis e equipamentos mais robustos e complexos. Além disso, essa turbina é uma peça fundida e usinada de alta precisão,

o que a encarece por si só. Somado à mão de obra especializada, sistema de controle e proteção e outros subsistemas, os custos são proibitivos para projetos de menor escala, como comunidades ou fazendas.

Apesar disso, sua eficiência é indiscutivelmente elevada. Dados sugerem que a turbina Francis demonstra eficiência próxima a 95% a depender do ângulo de ataque da água e da espessura das pás da turbina (SINAGRA *et al.*, 2014), conforme ilustrado na Fig. 1, em que é mostrado como diferentes perfis de ângulos de ataque afetam a eficiência.

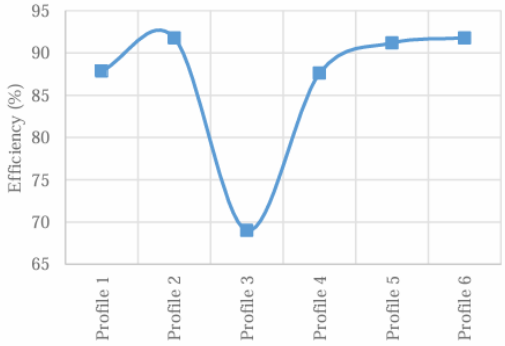

Figura 1. Eficiência versus perfil de distribuição do ângulo da lâmina (SHRESTHA *et al.*, 2018).

Mais ainda, a turbina mantém este rendimento elevado mesmo com variações no fluxo de água, graças a componentes como a voluta e as palhetas-guia que distribuem a água uniformemente para o rotor, garantindo operação eficiente em diferentes condições. A eficiência típica pode chegar a 90% ou mais em vazões variadas, dependendo do ajuste das pás-guias e da velocidade do rotor. É importante destacar que isto não se aplica a turbinas Francis convencionais, pois estas perdem muito a eficiência com a oscilação da vazão e trabalho fora da faixa de vazão especificado no projeto (HECKELSMUELLER, 2015). Para que essa eficiência elevada se mantenha, mesmo com vazões variáveis, é necessário o uso de conversores de frequência entre o gerador e a rede. Dessa forma, a estabilidade e eficiência serão mantidos, enquanto a potência oferecida pela turbina naturalmente varia de acordo com a vazão. Na Fig. 2, são mostradas curvas de eficiência de diferentes tipos de turbina.

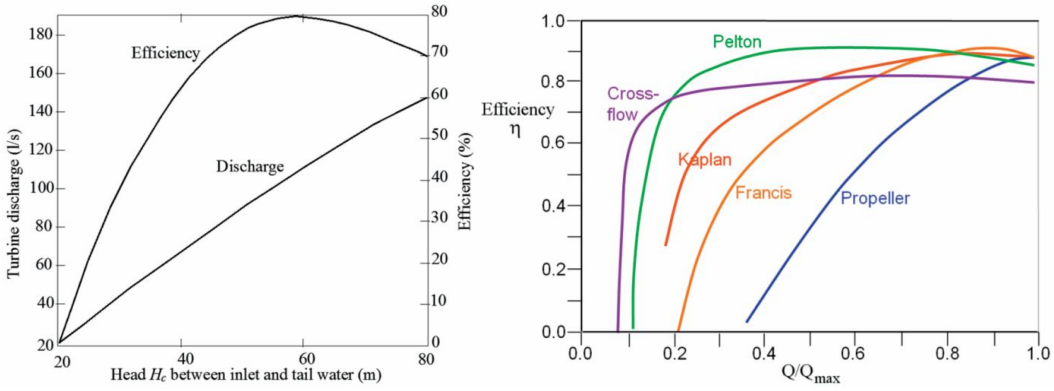

Figura 2. Curvas características e de eficiência de turbinas genéricas e eficiência em função da vazão para diferentes tipos de turbinas (SINAGRA *et al.*, 2014).

2.3.2. Turbina Michel-Banki

A turbina Michel-Banki é uma turbina de fluxo cruzado (ação e reação), também chamada de *cross flow,* ou seja, a água atravessa o rotor duas vezes. Na Fig. 3 são mostrados dois protótipos deste tipo de turbina. Basicamente, em seu funcionamento a água entra no rotor por um injetor, atravessa as pás, passa pelo centro vazio do rotor e, em seguida, atravessa as pás uma segunda vez na direção oposta, antes de sair. Ela trabalha parcialmente por ação (no primeiro estágio) e parcialmente por reação (no segundo estágio).

Diferentemente da turbina Francis, a Michel-Banki é mais simples e oferece como ponto forte uma excelente relação custo/benefício para a geração de energia, especialmente em locais próximos a bombas ou outros consumidores de energia. Assim, ela se destaca pela simplicidade de construção, baixo custo e boa eficiência (geralmente acima de 80%) mesmo com variações consideráveis na vazão. Por essa razão, é adequada para projetos de geração de energia em locais rurais, pequenas comunidades e para usos onde a disponibilidade de água flui de forma intermitente ou pouco constante (SINAGRA *et al.*, 2014; JUNIOR, 2021).

Outro ponto vantajoso de turbinas do tipo *cross flow* é o processo de "autolimpeza" que sua construção proporciona: o fluxo de água, ao sair, ajuda a limpar o rotor de pequenos detritos e sujidades (como areia, grama ou folhas), prevenindo perdas que ocorreriam em outros tipos de turbinas que são obstruídas mais facilmente (SINAGRA *et al.*, 2014).

Figura 3. Dois protótipos de turbina de fluxo cruzado (SAMMARTANO *et al.*, 2014).

Um quadro comparativo entre as turbinas Francis e Michel-Banki é apresentado na Tab. 1.

Tabela 1. Comparação entre as turbinas Francis e Michel-Banki

Característica	Michel-Banki (*Cross flow*)	Francis
Princípio	Fluxo cruzado (ação e reação) água atravessa o rotor duas vezes	Fluxo Misto/Radial (Reação) água entra radialmente e sai axialmente.
Complexidade e custo	Baixo Projeto simples, fácil fabricação e manutenção	Alto Projeto complexo, fabricação por fundição/usinagem de precisão
Faixa de aplicação	Pequenas Centrais (PCH's) e micro-geração Baixas a médias vazões	Grandes Centrais (UHE's e PCH's) Ampla faixa de vazões e alturas
Faixa de queda	Baixa e Média (~ 2 a 200 metros)	Média a Alta (~ 40 a 600 metros).
Eficiência	Moderada (pico ~ 80-90%) Possui naturalmente tolerância a vazões	Muito Alta (pico ~ 90-94%)
Construção do rotor	Simples pás retas de chapa metálica, montadas entre dois discos	Complexo pás curvas fixas, fundidas em uma única peça.
Retorno sobre investimento (para mesma capacidade)	Mais rápido	Mais lento

Fonte: elaboração autoral, 2025

2.4. Dimensionamento de uma turbina Michel-Banki

Considerando um trecho desviado de um rio que possui uma vazão média de 60 m^3/s, uma queda de apenas 2,5 metros e uma eficiência conservadora de 60% resultam em uma potência gerada próxima de 900W, como é calculado a partir da Eq. (3). Em termos práticos, com 900W é possível utilizar 6 lâmpadas de 5W (LED's), aparelho de som, rádio, ventilador, liquidificador e geladeira (180 L) e ainda ter alguma margem, a depender dos hábitos do consumidor.

$$P = \eta \rho g Q H \quad (3)$$

Para momentos de pouca ou excesso de chuva, em que a vazão de água é variável, inversores são comumente utilizados para manter a frequência de 60 Hz, frequência compatível com a rede elétrica brasileira. Reguladores de vazão também podem ser utilizados, mas aumentam a complexidade e custo do projeto.

3. ASPECTOS ECONÔMICOS DA IMPLEMENTAÇÃO

3.1. Legislação e normas

Para regulação e uso da energia gerada a partir dos recursos hídricos do país, a ANEEL define a Microgeração Distribuída como uma central geradora de energia elétrica com capacidade instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW. Este limite é o balizador econômico e regulatório crucial para projetos em fazendas (ANEEL, 2023).

Se o potencial hídrico do terreno (relação entre vazão e queda) permitir uma geração superior a 75 kW, o proprietário deve considerar as implicações dessa capacidade. Se o potencial técnico for, por exemplo, de 100 kW, o investidor enfrentará uma escolha:

- Limitar a geração: Instalar um inversor ou sistema de controle de carga dimensionado para, no máximo, 75 kW. Isso garante o enquadramento na microgeração, mesmo que o recurso hídrico não seja totalmente explorado em picos de vazão.
- Avançar para minigeração: Projetos com potência superior a 75 kW e menores ou iguais a 5 MW para fontes hídricas são classificados como minigeração distribuída.

A decisão de limitar a potência a 75 kW é frequentemente mais conveniente para simplificar o processo regulatório e evitar os custos de conexão mais onerosos associados à minigeração, em que o custo de instalação ou adaptação do sistema de medição é de responsabilidade do interessado (ENERGÊS, 2024). Ao mesmo tempo, restringir a geração a uma demanda inferior ao potencial energético do trecho do corpo hídrico proporciona segurança para a geração, pois em épocas em que haja menor precipitação e o volume do corpo hídrico baixe, a conversão de energia se manterá a mesma ou próxima do seu máximo potencial, em decorrência da limitação prévia a uma demanda menor.

Para viabilizar economicamente este método de geração energia no Brasil, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) é o mecanismo que permite a instalação e proveito das micro usinas. Este sistema é destinado a consumidores no ambiente regulado (cativos) que geram eletricidade para seu próprio consumo.

Para maximizar o aproveitamento das micro usinas, o excedente de energia (em kWh) gerado pela MUH é injetado na rede da distribuidora e transformado em créditos de energia. Estes créditos podem ser usados para abater o consumo futuro na mesma unidade ou em outras unidades consumidoras do mesmo titular (desde que cumpram as regras de vedação de comercialização). A natureza de geração firme da MUH confere uma vantagem estratégica ao sistema de compensação, pois a usina gera eletricidade de forma consistente 24 horas por dia, maximizando a compensação do consumo de base da propriedade (eletrodomésticos, bombas, iluminação noturna), o que proporciona maior previsibilidade na redução da fatura de eletricidade (ENERGÊS, 2024).

Ainda sobre as restrições deste modelo de geração de energia, é válido destacar que, conforme estabelecido na Lei 14.300/2022 e fiscalizado pela ANEEL, é proibido dividir uma central geradora em unidades menores para se qualificar para os limites de micro ou minigeração. A agência publica ofícios contendo casos concretos de configurações que foram consideradas proibidas, alertando o setor para a necessidade de conformidade na estruturação do projeto (ANEEL, 2023). Somado a isso, a concessionária local é a responsável técnica pelo sistema de medição, devendo arcar também com os custos de sua instalação.

3.2. Viabilidade Regulatória e Ambiental

O modelo de micro usinas hidrelétricas com pequeno reservatório apresenta, em geral, uma viabilidade ambiental superior em comparação com empreendimentos de médio e grande porte, pois o impacto territorial e a alteração da dinâmica natural do rio tendem a ser significativamente menores. Contudo, a viabilidade regulatória exige certo rigor. Um exemplo disso é o processo de outorga de uso da água, no qual o proprietário deve solicitar autorização ao órgão competente, demonstrando que considerou a vazão ecológica, entendida como a quantidade mínima de água que deve permanecer no curso d'água para manter o equilíbrio dos ecossistemas e garantir a preservação ambiental local. Além disso, há a conformidade da ANEEL, em que o projeto só é viável sob as regras de Microgeração Distribuída (até 75 kW) se o proprietário garantir a conformidade com as regras de conexão e se abster de fracionar o projeto para evitar os limites de potência.

3.3. Viabilidade Econômica

A viabilidade econômica de tais projetos depende de custos de implantação, despesas operacionais e receitas geradas, frequentemente analisadas em conjunto com os benefícios indiretos, especialmente quando a MCH é instalada em redes de distribuição de água.

3.3.1. Custos de implantação

Os custos de implantação de uma MUH envolvem o capital necessário para aquisição dos equipamentos eletromecânicos e a execução das obras civis. No caso de empreendimentos de pequeno porte, como a Microgeração Distribuída (até 75 kW), os custos totais podem ser significativos, especialmente se comparados aos benefícios diretos de geração em pequenas vazões.

Em um estudo de caso de instalação de microturbinas em uma rede de distribuição de água em substituição a válvulas redutoras de pressão, o investimento na turbina foi de 13.500,00 R$/kW (SOSNOSKI, 2015). No caso do projeto aqui discutido, o custo do equipamento seria R$ 12.150,00.

A estes valores deve ser somado o custo das obras civis, que, segundo SOSNOSKI (2015), podem dobrar o valor total da instalação. Esse impacto ocorre porque, em micro usinas hidrelétricas, a infraestrutura civil representa uma parcela significativa do investimento, mesmo quando os equipamentos são de pequeno porte. Obras como construção da casa de força, escavações, fundações, adequação da tubulação, válvulas de seccionamento, bases de concreto e intervenções no sistema hidráulico existente tendem a demandar mão de obra especializada e materiais de alto custo. Além disso, como essas intervenções precisam ser executadas garantindo a continuidade operacional da rede de água, os procedimentos costumam ser mais complexos e onerosos. Assim, mesmo em projetos de baixa potência, o custo civil pode igualar ou superar o custo eletromecânico, conforme descrito pelo autor.

3.3.2. Custos de operação e manutenção (O&M)

Os custos anuais das MUH são considerados relativamente baixos, podendo ser estimado como uma porcentagem do investimento inicial. Estudos na área indicam que o custo anual de O&M pode variar de 4% a 6% do investimento total (SOSNOSKI, 2015).

3.3.3. Receita gerada

A receita gerada por uma MUH no Brasil provém principalmente do sistema de compensação de energia elétrica.A energia gerada pelo empreendimento é compensada na fatura do consumidor/proprietário da microgeração, que injeta a energia ativa na rede da concessionária local (empréstimo gratuito) e a compensa com o consumo da mesma unidade ou em outra unidade de mesma titularidade (CPF ou CNPJ). O retorno financeiro é, portanto, proveniente do abatimento do consumo de energia calculado com base no preço pago pelo consumidor final.

Quando a MUH utiliza a Turbina Michel-Banki como um dispositivo de controle de pressão em uma rede de distribuição de água, a diminuição da pressão leva a uma redução das perdas de água por vazamento nas tubulações.

A redução das perdas de água, por sua vez, resulta em um benefício financeiro significativo, que pode superar a receita obtida pela geração de energia. Tais ganhos são calculados multiplicando o volume de água que deixou de ser perdido pelo valor da água comercializada pela concessionária de água e esgoto.

Em um estudo de caso específico (SOSNOSKI, 2015), que considerava uma geração de aproximadamente 3 kW, e uma vazão e carga totais de 33L/s e 21m, respectivamente, o benefício da redução das perdas atingiu 45,41 R$/dia, enquanto a geração de energia gerou 21,04 R$/dia.

O payback simples é o tempo necessário para que o investimento inicial seja recuperado pela receita líquida gerada pelo investimento, sem levar em consideração a taxa de juros. Para empreendimentos de geração de pequena escala na Europa, um payback de 10 a 25 anos é geralmente aceito (SILVA, 2017). Este valor é próximo do tempo de vida útil dos equipamentos das MUH. No entanto, se bem mantidas, as turbinas e demais equipamentos podem ter sua vida útil estendida para valores próximos a 50 anos.

Entretanto, quando a MCH é integrada em redes de distribuição de água, aproveitando-se dos benefícios da geração de energia e da redução de perdas por vazamentos, o payback pode ser drasticamente reduzido. Em um caso de microgeração em rede de água de 3kW, o investimento inicial foi de R$78.651,00, resultando em um payback de 3,2 anos após o início da operação (SOSNOSKI, 2015).

Em um cenário de viabilidade focado na modernização de uma minicentral (onde o ganho da otimização é mais significativo em vazões inferiores à de projeto), obteve-se um payback de 5 anos (SOSNOSKI, 2015).

4. A DISCUSSÃO ÉTICA NA IMPLEMENTAÇÃO DAS MICRO USINAS HIDRELÉTRICAS

Os aspectos éticos centrais na implementação de micro usinas hidrelétricas (MUH) envolvem a justiça social, a participação comunitária e a sustentabilidade ambiental (GESEL, 2024).

Embora as MUH, frequentemente do tipo fio d'água, tendem a ter impactos ambientais e sociais mínimos em comparação com grandes projetos, a implementação levanta várias questões éticas e sociais (ESMAP, 2007; MELO, 2013).

Movimentos sociais e oposição política contra projetos hidrelétricos existem. Segundo a UNIDO e o ICSHP (2016), o conflito social é uma das barreiras possíveis para a implementação de MUH, em geral, ocorre uma assimetria de informação, onde a lacuna de dados entre desenvolvedores e a comunidade gera desconfiança, fazendo com que a comunidade se sinta excluída do planejamento do desenvolvimento hidrelétrico.

O Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento de Pequenas Centrais Hidrelétricas de 2016, produzido pela UNIDO e o ICSHP (2016), mostra alguns exemplos desenvolvimento de pequenas centrais hidrelétricas em todo o mundo. Em alguns desses exemplos, é identificado que a distribuição de custos e benefícios, que implica muitas vezes que a geração de hidroeletricidade é associada a externalidades negativas nas proximidades das usinas, enquanto as comunidades a jusante colhem a maioria dos benefícios. Há um desafio em equilibrar os riscos e benefícios percebidos pela comunidade.

Pode haver também expectativas desproporcionais por parte das comunidades locais em relação às compensações para remediar o subdesenvolvimento regional e a falta de serviços. É necessário clareza sobre os critérios para a identificação e tratamento dos "atingidos" pelo empreendimento.

O fator de questões e direitos indígenas pode ser citado como mais uma questão ética. Uma tese de doutorado na área de antropologia social realizada por Santos (2018), apresenta relatos de conflitos na região da Amazônia, onde micro usinas hidrelétricas (MUH) foram construídas com a ajuda de mão de obra indígena sob a promessa de fornecimento de energia para as comunidades, mas a energia gerada não era compartilhada, o que resultou em constantes reclamações e ações de oposição.

Além desses pontos, a necessidade de equilibrar as necessidades energéticas com a preservação ambiental é crucial, o que inclui a exigência de definição de uma vazão ecológica. É vital também evitar a destruição de valores e patrimônios culturais e de áreas de especial importância ecológica. Ignorar esses aspectos pode levar a atrasos ou bloqueios de projetos pelas comunidades afetadas. A implementação requer avaliações detalhadas e audiências públicas junto das comunidades desde as fases iniciais para maior transparência, considerando os impactos socioeconômicos, culturais e ambientais.

4.1. Metodologias da Avaliação Ambiental Integrada (AAI)

A busca por metodologias de Avaliação Ambiental Integrada (AAI) visa justamente conciliar os diferentes interesses envolvidos em projetos de implantação de MUH. A AAI é uma ferramenta que enfatiza o componente ambiental na etapa de prospecção de sítios com potencial hidroenergético na escala de bacia hidrográfica. A aplicação de avaliações integradas ajuda a definir o maior conhecimento dos limites aceitáveis entre os sítios de hidroenergia, os impactos socioeconômicos e a proteção da biodiversidade. Seu objetivo é avaliar os efeitos cumulativos e sinérgicos sobre os recursos naturais e as comunidades afetadas, buscando compatibilizar a geração de energia com a conservação da biodiversidade e a sociodiversidade. Para isso, a integração de informações qualificadas é considerada imperativa em estudos de potenciais hidrelétricos e é vista como o processo mais adequado para caracterizar o potencial energético e sua sustentabilidade. As metodologias de avaliação integrada combinam o uso de ferramentas de tecnologia da informação (em particular, sistemas de informações geográficas) e análises multicritérios.

O uso de geotecnologias, como o SIG, é fundamental para a integração de informações espaciais sobre topologia, rede hidrográfica, meio ambiente e meio antrópico (como áreas urbanizadas e infraestrutura), o que permite consultas mais transparentes e análises mais detalhadas desde as fases iniciais dos estudos.

O protocolo de avaliação de sustentabilidade hidroenergética feito pela *International Hydropower Association* (IHA, 2010), recomenda o uso de abordagens multicritérios. O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) é um dos modelos mais populares e eficazes para tratar problemas complexos com múltiplos critérios conflitantes. O problema é estruturado em uma hierarquia que inclui a meta (priorização de projetos), critérios e subcritérios. Para projetos hidrelétricos, critérios chaves propostos incluem fatores técnicos, econômico-financeiros, sociais e ambientais.

O AHP permite que as regras de decisão sejam definidas por meio de ponderações dos critérios entre os envolvidos (*stakeholders*), utilizando comparações par a par (*pairwise comparisons*) e análises de sensibilidade. A inclusão desses fatores e a participação dos intervenientes desde a fase de prospecção buscam evitar conflitos posteriores decorrentes de assimetrias de informações.

Segundo uma pesquisa feita por Melo (2013), a estrutura da decisão de priorização de projetos hidrelétricos é dividida em quatro grupos principais de fatores, sendo dois deles, os fatores sociais e fatores ambientais cruciais, cada um com um peso inicial de 0,244 na hierarquia de critérios proposta. Os fatores sociais buscam antecipar o conhecimento dos impactos sociais para evitar custos e conflitos posteriores. Muitos desses subcritérios podem ser quantificados com o apoio de mapas georreferenciados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Na Tab. 2 e Tab 3 são apresentados os principais subcritérios para a priorização de potenciais hidrelétricos (Melo, 2013). No contexto ambiental, a estimativa da cota de inundação é um ponto chave para a avaliação preliminar. A inclusão e a ponderação de todos esses critérios, por meio do AHP, permitem que a decisão seja baseada em fatores que vão além do mero custo-benefício econômico e técnico (MELO, 2013). Importante destacar que os critérios apresentados por Melo (2013) foram propostos para grandes projetos, mas que podem ser adaptados no contexto de microgeração hidrelétrica.

Tabela 2 - Fatores Sociais utilizados no AHP (adaptado de Melo, 2013).

Fatores Sociais	**Tipo de Avaliação**	**Peso Inicial**	**Detalhes sobre a Consideração**
Aceitação da Comunidade Local (C1)	Qualitativo	0,231	O conhecimento dos fatores sociais deve ser previsto antecipadamente. A clareza da informação e a discussão dos impactos facilitam a aceitação da sociedade ainda na fase de estimativa, muitas vezes através de questionários ou processos de participação pública.
Aceitação da Sociedade (atores) (C2)	Qualitativo	0,264	Reflete o impacto direto e indireto dos atores intervenientes (*stakeholders*), cuja participação é crucial para a tomada de decisão.
População Atingida por Barragem (C3)	Quantitativo (G - SIG)	0,094	Quantificação de áreas urbanizadas atingidas, realizada por meio de relações topológicas em ambiente SIG, traçando o polígono de inundação.
Interferência com Sistemas de Transporte (C4)	Quantitativo (G - SIG)	0,083	Avalia conflitos com rodovias, ferrovias e áreas aeroportuárias causados pelo polígono de inundação.
Interferência com Culturas Agrícolas (C5)	Quantitativo (G - SIG)	0,131	Identifica conflitos ao cruzar o polígono de inundação com mapas de uso e ocupação do solo.
Interferência com Terras Produtivas (C6)	Quantitativo (G - SIG)	0,131	Identifica conflitos com áreas produtivas afetadas.
Alteração da Navegação Fluvial (C7)	Qualitativo	0,067	Avalia a alteração das práticas de navegação, incluindo o transporte e a pesca artesanal ou de subsistência, causada pela construção do barramento.

Tabela 3 - Fatores Ambientais utilizados no AHP (adaptado de Melo, 2013).

Fatores Ambientais	**Tipo de Avaliação**	**Peso Inicial**	**Detalhes sobre a Consideração**
Área Inundação máxima do reservatório (D1)	Quantitativo (G - SIG)	0,084	O SIG possibilita a rápida definição do polígono de inundação, que fornece a informação da área do espelho d'água.
Interferência com Unidades de Conservação (D2)	Quantitativo (G - SIG)	0,293	Permite a rápida seleção por locação de todas as UCs afetadas por meio de análises topológicas em SIG. Este é o subcritério mais pesado dentro dos Fatores Ambientais.
Alagamento de Assentamentos do INCRA (D3)	Quantitativo (G - SIG)	0,064	Identificação e quantificação de áreas de assentamento de comunidades afetadas pelo polígono de inundação.
Alagamento de Terras Indígenas e Quilombolas (D4)	Quantitativo (G - SIG)	0,103	Quantificação de áreas de conflitos com terras indígenas e quilombolas.
Probabilidade de Estratificação (D5)	Qualitativo	0,038	Observada por especialistas com base nas características morfológicas (profundidade média) e hidrológicas (tempo de residência da água).
Probabilidade de Eutrofização (D6)	Qualitativo	0,038	Relacionada à estratificação e ao nível trófico do ambiente.
Alteração Diversidade das Espécies de Peixe (D7)	Qualitativo	0,121	Requer pesquisas de campo, avaliação biológica e informações cruzadas com registros cadastrais.
Vestígios Arqueológicos (D8)	Qualitativo	0,180	Informações a serem implementadas no modelo AHP de forma qualitativa, diante da possível inexistência de indicadores ou mapas.
Alteração da Pesca Artesanal e de Subsistência (D9)	Qualitativo	0,079	Avalia as alterações nas práticas de pesca decorrentes do empreendimento.

4.2. Implicações Sociais

As principais implicações sociais das MUHs estão ligadas à democratização do acesso à energia elétrica, promovendo especialmente a eletrificação rural. Essa é uma tecnologia madura, economicamente viável e amplamente reconhecida como fonte de energia limpa. Tem contribuído significativamente para resolver o problema da eletrificação rural, melhorando as condições de vida e produção, promovendo o desenvolvimento econômico rural e aliviando a pobreza (UNIDO; ICSHP, 2016). As MUHs são uma solução promissora para o desenvolvimento inclusivo e sustentável, pois fornecem eletricidade acessível e eficiente a locais isolados e remotos. Do ponto de vista técnico, a geração distribuída, da qual as MUHs fazem parte, pode trazer benefícios como melhoria no nível de tensão e redução de perdas.

As comunidades podem sentir-se excluídas do planejamento do desenvolvimento hidrelétrico. Há também expectativas desproporcionais de comunidades locais em relação às compensações para remediar o subdesenvolvimento regional (UNIDO; ICSHP, 2016).

Um dos aspectos sociais mais críticos é a forma como o acesso à energia é prometido e gerenciado. Na região do Alto Rio Negro (Amazônia), micro usinas hidrelétricas (MUH) foram construídas pelo Exército em Pelotões Especiais de Fronteira (PEF), com a ajuda de mão de obra indígena, sob a promessa de fornecimento de energia para as comunidades (SANTOS, 2018). No entanto, a energia gerada frequentemente não era partilhada com as comunidades, ficando restrita aos pelotões militares. Isso gerou reclamações constantes e até ações de resistência dos indígenas, que argumentavam ter cumprido sua parte no acordo, chegando a determinar o desligamento da usina por não considerarem justo que ela produzisse energia somente para o Pelotão.

4.3 Implicações Geopolíticas e Políticas

Na Amazônia brasileira, a construção de MUHs está diretamente ligada às ações das Forças Armadas. A MUH foi construída em pelotões de fronteira no Alto Rio Negro, inicialmente com financiamento do Programa Calha Norte. O Exército utiliza a implantação dessas infraestruturas como parte da sua presença e expansão em áreas de fronteira, alinhadas à diretriz de interiorização das Forças Armadas. O fornecimento de energia elétrica (juntamente com escolas e apoio) é um apelo eficaz usado pelo Exército para convencer os moradores (SANTOS, 2018).

Nesse sentido, a MUH se torna um recurso valioso e a interação em torno do seu uso reflete uma assimetria de poder e a tensão política sobre o controle do território, especialmente quando a energia não é distribuída de maneira justa.O discurso militar, por vezes, associa a demarcação de terras indígenas em áreas de fronteira como uma ameaça à segurança nacional (SANTOS, 2018).

5. CONCLUSÃO

A análise das Micro Usinas Hidrelétricas (MUHs) evidencia que essa tecnologia ocupa um papel relevante no avanço da geração distribuída renovável, especialmente em regiões rurais ou afastadas dos grandes centros urbanos. Ao longo do estudo, ficou claro que as MUHs conciliam simplicidade construtiva, alta confiabilidade e impacto ambiental reduzido, sobretudo quando adotam o modelo de fio d'água e turbinas *cross flow* adequadas a baixas quedas, como a Michel-Banki. As comparações realizadas demonstram que, embora turbinas mais complexas, como a Francis, apresentem eficiências superiores, a relação custo-benefício e a robustez das turbinas *cross flow* as tornam particularmente adequadas para pequenos aproveitamentos.

Do ponto de vista operacional, a capacidade de geração firme (24 horas por dia, 7 dias por semana) coloca a microhidrelétrica à frente de fontes como solar e eólica em termos de regularidade e previsibilidade. Em complementação, a integração desse tipo de usina ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) possibilita reduções significativas na fatura de energia e amplia a autonomia do produtor rural, ao mesmo tempo em que reforça a segurança energética da propriedade.

A viabilidade econômica demonstrou-se fortemente dependente do contexto de aplicação. Em cenários onde a MUH substitui válvulas redutoras de pressão em redes de abastecimento de água, o benefício adicional da redução de perdas eleva substancialmente o retorno do investimento, reduzindo o *payback* para valores muito inferiores ao observado em modelos convencionais de microgeração. O duplo benefício de geração elétrica e diminuição de vazamentos de água representa uma oportunidade concreta para municípios, indústrias e concessionárias de saneamento básico.

Ainda assim, a análise ética e social revelou desafios importantes. A aceitação comunitária, a clareza das informações, a distribuição equitativa dos benefícios e a prevenção de conflitos tornam-se elementos indispensáveis para a implementação bem-sucedida dessa tecnologia. Casos como o observado no Alto Rio Negro mostram que, sem governança adequada e partilha justa, mesmo tecnologias sustentáveis podem gerar frustrações e sentimentos de injustiça. Assim, metodologias como a Avaliação Ambiental Integrada (AAI) e o uso de SIG e AHP fornecem ferramentas essenciais para escolhas mais equilibradas, transparentes e participativas.

Dessa forma, conclui-se que as micro usinas hidrelétricas representam uma solução madura, eficiente e sustentável para a diversificação da matriz elétrica brasileira e para a democratização do acesso à energia. Quando adequadamente

planejadas, tanto do ponto de vista técnico quanto socioambiental, elas têm potencial para impulsionar o desenvolvimento regional, fortalecer a resiliência energética e contribuir de forma significativa para a transição energética nacional.

6. REFERÊNCIAS

BNAMERICAS – DESTAQUE: PERSPECTIVAS PARA PEQUENAS E MINI HIDRELÉTRICAS NO BRASIL. - COGECOM - COOPERATIVA DE ENERGIA. [*S. l.: s. n.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://cogecom.com.br/perspectivas-para-pequenas-e-mini-hidreletricas-no-brasil/. Acesso em: 30 out. 2025.

COMO CALCULAR A POTÊNCIA HIDRELÉTRICA - ENERGÊS. [*S. l.: s. n.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://energes.com.br/potencia-energia-hidreletrica-como-calcular/. Acesso em: 30 out. 2025.

INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. Hydropower Sustainability Assessment Protocol. London: IHA, 2010.

JUNIOR, A. A turbina de fluxo. [*S. l.: s. n.*], 2021. Disponível em: http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/A%20turbina%20de%20fluxo/A%20turbina%20de%20fluxo%20.htm. Acesso em: 31 out. 2025.

LOPES JACONDINO, A.; VARGAS DA CUNHA, M.; ROGÉRIO, C.; AGUIAR, G. CONTROLADOR DE VELOCIDADE APLICADO A UMA TURBINA HIDRÁULICA DE FLUXO CRUZADO. Revista Brasileira de Energias Renováveis, [*s. l.*], v. 2, n. 4, 2013. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/34391. Acesso em: 30 out. 2025.

MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA — AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. [*S. l.: s. n.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/acesso-a-informacao/perguntas-frequentes/micro-e-minigeracao-distribuida. Acesso em: 30 out. 2025.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PORTUGUÊS PORTUGUÊS. [*s. l.*], Disponível em: www.itaipu.gov.br. Acesso em: 30 out. 2025.

SANTOS, Fabiane Vinente dos. O arco e o fuzil: a convivência entre os Ye'pâ-Masa e os militares do Exército Brasileiro em Pari-Cachoeira, Noroeste Amazônico. 2018. Tese (Doutorado em Antropologia Social) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

SAMMARTANO, V.; MORREALE, G.; SINAGRA, M.; COLLURA, A.; TUCCIARELLI, T. Experimental Study of Cross-flow Micro-turbines for Aqueduct Energy Recovery. Procedia Engineering, [*s. l.*], v. 89, p. 540–547, 2014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814025910?getft_integrator=clarivate&pes=vor&utm_source=clarivate. Acesso em: 29 out. 2025.

SHRESTHA, U.; CHEN, Z.; CHOI, Y. Do. Study on the effect of the runner design parameters on 50 MW Francis hydro turbine model performance. Journal of Physics: Conference Series, [*s. l.*], v. 1042, n. 1, p. 012006, 2018. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1042/1/012006. Acesso em: 31 out. 2025.

SINAGRA, M.; SAMMARTANO, V.; ARICÒ, C.; COLLURA, A.; TUCCIARELLI, T. Cross-flow Turbine Design for Variable Operating Conditions. Procedia Engineering, [*s. l.*], v. 70, p. 1539–1548, 2014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001726?via%3Dihub. Acesso em: 29 out. 2025.

SILVA, J. A. L. Avaliação técnica-econômica de minicentrais hidrelétricas operando a velocidade variável utilizando conversores de potência [manuscrito]. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2017. Acesso em: 31 out. 2025.

SOSNOSKI, A. S. K. B. Produção de energia por mini e micro hidrelétricas na rede de distribuição de água. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Acesso em: 31 out. 2025.

TORRES, W. AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA MICROTURBINA INSTALADA EM TUBULAÇÕES DE ÁGUA EM SISTEMAS AGROINDUSTRIAIS. [*s. l.*], 2020. Acesso em: 30 out. 2025.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION (UNIDO); INTERNATIONAL CENTER ON SMALL HYDRO POWER (ICSHP). **World Small Hydropower Development Report 2016**. Vienna: UNIDO; Hangzhou: ICSHP, 2016.

7. USO DE IA GENERATIVA E DECLARAÇÃO DE AUTORRESPONSABILIDADE

Em conformidade com a Resolução Unesp n° 13, de 22 de abril de 2025, os autores declaram que o Gemini 2.5 e a Perplexity foram utilizados na pesquisa de fontes e revisão de textos, e que o resultado foi validado pelos autores. Os

autores declaram ainda que o NotebookLM foi utilizado para buscas comparativas entre fontes. Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste ensaio.

DESAFIOS E PERSPECTIVAS DA TECNOLOGIA DE PEQUENAS TURBINAS EÓLICAS NO CENÁRIO ENERGÉTICO ATUAL

João Vitor Hirotsug Tanno
Engenharia mecânica
jvh.tanno@unesp.br

Murillo Kendy Takeshita
Engenharia de produção mecânica
murillo.kendy@unesp.br

Resumo. *Neste ensaio acadêmico, a principal tese defendida pelos autores é o potencial da aplicação de pequenas turbinas eólicas, principalmente para uso urbano. Há diversos pontos positivos para o desenvolvimento dessa tecnologia pouco explorada. Em contrapartida, também há diversos desafios a serem superados para tornar essa fonte de energia alternativa viável competitivamente. Os autores concluíram que, com investimento em tecnologia e desenvolvimento a partir de pesquisas, as pequenas turbinas eólicas para uso urbano podem trazer grandes benefícios ambientais, sociais e econômicos.*

Palavras-chave: *Pequenas turbinas eólicas, Small wind turbines, Small urban wind turbines, Energia renovável.*

1. INTRODUÇÃO

As turbinas eólicas para geração de energia elétrica já estão bem consolidadas como uma fonte renovável e novas tecnologias continuam a evoluir dia após dia. Porém, pequenas turbinas eólicas, ou como serão referidas ao longo do ensaio, *small wind turbines* (SWT), ainda são muito pouco estudadas. Uma revisão de literatura da base de dados *Scopus* apontou um elevado contraste entre a quantidade de pesquisas realizadas sobre "energia eólica" e "energia eólica urbana" (que utiliza as pequenas turbinas eólicas), conforme é possível observar na Fig. 1.

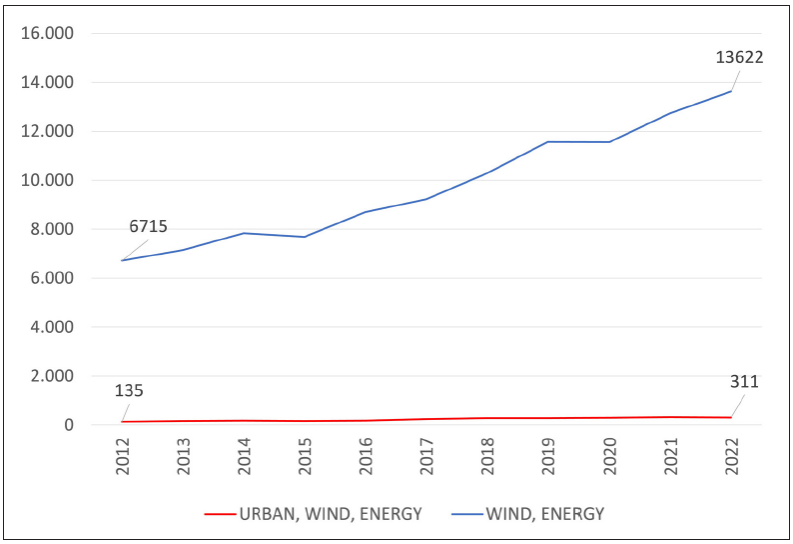

Figura 1. Número de publicações por ano sobre energia eólica (Tsionas et al. 2025).

A escassez de pesquisas sobre SWT´s se dá, principalmente, pelos diversos desafios existentes para essa tecnologia; por outro lado, também demonstra uma oportunidade de desenvolvimento.

2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Não há um consenso universal sobre a definição de pequena turbina eólica. A norma IEC 61400-2 define-as por área de rotor (até 200 m²), enquanto vários países e novos padrões dos EUA (ACP 101-1) consideram a potência nominal (até 150 kW). Essa falta de padronização reflete a ampla diversidade de aplicações, dimensões e contextos operacionais em que as SWT´s podem ser empregadas, desde zonas rurais isoladas até ambientes urbanos complexos.

As pequenas turbinas eólicas, às vezes chamadas também de pequenas turbinas eólicas urbanas, do inglês (SUWT´s, *small urban wind turbines*), são geralmente instaladas perto do local de consumo da carga (como residências, edifícios comerciais ou pequenas indústrias) e não em locais com recursos eólicos ideais. Consequentemente, elas operam em ventos de baixa velocidade e alta turbulência, levando a coeficientes de potência de pico mais baixos (0,25 a 0,40) em comparação com turbinas grandes (acima de 0,5) instaladas em locais com condições de vento adequadas. Esse contexto urbano impõe também desafios adicionais, como a interferência das construções e geometrias que distorcem o escoamento e impedem a previsibilidade do vento.

Considerando que as dimensões reduzidas das SWT´s e os ventos de baixa velocidade típicos do meio urbano resultam em números de Reynolds (Re) relativamente baixos (que podem gerar bolhas de separação laminar e reduzir a eficiência aerodinâmica), torna-se necessária uma seleção de perfis aerodinâmicos adequados para Re baixos visando maximizar o desempenho. Alguns estudos de otimização demonstram que pequenas variações geométricas nas pás podem melhorar substancialmente o coeficiente de potência e reduzir o ruído, o qual é um fator crítico em ambientes residenciais.

Tendo em vista tais baixas velocidades de ventos e alta turbulência, são utilizados sistemas rotativos tradicionais, compostos por 3 tipos principais ilustrados na Fig. 2: Turbina Eólica de Eixo Horizontal (HAWT, *Horizontal-Axis Wind Turbine*), Turbina Eólica de Eixo Vertical (VAWT, *Vertical-Axis Wind Turbine*) e Turbina Eólica com Duto de Aumento (DAWT, *Ducted-Augmented Wind Turbine*).

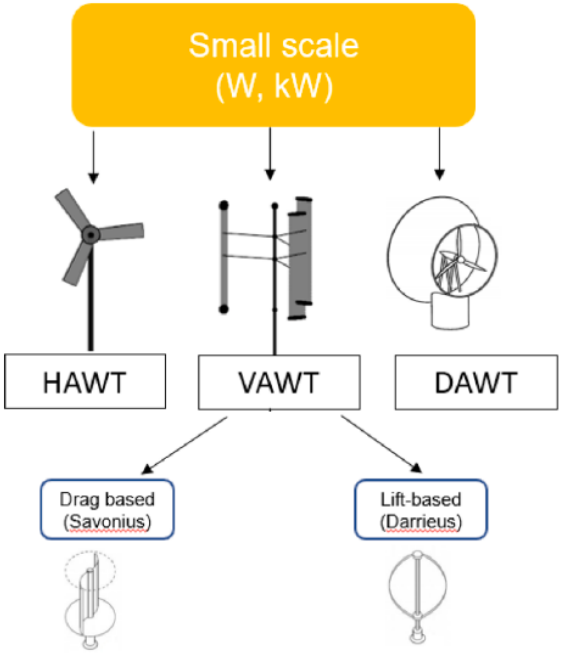

Figura 2. Sistemas rotativos tradicionais (adaptado de Calautit e Johnstone, 2023)

HAWT: é a mais estudada, com foco na otimização do design das pás para melhorar o desempenho em ventos fracos e minimizar o ruído aerodinâmico. O formato do edifício exerce um papel decisivo, já que as quinas afiadas, arredondadas ou equipadas com cercas podem alterar significativamente o comportamento da esteira e a eficiência da turbina. Dessa forma, a determinação da localização ideal é um ponto essencial para o aproveitamento energético.

VAWT: inclui os tipos Savonius (baseado em arrasto) e Darrieus (baseado em sustentação). As VAWT´s apresentam vantagens importantes para uso urbano, como insensibilidade à direção do vento e menor emissão sonora, além da possibilidade de utilizar a própria estrutura do edifício como difusor para aumentar o coeficiente de potência.

DAWT: utiliza uma cobertura ou duto ao redor das pás para aumentar a velocidade do vento incidente e, consequentemente, melhorar o coeficiente de potência. Simulações computacionais indicam que esse tipo de arranjo pode aumentar a eficiência em até 2,5 vezes, compensando as perdas causadas pela presença do edifício e pela turbulência

local. A incorporação de palhetas-guia no duto também tem se mostrado eficaz para controlar o escoamento e estabilizar a operação.

3. PONTOS POSITIVOS

Um dos principais benefícios da instalação de SWT´s é a redução de emissões locais, já que não contribuem com a poluição do ar e substituem outras fontes de energia não renováveis. Sua utilização pode ajudar a mitigar as mudanças climáticas por meio da redução de emissões e pela redução das perdas de energia na transmissão, aumentando também a resiliência energética do local.

Em termos de custos, algumas vantagens das pequenas turbinas são: baixo custo de operação e manutenção - 1 a 3% do investimento inicial - (BIANCHINI et al., 2022) e o baixo impacto ambiental nas cidades, como será desenvolvido a seguir.

4. IMPACTOS AMBIENTAIS

Do ponto de vista de qualidade do ar, as SUWT´s apresentam vantagens notáveis, pois não contribuem para o aumento das concentrações de poluentes. Na verdade, elas podem contribuir para melhorar a qualidade do ar ao substituir fontes de energia baseadas na queima de carvão, óleo ou gás, como caldeiras e geradores a diesel. Assim, sua adoção contribui diretamente para a redução das emissões de CO2 e de material particulado, promovendo ambientes urbanos mais saudáveis e, alinhando-se assim aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

Em relação ao microclima (condições atmosféricas de uma área restrita), os efeitos das pequenas turbinas eólicas diferem substancialmente daqueles observados em grandes parques eólicos. Enquanto grandes turbinas eólicas podem alterar as condições atmosféricas regionais, o impacto das SUWT´s na micrometeorologia local ainda não é bem compreendido. Estudos preliminares indicam que o efeito na população é insignificante, o que sugere uma integração harmônica entre essas tecnologias e o ambiente urbano (TSIONAS et al., 2024).

Outro aspecto relevante é a fauna urbana, um tema que vem ganhando importância na aceitação social das tecnologias de energia renovável. Embora esse tópico ainda não tenha sido amplamente investigado, estudos de turbinas não urbanas indicam riscos potenciais para aves e morcegos, especialmente em regiões de migração. A poluição sonora, mesmo em níveis relativamente baixos, pode gerar efeitos indiretos sobre a fauna, como estresse fisiológico, migração de habitat, alterações nos padrões reprodutivos e mudanças na comunicação acústica entre espécies (TSIONAS et al., 2024).

5. DESAFIOS

Apesar de possuir seus benefícios, a implementação das SUWT´s apresenta muitos desafios significativos além dos mencionados anteriormente (ventos de baixa velocidade e alta turbulência, baixos coeficientes de potência, geometria das construções). Dentre os principais desafios, estão: custos tipicamente mais altos, decorrentes da falta de otimização, que não diminuem proporcionalmente ao tamanho da implementação (comparados aos custos de turbinas eólicas de grande porte) e preocupações relacionadas a ruído, estética e segurança, que afetam, principalmente, a aceitação pública e o licenciamento.

No que se trata do ruído, a poluição sonora pode causar problemas de saúde como o incômodo sonoro (fonte de som percebida como irritante, ou mesmo visível), geralmente mais comum onde ruídos de fundo são baixos, e a intermitência e ritmo das SUWT´s causam grande incômodo. Do ponto de vista da segurança, embora ainda não existam muitas pesquisas sobre o efeito das SUWT´s na saúde, há preocupações de risco durante a instalação e a operação das pequenas turbinas, como o desprendimento de pás ou fragmentos ou a formação e quebra de gelo em climas frios. Já os efeitos visuais são os que podem tanto gerar obstruções visuais quanto incômodos quando se tratando da visibilidade das turbinas no ambiente urbano para aqueles em sua proximidade.

Com relação ao aspecto econômico, o custo total de instalação é um enorme desafio. Embora o custo por quilowatt instalado diminua até aproximadamente 50 kW, essa tendência se estabiliza porque as turbinas maiores se tornam estruturalmente mais complexas. O custo de aquisição representa cerca de 76% do investimento total, enquanto a engenharia e avaliação de recursos correspondem a apenas 1%, indicando que muitos projetos são implantados com avaliações mínimas de vento (BIANCHINI et al., 2022).

Ainda em relação aos custos, o alto Custo Nivelado de Energia (LCOE, Levelized Cost Of Electricity) é o principal obstáculo quando se trata de gastos, especialmente em comparação com a energia solar fotovoltaica. A fim de compensar essa desvantagem competitiva, alguns países tentam motivar o uso de SWTs por meio de incentivos fiscais. Como exemplo, o LCOE médio das SWT´s (após incentivos) nos EUA é de cerca de €0,20/kWh, muito acima das tarifas residenciais e do LCOE da energia solar fotovoltaica (entre €0,070/kWh e €0,17/kW); em estudos europeus, os valores são ainda mais altos. Esses dados demonstram a importância da redução dos custos de investimento para viabilizar a utilização das pequenas turbinas (BIANCHINI et al., 2022).

Do ponto de vista da aceitação pública, ou seja, da redução de ruído, da estética das SWT´s instaladas e sua segurança, é necessário que haja mais estudos e pesquisas em pequenas turbinas eólicas. Essas máquinas ainda apresentam lacunas significativas de desenvolvimento e otimização, principalmente se comparado ao desenvolvimento das turbinas de grande porte. Por exemplo, o uso de simulação aeroelástica é muito incomum entre os fabricantes de SWT´s, o que resulta na predominância de pás rígidas, com altos fatores de segurança, o que aumenta o peso, o custo e reduz a eficiência. Além disso, não há um arquétipo dominante de projeto. Diferentemente das turbinas grandes (três pás e operação contra o vento), as SWTs seguem múltiplos padrões, com base em metodologias simplificadas, que frequentemente resultam em turbinas superdimensionadas e mais caras, comprometendo a competitividade. Tais desafios geram oportunidades de melhorias no desenvolvimento de pequenas turbinas eólicas, como por exemplo:

- Mudanças no design e controle: Melhorias em aerodinâmica (para baixo Re), uso de modelagem aeroelástica.
- Dados abertos de experimentos de campo: Compartilhamento de dados de monitoramento (entre diversos locais e, consequentemente, tipos de vento) para melhorar as ferramentas de previsão e análise de falhas.
- Melhorias na instalação e manutenção: Redução dos custos de fundação e análise do ciclo de vida em ambientes diversos.
- Integração com sistemas de armazenamento: Desenvolver a integração com armazenamento para permitir que as SWT´s atuem como "prosumidores" (produtores e consumidores) e complementem a energia solar.
- Programas de incentivo e ações sociais: Criar incentivos entre países para promoverem economias favoráveis e realizar mais pesquisas sobre impactos ambientais (ruído, etc.) para melhorar a aceitação social.

6. CONCLUSÕES

Os estudos sobre as SWT´s evidenciam um enorme potencial dessa tecnologia para contribuir com a transição energética e a descarbonização das cidades. Contudo, seu desenvolvimento requer uma abordagem multidisciplinar que una avanços técnicos, planejamento urbano e políticas públicas.

Dessa forma, mais pesquisas são necessárias para entender possíveis interações entre fluxos de ar urbanos, conforto térmico e ventilação natural em torno dos edifícios equipados com SUWT´s, uma vez que a complexa dinâmica do vento em ambientes urbanos ainda representa um desafio para o desempenho e a confiabilidade desses sistemas.

Portanto, promover o uso de SUWT´s de forma planejada e responsável pode transformar o espaço urbano, impulsionando o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e consolidando as pequenas turbinas eólicas como um elemento estratégico para a resiliência energética, inovação tecnológica e qualidade ambiental nas cidades do futuro.

7. REFERÊNCIAS

ALAM, F.; JIN, Y. The Utilisation of Small Wind Turbines in Built-Up Areas: Prospects and Challenges. Wind 2023, 3, 418–438. DOI: https://doi.org/10.3390/wind3040024

BIANCHINI, A.; FERRARA, G.; CIULLI, E.; et al. Current status and grand challenges for small wind turbine technology. *Wind Energy Science*, v. 7, p. 2003–2037, 2022. DOI: https://doi.org/10.5194/wes-7-2003-2022

CALAUTIT, K.; JOHNSTONE, C. State-of-the-art review of micro to small-scale wind energy harvesting technologies for building integration. *Energy Conversion and Management: X 20 (2023) 100457*. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100457

TSIONAS, I.; LLAGUNO-MUNITXA, M.; & STEPHAN, A. (2025). Environmental effects of urban wind energy harvesting: a review. Buildings and Cities, 6(1), pp. 1–24. DOI: https://doi. org/10.5334/bc.491

TSIONAS, I. *et al*. Review of the environmental effects of deploying small wind turbines in cities. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S. l.], v. 1363, p. 012104, 2024. DOI: 10.1088/1755-1315/1363/1/012104.

8. USO DE IA GENERATIVA E AVISO DE RESPONSABILIDADE

Em conformidade com a Resolução Unesp n° 13, de 22 de abril de 2025, autores declaram que o Gemini 3 Pro foi utilizado na tradução dos artigos utilizados e que o resultado foi validado. Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste ensaio.

ENERGIA SOLAR NO BRASIL: DESAFIOS TÉCNICOS, VIABILIDADE ECONÔMICA E PERSPECTIVAS ÉTICAS DE UMA TRANSIÇÃO SUSTENTÁVEL

Aloisio Sabadin de Moura Filho
Engenharia elétrica
aloisio.sabadin@unesp.br

Maria Julia Gulla Magacho
Engenharia elétrica
gulla.magacho@unesp.br

Resumo. *A energia solar tem se consolidado como uma das principais alternativas para a diversificação e descarbonização das matrizes energéticas globais. Este ensaio defende a tese de que a energia solar, apesar de suas limitações técnicas e desafios econômicos, representa uma solução viável e eticamente necessária para a transição rumo a um modelo energético mais sustentável e justo. São analisados seus princípios de funcionamento, inovações tecnológicas e limitações, assim como a viabilidade econômica no contexto brasileiro, considerando políticas públicas, custos de implantação e retorno financeiro. Além disso, discutem-se os impactos ambientais, sociais e geopolíticos associados à expansão da fonte. Conclui-se que, embora não deva ser tratada como solução isolada, a energia solar constitui um eixo essencial de uma matriz diversificada, aliando eficiência tecnológica, competitividade econômica e responsabilidade socioambiental. Seu avanço depende da integração com outras fontes renováveis e de políticas que garantam acesso equitativo à geração distribuída, promovendo justiça energética e fortalecendo a soberania energética nacional.*

Palavras-chave: *Energia solar, Geração distribuída, Viabilidade econômica, Sustentabilidade energética, Justiça energética*

1. INTRODUÇÃO

A energia solar desponta como uma das principais alternativas energéticas do século XXI. Sua relevância cresce em meio à busca global por fontes limpas, seguras e sustentáveis, capazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis. Na Fig. 1 é apresentada uma pequena usina fotovoltaica de 75 kWp. O Brasil, por sua extensão territorial e alta irradiação solar, figura entre os países com maior potencial de aproveitamento dessa fonte. Nos últimos anos, a combinação de avanços tecnológicos, políticas públicas e queda nos custos de instalação tem impulsionado a adoção da energia solar fotovoltaica em diferentes setores. De acordo com a *International Energy Agency* (2024), a energia solar fotovoltaica deve continuar liderando a expansão das fontes renováveis, respondendo por mais da metade de toda a nova capacidade elétrica instalada no mundo até 2030. O relatório *Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030* aponta que a capacidade solar global deverá ultrapassar 5.500 gigawatts até o final da década, impulsionada pela redução de custos, avanços tecnológicos e políticas de incentivo. Esse crescimento reforça o papel estratégico da energia solar como vetor principal da transição energética mundial.

Este ensaio analisa o papel da energia solar como componente estratégico da matriz elétrica brasileira, explorando seus aspectos técnicos, econômicos e éticos. A partir dessa análise, busca-se compreender os principais desafios relacionados à eficiência, à viabilidade financeira e à equidade social, bem como as soluções emergentes que vêm transformando a forma como o mundo produz e consome energia.

Figura 1. Pequena usina solar fotovoltaica (75 kWp).
Fonte: https://solardospomares.com.br/wp-content/uploads/2025/09/Kit-Usina-Solar-75Kw.webp

2. ASPECTOS TÉCNICOS

A energia solar pode ser aproveitada por diferentes tecnologias, como a solar fotovoltaica, a solar térmica e a energia solar concentrada (CSP). A energia solar fotovoltaica converte a radiação solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico (Fig. 2), no qual os fótons excitam elétrons em materiais semicondutores, gerando corrente contínua. A solar térmica utiliza coletores para aquecer fluidos, enquanto a CSP concentra a luz solar em um ponto focal, produzindo calor de alta temperatura para movimentar turbinas.

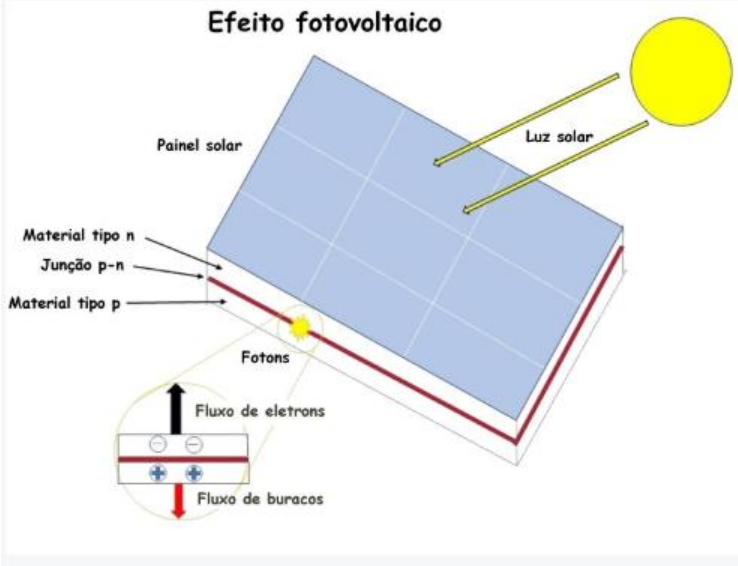

Figura 2. Representação esquemática do efeito fotovoltaico em uma célula de silício.
Fonte: http://penta3.ufrgs.br/fisica/energia/Energia_solar/efeito_fotovoltaico.html

Apesar de sua versatilidade, a energia solar enfrenta desafios técnicos significativos. O primeiro é a intermitência, já que a geração depende da disponibilidade solar. Isso a torna uma fonte não despachável, o que pode causar problemas de estabilidade na rede em horários de pico de geração. Além disso, a eficiência dos módulos fotovoltaicos convencionais ainda é limitada, variando entre 18% e 22%, e sofre perdas com o aquecimento dos painéis.

Em 2024, foram instalados no Brasil 782.864 sistemas fotovoltaicos em regime de micro e minigeração distribuída, segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (2025). Esse número representa expansão expressiva da participação residencial e comercial e manifesta a maturidade da tecnologia no país. A penetração desses sistemas em mais de uma centena de municípios evidencia que a energia solar está ultrapassando o estágio inicial de implantação e se consolidando como componente estrutural da matriz elétrica nacional. A ocupação de grandes áreas também é um obstáculo para aplicações em larga escala, especialmente em regiões urbanas densas.

Em contrapartida, diversas soluções tecnológicas vêm sendo desenvolvidas para superar esses entraves. Entre elas, destacam-se as tecnologias de resfriamento ativo e passivo, que reduzem a temperatura dos módulos e melhoram seu rendimento, e a otimização dos inversores com algoritmos de rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT) mais precisos. Além disso, a integração de baterias e supercapacitores tem tornado possível armazenar energia excedente e estabilizar a rede. A reciclagem de baterias de íons de lítio, em especial, vem sendo pesquisada como solução para minimizar impactos ambientais. No Brasil, a cadeia produtiva da energia solar registra desafios estratégicos: segundo estudo do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2025), a expansão fotovoltaica cresceu cerca de 72% ao ano nos últimos cinco anos, com investimento de aproximadamente R$ 30 bilhões em 2024, e ainda depende fortemente da importação de módulos, gerando déficit comercial superior a US$ 3,5 bilhões anuais. Esses dados evidenciam que o desenvolvimento tecnológico deve ser acompanhado por políticas de produção local, para garantir não só a adoção da tecnologia, mas também seus benefícios econômicos internos.

Outras inovações promissoras incluem as telhas e janelas fotovoltaicas, que permitem a integração estética e funcional da geração de energia em edificações (tecnologia BIPV), e os sistemas *floating-PV*, instalados sobre reservatórios, que reduzem a evaporação e aproveitam áreas antes subutilizadas. A agrivoltaica, por sua vez, concilia agricultura e energia solar, otimizando o uso do solo. No Brasil, pesquisas da Embrapa Semiárido indicam ganhos de até 15% na produtividade agrícola em sistemas agrivoltaicos no Nordeste, demonstrando sinergia entre energia e agricultura. Um exemplo de instalação agrivoltaica é mostrado na Fig. 3.

Figura 3. Exemplo de uma instalação agrivoltaica
Fonte: https://www2.energia.coop/brasil/blog/sistemas-agrivoltaicos-no-brasil-vamos-conhecer-algumas-iniciativas-2/

No que diz respeito à melhoria da eficiência, a 4 Fig. apresenta a evolução histórica das eficiências das principais tecnologias de células fotovoltaicas, conforme dados do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, 2024). Observa-se que as células de silício cristalino, predominantes no mercado, evoluíram de aproximadamente 10% de eficiência na década de 1970 para cerca de 27% nos dias atuais, refletindo avanços contínuos em materiais, processos de dopagem e controle de impurezas. As células tândem, especialmente as que combinam perovskita e silício, vêm apresentando crescimento acelerado desde 2015, superando rapidamente a eficiência das células convencionais e despontando como uma das tecnologias mais promissoras para o futuro próximo. Já as multijunções III–V, que combinam múltiplas camadas semicondutoras com diferentes *band gaps*, atingem valores próximos de 50% de eficiência, embora seu custo elevado restrinja o uso a aplicações espaciais e de alta performance. De modo geral, o gráfico da Fig. 4 evidencia um cenário de diversificação tecnológica, com o surgimento constante de novos materiais e arquiteturas de célula. Esse avanço multidirecional reflete a busca por soluções que equilibrem eficiência, custo e sustentabilidade, ampliando o leque de opções disponíveis para a geração de energia solar no mundo.

A crescente participação da energia solar na matriz também impõe novos desafios à operação do sistema elétrico, especialmente no que se refere à variação rápida da geração durante o dia. Em diversos países, esse fenômeno é conhecido como *duck curve*, um formato característico da demanda líquida quando há grande penetração de geração fotovoltaica, resultando em excedente de energia nas horas de sol e necessidade de compensação abrupta ao entardecer (Fig. 5). Para mitigar esse efeito, o uso de armazenamento em baterias, controle inteligente de inversores e gestão da demanda tem se mostrado essencial para garantir estabilidade e confiabilidade à rede elétrica (SILVA; PEREIRA, 2022; SANTOS, 2021).

Além disso, a energia solar desempenha papel essencial como fonte complementar dentro da matriz elétrica brasileira. Sua geração diurna coincide com os períodos de maior consumo e pode reduzir a pressão sobre as usinas hidrelétricas, que, por sua vez, compensam a intermitência solar nos períodos noturnos ou nublados. Essa sinergia contribui para a estabilidade do sistema, reduz o acionamento de termelétricas e potencializa o uso equilibrado dos recursos naturais. A combinação entre solar, eólica e hidrelétrica tem se mostrado uma das estratégias mais eficazes para garantir segurança energética e eficiência ambiental no país (SANTOS, 2021; SILVA; PEREIRA, 2022).

Essas inovações demonstram que, embora ainda existam desafios técnicos e operacionais, a energia solar se encontra em constante aprimoramento, tornando-se cada vez mais eficiente, confiável e compatível com diferentes contextos geográficos e econômicos.

3. ASPECTOS ECONÔMICOS

A viabilidade econômica é um fator central para a expansão da energia solar. No contexto brasileiro, o fator de capacidade médio das usinas fotovoltaicas varia entre 17% e 23%, com destaque para o Nordeste, onde a alta irradiação e o clima semiárido favorecem o desempenho. Essa característica contribui para a competitividade da energia solar em comparação a outras fontes renováveis (SILVA; PEREIRA, 2022). Embora o custo dos equipamentos tenha caído significativamente na última década, a implementação em larga escala ainda encontra obstáculos, como o alto investimento inicial e a necessidade de infraestrutura elétrica adequada. Além disso, a falta de padronização de equipamentos e de certificação técnica unificada entre fabricantes pode elevar custos de manutenção e comprometer a durabilidade dos sistemas.

O custo de aquisição de um sistema residencial de 4 a 6 kWp varia entre R$ 15 mil e R$ 25 mil, com tempo médio de retorno de quatro a sete anos. Em termos de escala, o avanço recente da geração distribuída no país é expressivo. Em 2024, foram instalados 782.897 sistemas de micro e minigeração distribuída (MMGD) no Brasil, quase todos baseados em painéis solares fotovoltaicos, segundo a ANEEL. Além disso, o Balanço Energético Nacional (BEN) 2025 indica que, no ano-base 2024, a capacidade solar fotovoltaica total (centralizada + MMGD) alcançou 48,5 GW, com geração de 70,7 TWh, reforçando a competitividade econômica e a relevância sistêmica da fonte no contexto nacional. Esse período é

considerado atrativo, mas ainda inacessível para parte da população de baixa renda. Apesar disso, a energia solar mostra-se altamente competitiva em comparação a fontes fósseis e termelétricas, especialmente diante do aumento das tarifas de energia no país. No contexto brasileiro, diferenças de irradiação e estruturas tarifárias fazem com que o retorno do investimento seja mais favorável em estados do Nordeste, onde o fator de capacidade tende para a faixa superior (aproximadamente 20–23%), encurtando o *payback* em relação a regiões menos ensolaradas. Essa heterogeneidade estadual é considerada nos estudos de planejamento e custos da EPE. Estudo recente avaliou a viabilidade econômica da geração distribuída residencial no Brasil sob o novo marco regulatório e concluiu que, mesmo com a redução dos incentivos, os sistemas permanecem financeiramente vantajosos em todos os cenários analisados (SOUSA et al., 2023), reforçando a resiliência do modelo de investimento fotovoltaico mesmo em contextos de transição tarifária.

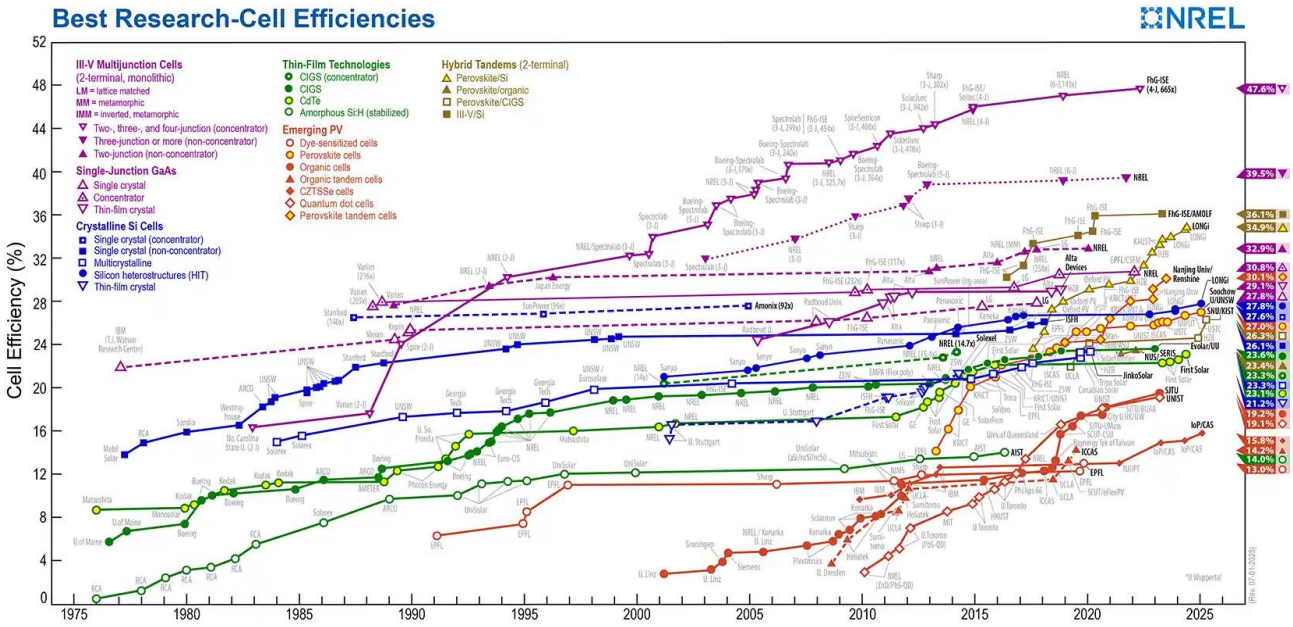

Figura 4. Evolução da eficiência das melhores células solares já pesquisadas no mundo.
Fonte: https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency

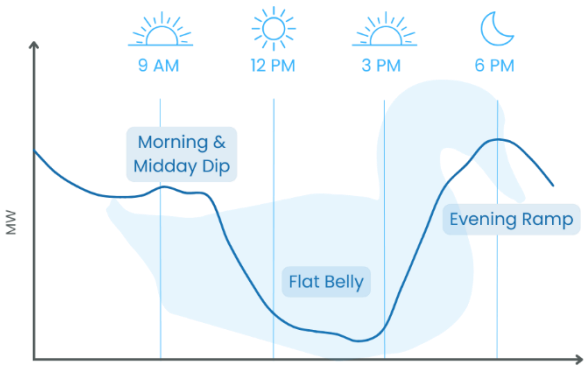

Figura 5. Ilustração da *duck curve.*
Fonte: https://synertics.io/blog/72/understanding-the-duck-curve

Para o horizonte de médio prazo, as projeções oficiais indicam continuidade da expansão. No PDE 2034, a EPE projeta a MMGD acumulada entre 47 GW e 71 GW em 2034, com cenário de referência em 59 GW e mais de 7 milhões de unidades consumidoras atendidas, mesmo sob a transição regulatória da Lei nº 14.300/2022. Tais números consolidam a energia solar como vetor de investimento e de diversificação da matriz elétrica brasileira.

É importante distinguir os modelos de geração distribuída e geração centralizada. Enquanto os sistemas distribuídos instalados em residências, comércios e cooperativas fortalecem a autonomia energética e reduzem perdas na transmissão, as grandes usinas solares (*utility scale*) apresentam custos nivelados de energia (LCOE) mais baixos, devido às economias de escala. No Brasil, o LCOE médio da energia solar centralizada caiu para cerca de US$ 35 por MWh em 2023, tornando-

se uma das opções mais competitivas da matriz, segundo dados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2023).

No âmbito legal, o Marco Legal da Geração Distribuída (Lei nº 14.300/2022) representou um marco importante. A norma instituiu o sistema de compensação de créditos e estabeleceu a transição gradual do pagamento da TUSD Fio B (parcela da tarifa que remunera a rede de distribuição). Iglesias e Vilaça (2022) destacam que a nova estrutura regulatória reduz a viabilidade econômica para prosumidores[1], à medida que aumenta o montante pago no regime de *net-metering*, embora melhore o equilíbrio financeiro das distribuidoras ao mitigar subsídios cruzados. Essa mudança exige atenção especial aos custos de implementação e à manutenção de incentivos que preservem o crescimento da geração distribuída em diferentes perfis tarifários.

As políticas públicas e programas de financiamento, como os do BNDES, Caixa Econômica Federal e cooperativas regionais, têm estimulado a adoção da tecnologia. Casos de sucesso incluem o programa Luz para Todos Solar, que levou eletrificação fotovoltaica a comunidades isoladas, e os projetos de usinas solares cooperativas no Nordeste, que permitem a geração compartilhada entre consumidores e reduzem a dependência da rede convencional.

A longo prazo, enquanto setor macro da economia, a energia solar tende a fortalecer a indústria nacional de equipamentos, gerar empregos qualificados e contribuir para a autossuficiência energética brasileira, desde que acompanhada de políticas de incentivo à inovação, à padronização técnica e à produção local.

4. ASPECTOS ÉTICOS E SOCIOAMBIENTAIS

A energia solar é considerada uma fonte limpa e sustentável, mas não está isenta de impactos ambientais. A produção de módulos fotovoltaicos exige materiais como silício, alumínio e prata, cuja extração gera emissões e resíduos. Contudo, o tempo de retorno energético de um painel é inferior a dois anos, enquanto sua vida útil ultrapassa 25, o que garante saldo ambiental positivo.

O maior desafio ambiental futuro está na reciclagem de módulos e baterias. Até 2050, milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos deverão ser tratadas. Tecnologias capazes de recuperar até 95% dos materiais já existem, mas demandam políticas públicas de logística reversa e infraestrutura industrial específica. Segundo estimativas da *International Energy Agency* (2024), o volume global de resíduos fotovoltaicos pode ultrapassar 60 milhões de toneladas até 2050, caso não sejam adotados sistemas eficazes de reaproveitamento e logística reversa. Essa projeção reforça a necessidade de marcos regulatórios nacionais que incentivem a reciclagem de painéis e baterias, bem como a criação de cadeias produtivas dedicadas à recuperação de materiais valiosos, como prata e silício.

No campo social, a energia solar promove justiça energética, ao permitir que famílias e comunidades gerem a própria eletricidade e reduzam a dependência de grandes distribuidoras. Programas de geração compartilhada e condomínios solares democratizam o acesso à energia limpa, embora ainda haja desigualdades de investimento inicial. Segundo levantamento da Absolar (2025), o setor solar brasileiro já gerou mais de 1,2 milhão de empregos acumulados, com destaque para os estados de Minas Gerais, São Paulo e Bahia, reforçando o impacto social positivo da expansão fotovoltaica.

Do ponto de vista geopolítico, a dependência da importação de painéis, principalmente da Ásia, representa vulnerabilidade econômica. O Brasil, por outro lado, possui potencial para se destacar na produção de hidrogênio verde, utilizando energia solar para eletrólise da água, tornando-se um futuro exportador de energia limpa.

Assim, o desenvolvimento ético da energia solar exige não apenas avanços tecnológicos, mas também responsabilidade ambiental e inclusão social, garantindo que a transição energética beneficie toda a sociedade e preserve o meio ambiente.

5. CONCLUSÃO

A energia solar consolidou-se como uma das principais soluções da transição energética mundial. Tecnicamente, seus desafios, como eficiência, intermitência e integração à rede, estão sendo superados por inovações que envolvem novos materiais, sistemas de armazenamento e integração arquitetônica. Economicamente, a queda dos custos e o fortalecimento do marco regulatório tornam o investimento cada vez mais acessível, ainda que a padronização e a ampliação do crédito precisem avançar. Eticamente, a energia solar se destaca por alinhar desenvolvimento tecnológico, equidade social e sustentabilidade ambiental.

Conclui-se que a energia solar não deve ser encarada como solução isolada, mas como um elemento essencial de uma matriz energética diversificada, resiliente e justa. Seu avanço depende da combinação entre inovação, planejamento e políticas públicas que promovam a democratização do acesso à energia. Ao unir eficiência, viabilidade e compromisso socioambiental, a energia solar consolida-se como um vetor de transformação sustentável, capaz de equilibrar progresso econômico e responsabilidade ética com o planeta.

[1] Um prosumidor é alguém que participa ativamente do processo, não ficando só como cliente passivo. Ele consome e produz ao mesmo tempo.

6. REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 jan. 2022.

IGLESIAS, C.; VILAÇA, F. On the regulation of solar distributed generation in Brazil: a look at both sides. Energy Policy, [S. l.], v. 167, p. 113085, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113085.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030. Paris: IEA, 2024.

SANTOS, L. F. Economia e sustentabilidade na matriz elétrica brasileira. São Paulo: Atlas, 2021.

SILVA, M. R.; PEREIRA, T. C. Fontes renováveis e a transição energética global. Rio de Janeiro: Elsevier, 2022.

SOUSA, D. L.; RIBEIRO, M. A. C.; SANTOS, L. E.; MENDES, P. F. R. Economic feasibility of distributed generation for Brazilian households under Law 14.300. Revista Brasileira de Ciências Ambientais – RBCIAMB, São Paulo, v. 58, n. 2, p. 115–128, 2023. DOI: https://doi.org/10.5327/Z2176-947820231574

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Power Generation Costs in 2023. Abu Dhabi: IRENA, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Micro e minigeração distribuída de energia elétrica cresceu 8,84 GW em 2024. Brasília, jan. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/micro-e-minigeracao-distribuida-de-energia-eletrica-cresceu-8-84-gw-em-2024.

DUARTE, C. H. C.; ARAÚJO, B. P. de. Geração de energia solar fotovoltaica no Brasil e o desenvolvimento da cadeia local de fornecedores. Rio de Janeiro: BNDES Set., v. 31, n. 59, p. 57-118, mar. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Relatório técnico: avaliação de sistemas agrivoltaicos no semiárido brasileiro. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. Energia solar já gerou mais de 1,2 milhão de empregos no Brasil. São Paulo, set. 2025. Disponível em: https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-gera-12-milhao-de-empregos-no-brasil/

7. USO DE IA GENERATIVA E AVISO DE RESPONSABILIDADE

Em conformidade com a Resolução Unesp n° 13, de 22 de abril de 2025, os autores declaram o uso do ChatGPT 5.1 para revisão gramatical final do texto e que o resultado foi validado. Foi utilizado também para aprimoramento de clareza textual, a fim de melhorar a fluidez de frases, sem qualquer participação na elaboração do conteúdo, análises e conclusões apresentadas. Os autores são os únicos responsáveis pelo material contido neste ensaio.

DESAFIOS LOGÍSTICOS DA BIOENERGIA NO BRASIL

Alexandre Nagy Iorio
Engenharia de Produção Mecânica
alexandre.nagy@unesp.br

Humberto Soares Moroni
Engenharia Elétrica
humberto.moroni@unesp.br

Resumo. *O desenvolvimento do uso de bioenergias no Brasil é visto como um grande avanço em termos de geração de energia limpa, e tem ampla disponibilidade graças à grande produção agrícola e florestal brasileira, sendo possíveis a utilização de resíduos dessas indústrias para seu abastecimento. Porém, as tecnicalidades de como funciona essa modalidade, principalmente sua logística das plantações até centros de processamento, podem determinar se a mudança é de fato sustentável economicamente e ambientalmente, ou se pode ser vista como mais um caso de greenwashing sem preocupações socioambientais de fato. O Brasil ainda então necessita de investimentos e replanejamentos de sua malha logística para que bioenergias alcancem seu verdadeiro potencial renovável.*

Palavras-chave: *Bioenergia, Energia Renovável, Logística.*

1. INTRODUÇÃO

A Oferta Interna de Energia brasileira alcançou, em 2024, um marco: 50% de participação de fontes renováveis, dos quais 33,3% oriundos da bioenergia, como biomassa da cana e resíduos florestais (EPE, 2025). Essa contribuição é vista como um grande passo que o país fez para o progresso de utilização de energias renováveis, enquadrando-se no ODS 7 (Energia limpa e acessível). Porém, a bioenergia traz consigo áreas em seu mapa de processos em que é possível obscurecer o uso de formas não sustentáveis de energia, um dos principais destes sendo a sua logística, já que os insumos de onde serão derivadas as matérias-primas da geração de energia precisam se locomover pelo país antes de serem processados ou distribuídos.

Em um país que possui uma malha logística primariamente rodoviária e de proporções continentais como o Brasil, é necessário analisar as condições de transporte nas quais as matérias-primas de tal geração de energia se encontram. Pela ineficiência encontrada nas questões logísticas dos ciclos de vida das bioenergias, é gerado um paradoxo entre o discurso do progresso de energias renováveis e a presença de forças poluentes nos detalhes da geração de energia limpa por biomassas e seus derivados, que é somente resolvida com a diversificação dos modais logísticos utilizados no Brasil.

2. A BIOENERGIA

A biomassa é caracterizada como quaisquer recursos renováveis que são obtidos a partir de matéria orgânica existente na natureza ou gerada pelo ser humano. A utilização de biomassas para a geração de eletricidade possui uma característica inerente: o material utilizado para a geração de energia/vapor pode se apresentar em um estado líquido, sólido ou gasoso, dependendo dos processos pelos quais eles são derivados e das matérias-primas utilizadas. Por consequência dessa característica, o ensaio presente classifica 3 tipos de bioenergia: a biomassa, o biocombustível e o biogás. (FERREIRA, 2018).

Esse tipo de geração de energia é altamente utilizado no Brasil, principalmente pela produção agrícola significativa e centros urbanos populosos, que produzem resíduos diversos como a palha, bagaço de cana e o esgoto das cidades.

2.1 Biomassa

O uso da biomassa em si para geração de energia é feito pela combustão, na qual há transformação de energia química em térmica. Estes recursos de biomassa podem ser classificados entre 3 tipos (ANG, 2022):

- Florestais;
- Agricultura;
- Resíduos urbanos.

O tipo mais predominante de geração de energia por esse método no Brasil é a de combustão do bagaço de cana-de-açúcar, subproduto dos processos que transformam a cana em etanol, que, juntamente com este, representa 16,9% de participação na geração de energia interna. A lenha, o carvão vegetal e a lixívia, além de outras fontes renováveis, constituem outros 16,6% da matriz energética brasileira (EPE, 2025). O Brasil teve como oferta para produção energética

182,575 mil toneladas de bagaço de cana-de-açúcar, 88,297 mil toneladas de lenha e 40,008 mil toneladas de lixívia, de acordo com o Balanço Energético Nacional. (EPE, 2025) Utilizando o fator de conversão oferecido pela EPE (Empresa de Planejamento Energético, vinculada ao Ministério de Minas e Energia), é possível representar esses dados em uma unidade de medida uniforme e internacionalmente adotada: a de mil tep (toneladas equivalentes de petróleo). A equação para essa conversão é dada pela Eq. 1:

$$Energia(mil\ tep) = Massa(mil\ toneladas) * Fator\ de\ Conversão(tep/tonelada) \quad (1)$$

Com isso, é possível representar os dados anteriormente referidos como, respectivamente, 38,883 mil tep para o bagaço de cana, 27,372 mil tep para a lenha e 11,456 mil tep para a lixívia.

Graças à significância das biomassas florestais e agrícolas citadas na produção energética nacional, elas são o foco principal de discussão de biomassas neste ensaio, em que se discorre também sobre seus processos envolvidos.

2.1.1 Biomassa Agrícola

No Brasil, a região Sudeste é responsável por aproximadamente 63% da produção de cana-de-açúcar, com somente o estado de São Paulo representando 50% da produção nacional. (CONAB, 2025)

A geração de energia via combustão de bagaço de cana é um processo relativamente simples, que utiliza usinas termoelétricas, nas quais a matéria-prima é inserida em caldeiras que produzem vapor de alta pressão, que por sua vez, alimentam turbinas conectadas a geradores de energia elétrica. Parte do vapor é utilizado para gerar a energia mecânica necessária para moer a cana, com seus resquícios de energia térmica utilizados para processos industriais. O processo está ilustrado na Fig. 1.

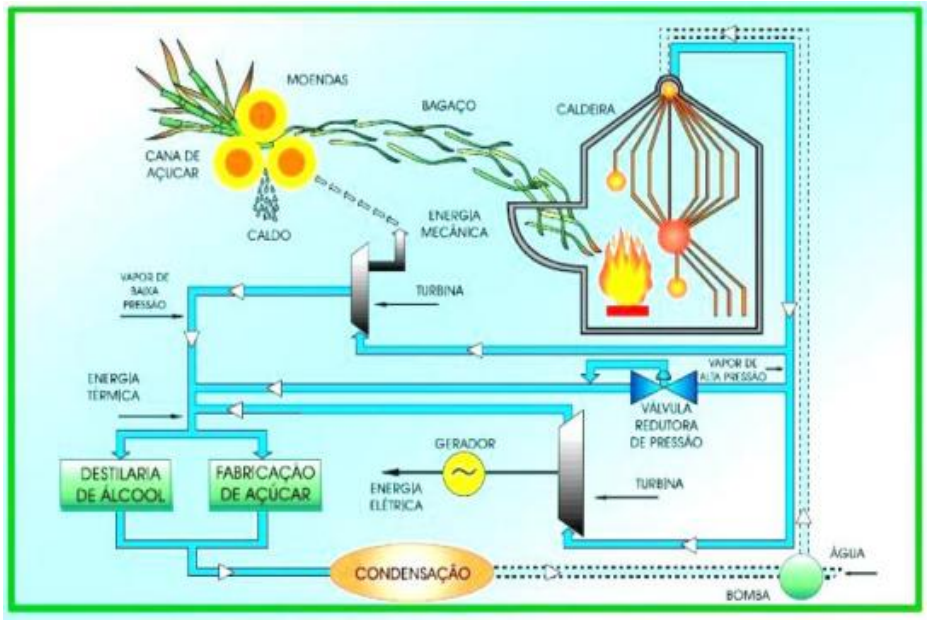

Figura 1. Processo de cogeração utilizando bagaço de cana (VASCONCELOS, 2020).

2.1.2 Biomassa Florestal

A utilização de florestas plantadas para a produção energética, tanto elétrica quanto térmica, é uma prática extremamente difundida no Brasil, que, até o momento, com mais de 1,4 milhões de hectares de florestas plantadas para produção de carvão vegetal, é o maior produtor mundial desse recurso. Para que seja viável essa prática, as florestas necessitam de um crescimento relativamente rápido, uma alta densidade de população arbórea e da madeira em si, e possibilidade de replantio para que o ciclo de geração continue (PUENTES, 2015).

2.2 Biocombustíveis

Os biocombustíveis desempenham papel estratégico na transição energética brasileira, consolidando-se como uma das principais alternativas para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa.

O Brasil se destaca mundialmente pela maturidade de sua cadeia produtiva, especialmente nos setores de etanol e biodiesel, cujas rotas tecnológicas, infraestrutura e marcos regulatórios evoluíram continuamente nas últimas décadas (Araújo, 2023).

A trajetória brasileira teve início com o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975, implementado como resposta à crise do petróleo. O programa impulsionou o uso do etanol combustível, consolidando a cana-de-açúcar como principal matéria-prima e transformando o país em referência global no uso de biocombustíveis líquidos (Santos et al., 2022). Atualmente, a introdução de veículos flex fuel e o avanço das usinas full e flex, que aproveitam resíduos de biomassa para cogeração de energia, ampliaram a eficiência do setor e permitiram a diversificação da matriz energética nacional (Araújo, 2023).

O Brasil conta hoje com 359 unidades produtoras de etanol e 60 de biodiesel, de acordo com dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), responsáveis por atender cerca de 30% da demanda veicular nacional (Araújo, 2023). O etanol de milho, em expansão nos últimos anos, representa uma inovação importante, pois aproveita o milho de segunda safra e reduz a competição por áreas agrícolas, além de gerar subprodutos aproveitáveis na alimentação animal. Essa integração entre setores agrícolas e energéticos é um dos pontos centrais para o desenvolvimento sustentável do mercado de biocombustíveis (Santos et al., 2022).

O marco regulatório também tem papel central na expansão do setor. A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576/2017, fortaleceu os mecanismos de incentivo à produção sustentável, introduzindo créditos de descarbonização (CBIOs) e metas de redução de emissões alinhadas aos compromissos assumidos no Acordo de Paris (Araújo, 2023). Essas medidas ampliaram a atratividade econômica do setor e estimularam novos investimentos, embora desafios logísticos, de armazenagem e de escoamento ainda limitem a competitividade em algumas regiões (Santos et al., 2022).

2.3 Biogás

O biogás é uma fonte de energia renovável, composta majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), resultante da decomposição anaeróbica (i.e., na ausência de oxigênio) de materiais orgânicos, como resíduos agrícolas, dejetos animais e efluentes industriais. Produz uma mistura que além de permitir a geração de energia elétrica e térmica, o biogás se destaca pela dupla função ambiental: o aproveitamento de resíduos que seriam descartados e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, especialmente do metano, de alto potencial poluidor (CIBiogás, 2025).

O potencial energético do biogás no Brasil está fortemente relacionado à base agroindustrial do país, especialmente à cadeia da cana-de-açúcar, à suinocultura e ao tratamento de resíduos urbanos. De acordo com o *Panorama do Biogás no Brasil 2024*, o território nacional contava com 1.633 plantas registradas, sendo as regiões Sul e Sudeste responsáveis pela maior concentração de produção devido à elevada geração de dejetos e resíduos agroindustriais (CIBiogás, 2025). O estudo também indica que, caso o aproveitamento dos resíduos fosse ampliado, o país teria potencial para gerar mais de 4,7 bilhões de Nm^3/ano de biogás, quantidade equivalente a cerca de 2,5% da demanda nacional de energia elétrica.

A principal limitação para a expansão dessa matriz, porém, está na descentralização da produção. As usinas de biogás tendem a ser instaladas próximas das fontes de matéria-prima, o que restringe a escala de aproveitamento energético e dificulta a integração com as redes elétricas e de gás natural (Machado, 2019). Ainda assim, os benefícios ambientais e a possibilidade de gerar energia contínua, mesmo em períodos de estiagem, tornam o biogás um elemento essencial para a diversificação e estabilidade da matriz energética brasileira.

3. LOGÍSTICA ASSOCIADA

O método principal de escoamento de matérias-primas agrícolas no Brasil é o rodoviário, dominando aproximadamente 60% do transporte de cargas no país (EPE, 2025). As emissões de CO2 do setor rodoviário chegam a até 20,9% das emissões totais do país (Fig. 2, CNT, 2025), com o transporte rodoviário sendo responsável pelo consumo de 46,430 mil m^3 de óleo diesel, e 32,267 mil m^3 de gasolina automotiva, em comparação aos 7,184 mil m^3 de biodiesel utilizados, apresentando claro conflito com a redução de emissões de poluentes e sustentabilidade das bioenergias que são carregadas nesse modal logístico (EPE, 2025). É possível observar na Fig. 3 que caminhões médios, pesados e semipesados possuem uma participação de aproximadamente 60% das emissões de NOx (óxidos de nitrogênio), os causadores de chuvas ácidas e acentuadores do efeito estufa, e 57% das de MP (material particulado), responsável por alterar o pH, os níveis de pigmentação e a fotossíntese das plantas, ambos que trazem problemas respiratórios e infecções em seres humanos expostos. (CNT, 2025)

Para que seja abatido esse efeito poluente, o país carece de investimentos amplos em métodos alternativos de transporte, como o hidroviário e ferroviário, que possuem menor taxa de emissões, além de maior eficiência e economia após sua instalação de capacidade.

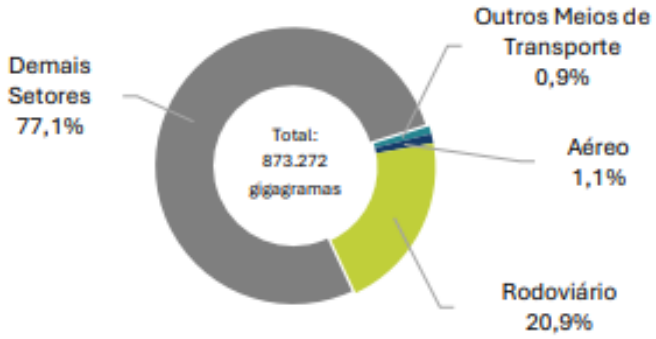

Figura 2 - Participação das emissões de CO2 por setor no Brasil. (CNT, 2025)

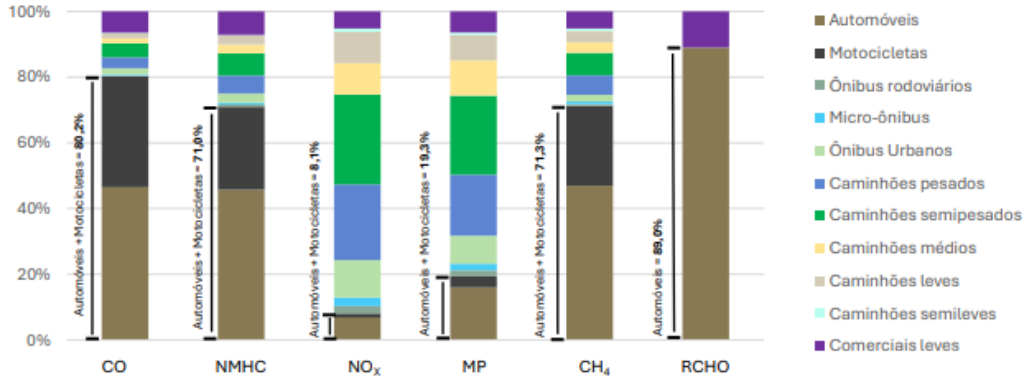

Figura 3 - Contribuição relativa de cada categoria de veículos na emissão de poluentes (CNT, 2025)

3.1 Biomassa

Em decorrência do baixo poder calorífico associado às biomassas que devem ser utilizadas para a combustão na geração de energia, essas devem ser transportadas em volumes significativos. A biomassa florestal e agrícola possuem desafios semelhantes nesse sentido, pois compartilham o método e regiões de transporte.

Até 95% do transporte de cana-de-açúcar utilizam a malha rodoviária. (MEURER, 2015). O escoamento ocorre principalmente das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste até o estado de São Paulo, que possui 210 das 427 usinas termelétricas instaladas no país que utilizam palha e bagaço de cana para sua cogeração. (UVESP, 2025)

A cana, após moída, tem como subproduto o bagaço de cana, que ainda mantém 50% de sua umidade logo após o processo. (SANTOS, 2011). Essa umidade tem alto impacto em seu transporte, visto que grande parte da massa da matéria-prima não terá como finalidade a geração de energia.

Como consequência da sazonalidade desse tipo de geração de energia, o bagaço de cana é armazenado para uso posterior em pátios de estocagem, onde milhares de toneladas de biomassa são estocadas em pilhas que podem chegar a 40m de altura. Há nisso problemas na decomposição de camadas de bagaço mais internas, dificultando o manuseio sem equipamentos de proteção contra mofo, que pode ser desenvolvido. (SANTOS, 2011)

Figura 4 - Pátio de estocagem de bagaço de cana
Fonte: https://revistapesquisa.fapesp.br/compostos-naturais-podem-aumentar-producao-de-etanol-de-bagaco-de-cana/

3.2 Biocombustíveis

O transporte rodoviário representa cerca de 60% a 70% do escoamento de combustíveis no país. Essa dependência resulta em altos custos logísticos e elevadas emissões de gases poluentes, além de dificultar a integração de uma cadeia de transporte mais eficiente e sustentável, fundamental para o aumento da competitividade das fontes renováveis de energia. (REUTERS, 2025)

A distribuição do etanol, que é majoritariamente produzido na região Centro-Sul, e do biodiesel, com grande produção nas regiões Norte e Centro-Oeste, depende de longas rotas rodoviárias para atingir centros consumidores como o Sudeste, incluindo o estado de São Paulo, principal mercado consumidor brasileiro. (REUTERS, 2025)

Já na questão de utilização de biocombustíveis para constituição energética da frota de veículos de transporte, é possível ver um progresso que ajudou a aumentar a renovabilidade do setor em 25,7% em 2024. Mesmo com o aumento do consumo de energia dos transportes em 2,7% em relação a 2023, houve um aumento de 30,1% de etanol hidratado, com o seu consumo atingindo cerca de 37,1 milhões de m^3, e 19,3% de biodiesel, esse segundo devido ao aumento do seu teor de mistura ao diesel mineral para 14% na época de 2024. (EPE, 2025)

3.3 Biogás

A logística associada ao biogás no Brasil apresenta desafios que diferem dos enfrentados por outras fontes de bioenergia. A principal dificuldade está na dispersão geográfica dos resíduos utilizados como matéria-prima. Grande parte dos substratos aproveitáveis, como dejetos animais e resíduos industriais, encontra-se em propriedades rurais distantes dos centros de consumo e das redes de distribuição, elevando os custos de transporte e limitando a competitividade do biogás frente a outras fontes energéticas (Machado, 2019).

Após a coleta, o processo logístico se estende à purificação, compressão e transporte do biogás. A transformação do biogás bruto em biometano exige remoção de impurezas como dióxido de carbono (CO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S), o que requer tecnologia avançada e infraestrutura especializada (Milanez, Maia & Guimarães, 2021). Contudo, o alto investimento inicial dificulta a disseminação de sistemas de purificação em pequena escala. Em muitos casos, a ausência de gasodutos locais obriga o transporte do biometano comprimido por caminhões, aumentando os custos e as emissões do próprio processo de distribuição (CIBiogás, 2025).

Outro obstáculo relevante é a conexão das unidades geradoras à rede elétrica nacional. Pequenas plantas de biogás enfrentam altos custos de interligação e complexidade técnica para adequação às normas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020). Além disso, a sazonalidade da produção agropecuária afeta a oferta de resíduos, tornando o planejamento logístico mais complexo. Para reduzir esses impactos, propõe-se a criação de polos regionais de aproveitamento de substratos e centrais de purificação compartilhadas, permitindo economias de escala e uso mais eficiente das rotas de transporte (Milanez, Maia & Guimarães, 2021).

Por fim, a integração efetiva da logística do biogás exige coordenação entre políticas agrícolas, energéticas e ambientais. Embora programas como o *RenovaBio* ofereçam incentivos econômicos para combustíveis de baixo carbono, a ausência de um planejamento conjunto para infraestrutura e escoamento ainda limita o crescimento sustentável do setor

(CIBiogás, 2025). Superar esses gargalos é essencial para que o biogás avance de um papel complementar para uma posição estratégica na matriz energética nacional.

4. CONCLUSÃO

A bioenergia em suas várias formas, biocombustível, biogás e biomassa, é uma oportunidade explorável para um país de alta produção agrícola, como o Brasil, em sua busca pelo aumento da inserção energias renováveis. Porém, a logística fortemente dependente do transporte rodoviário no Brasil representa um desafio estrutural que compromete a autenticidade do discurso de renovabilidade associado às bioenergias. Embora essas fontes de energia sejam reconhecidas por sua capacidade de reduzir as emissões de poluentes em comparação aos combustíveis fósseis, a predominância da logística rodoviária no escoamento de biomassa tem como consequência elevados custos ambientais e financeiros. O consumo intensivo de combustíveis fósseis por caminhões e as ineficiências logísticas associadas aumentam as emissões totais da cadeia produtiva, o que enfraquece a premissa de que as bioenergias são soluções puramente sustentáveis e amigas do meio ambiente.

Portanto, para que o Brasil possa consolidar de forma genuína e sustentável a utilização das bioenergias como fontes renováveis em sua matriz, é essencial investir em uma infraestrutura logística diversificada que reduza a dependência do transporte rodoviário. Como objetivos de desenvolvimento do setor, a implantação de modais alternativos com menor impacto ambiental, a modernização da malha logística e o incentivo a tecnologias de transporte limpo são medidas essenciais. Somente com esses avanços é possível garantir que o potencial sustentável das bioenergias se concretize não apenas no discurso, mas em resultados concretos de sustentabilidade energética para o país.

5. REFERÊNCIAS

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Boletins Técnicos CNT**, n. 10: Outubro/2025. Brasília, DF: CNT, 2025. Disponível em: https://cnt.org.br/boletins

MEURER, Angélica Patrícia Sommer; LOBO, Débora da Silva. Caracterização da logística do sistema agroindustrial (SAG) da cana-de-açúcar no Centro-Oeste do Brasil. **E&G Economia e Gestão**, Belo Horizonte, v. 15, n. 39, p. 45-64, abr./jun. 2015.

FERREIRA, L. R. A. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440-455, 2018.

ANG, Tze-Zhang et al. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. **Energy Strategy Reviews**, v. 43, 100939, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Bibliografia Temática: Energia de Biomassa. Brasília: CEDOC, 2020.

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. **Panorama do Biogás no Brasil 2024.** Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2025.

MACHADO, Allan Ribeiro. **Potencialidades e desafios da utilização de biogás para transporte e geração de energia.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

MILANEZ, Artur Yabe; MAIA, Guilherme Baptista da Silva; GUIMARÃES, Diego Duque. **Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil.** BNDES Setorial, v. 27, n. 53, p. 177–216, mar. 2021.

ARAÚJO, Symone. **Cenário dos Biocombustíveis no Brasil.** Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2023.

SANTOS, Leonardo M. et al. **Biocombustíveis no Brasil: Perspectivas e Desafios.** Revista Brasileira de Energia Renovável, v. 11, n. 3, p. 45–62, 2022.

REUTERS. **Brasil Eleva Misturas de Etanol e Biodiesel e Levanta Bandeira da Descarbonização**. *In:* FORBES. Forbes Agro, 25 jun. 2025. Disponível em: https://forbes.com.br/forbesagro/2025/06/brasil-eleva-misturas-de-etanol-e-biodiesel-e-levanta-bandeira-da-descarbonizacao/.

REUTERS. **Demanda de Biodiesel no Brasil em 2025 Deve Chegar a 9,6 Bilhões de Litros**. *In:* BIODIESELBR.com, 13 jun. 2025. Disponível em: https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/producao/demanda-de-biodiesel-no-brasil-em-2025-deve-chegar-a-9-6-bilhoes-de-litros-130625.

VASCONCELOS, R. L. de et al. Produção e uso sustentável de subprodutos e resíduos na cadeia sucroenergética. In: DIAS, L. S.; RABELLO, D.; MARQUES, M. D. (Org.). **Cana-de-açúcar**: ambiente, trabalho e saúde. 1. ed. Tupã, SP: ANAP, 2020. p. 75-94. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/373044961_Producao_e_uso_sustentavel_de_subprodutos_e_residuos_na_cadeia_sucroenergetica.

6. USO DE IA GENERATIVA E AVISO DE RESPONSABILIDADE

Em conformidade com a Resolução Unesp n° 13, de 22 de abril de 2025, os autores declaram o uso do: Gemini Flash 2.5 para correção gramatical, conectividade entre textos e formatação ABNT; Perplexity (GPT-5, Claude 4.0 Sonnet e Gemini 2.5) para busca de fontes e conectividade entre textos; e ChatGPT 5.1 para correção gramatical, conectividade entre textos e formatação ABNT. Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste ensaio.

FISSÃO NUCLEAR COMO COMPLEMENTO ESTRATÉGICO À MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA: DESAFIOS REGULATÓRIOS E SOCIAIS FRENTE À TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Kevin Arthur Rodrigues Uemura
Engenharia Elétrica
kevin.uemura@unesp.br

Matheus Caldeira Costa
Engenharia de Materiais
caldeira.costa@unesp.br

Resumo. *Este ensaio analisa a fissão nuclear como fonte estratégica de energia no contexto brasileiro, propondo sua integração como complemento necessário à matriz elétrica nacional diante das limitações estruturais das fontes renováveis e dos desafios regulatórios que freiam sua expansão. Por meio de uma abordagem crítica que articula dimensões técnicas, econômicas e éticas, defende-se que a energia nuclear oferece estabilidade, previsibilidade e segurança de suprimento, constituindo alternativa viável às termoelétricas fósseis e às fontes intermitentes. O Brasil, detentor da sétima maior reserva mundial de urânio e domínio tecnológico sobre o ciclo do combustível nuclear, mantém participação reduzida da energia nuclear (2%) em sua matriz elétrica, contraste expressivo em relação a países como França e Estados Unidos. A análise demonstra que os entraves predominantes não são técnicos, mas socioeconômicos, relacionados a custos elevados, fragmentação regulatória, resistência social e gestão de resíduos. Conclui-se que a superação desses desafios, mediante modernização institucional, transparência pública e adoção de tecnologias modulares avançadas, é essencial para diversificar a matriz energética, reduzir a dependência de fontes fósseis e consolidar a energia nuclear como pilar estratégico da transição brasileira para uma economia de baixo carbono.*

Palavras-chave: *Fissão nuclear, Energia alternativa, Matriz energética brasileira, Desafios regulatórios, Segurança energética.*

1. INTRODUÇÃO

A transição energética global impõe aos países o desafio de conciliar o crescimento da demanda por eletricidade com a redução de emissões de gases de efeito estufa, conforme preconizado nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 7 (energia limpa e acessível) e o ODS 13 (ação contra a mudança global do clima). No Brasil, esse debate adquire contornos específicos devido à matriz elétrica historicamente dependente de hidroelétricas, que respondem por 58,9% da geração nacional (BRASIL – EPE, 2025) , mas enfrentam vulnerabilidade crescente frente a crises hídricas e à redução da capacidade de regularização dos reservatórios.

Neste contexto, a energia nuclear por fissão emerge como alternativa tecnicamente viável, mas socialmente controversa. Diferentemente das termoelétricas a combustíveis fósseis, que emitem CO_2 e contribuem para o aquecimento global, e das fontes renováveis intermitentes como solar e eólica, que dependem de condições climáticas, a fissão nuclear oferece geração de base contínua e previsível, com fator de capacidade superior a 90% (BRASIL – EPE, 2025). Esta característica posiciona a energia nuclear como complemento estratégico, capaz de operar na grande parte do ano nas 24 horas por dia independentemente de fatores climáticos como regime de chuvas, ventos ou insolação, estabilizando o sistema elétrico nacional em períodos de baixa disponibilidade hídrica ou eólica.

O Brasil ocupa posição privilegiada no cenário nuclear global: detém a sétima maior reserva mundial de urânio, com 232.813 toneladas catalogadas (Ministério de Minas e Energia, 2025), e potencial para mais de 300.000 toneladas na Amazônia(BRASIL – EPE, 2025); domina todas as etapas do ciclo do combustível nuclear, da mineração ao enriquecimento (Ministério de Minas e Energia, 2025); e possui infraestrutura operacional consolidada no complexo de Angra dos Reis, onde as usinas Angra 1 (657 MW) e Angra 2 (1.350 MW) operam desde 1985 e 2001, respectivamente (BRASIL – TCU, 2025). Angra 3, com 1.405 MW e 65% das obras concluídas (BRASIL – TCU, 2025), está paralisada desde 2015 e aguarda definição sobre sua retomada.

Este ensaio parte da tese de que a fissão nuclear constitui complemento necessário à matriz energética brasileira, oferecendo alternativa às termoelétricas fósseis e às renováveis intermitentes, desde que superados os desafios regulatórios e sociais que atualmente limitam sua expansão. A argumentação estrutura-se em três eixos interdependentes:

- Análise técnico-econômica da viabilidade nuclear no Brasil, considerando infraestrutura, recursos naturais e competitividade tarifária;
- Exame dos obstáculos regulatórios e institucionais que retardam licenciamentos e investimentos;
- Investigação das dimensões ético-sociais, incluindo aceitação pública, impactos ambientais e gestão de riscos.

Defende-se que a solução não reside em escolhas excludentes, nuclear ou renováveis, mas em uma estratégia integrada

que combine a estabilidade da geração nuclear de base com a complementaridade das fontes renováveis, promovendo segurança energética e descarbonização.

A relevância deste estudo insere-se no debate nacional sobre o Plano Nacional de Energia 2050, que projeta aumento de até cinco vezes na capacidade nuclear instalada (de 2 GW para 8-10 GW) (Ministério de Minas e Energia, 2025), e nas discussões recentes sobre a retomada de Angra 3 e a possível adoção de pequenos reatores modulares (SMRs), tecnologia emergente que promete flexibilidade, segurança passiva e aplicações descentralizadas. Ao analisar criticamente o cenário brasileiro sob a lente da transição energética, este ensaio contribui para a formação de uma visão informada e equilibrada sobre o papel da energia nuclear como fonte alternativa estratégica, capaz de complementar renováveis e substituir fósseis na busca por uma matriz elétrica sustentável, segura e economicamente viável.

2. ENERGIA NUCLEAR NO CONTEXTO BRASILEIRO: INFRAESTRUTURA, RECURSOS E POSICIONAMENTO ESTRATÉGICO

2.1. Infraestrutura nuclear instalada e capacidade operacional

A geração de energia elétrica por fissão nuclear no Brasil concentra-se exclusivamente no complexo da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), localizada em Angra dos Reis (RJ), operado pela Eletronuclear. As usinas somam 2.007 MW de potência instalada e geraram conjuntamente 14.558 GWh em 2022, quantidade suficiente para abastecer toda a região Centro-Oeste do país. Em 2023, as usinas atingiram fator de capacidade médio de 89% (ELETRONUCLEAR, 2025), índice superior à maioria das fontes térmicas e comparável aos melhores padrões internacionais.

Angra 1, primeira usina brasileira, iniciou operação comercial em 1985 utilizando tecnologia PWR (Pressurized Water Reactor) fornecida pela Westinghouse. Em dezembro de 2024, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou a extensão de sua vida útil por mais 20 anos, até 2044, decisão que resultará em redução de 13% no custo tarifário (de R$ 355/MWh em 2024 para R$ 308/MWh em 2025) devido à menor necessidade de provisões para descomissionamento. Angra 2, baseada em tecnologia alemã Siemens/KWU, demonstrou eficiência operacional superior, atingindo fator de capacidade de 90% já em seu primeiro ano de operação (ELETRONUCLEAR, 2024).

A terceira unidade, Angra 3, representa o maior desafio e oportunidade do setor nuclear brasileiro. Com 1.405 MW de potência projetada e capacidade de gerar 12 milhões de MWh/ano, suficiente para abastecer 4,5 milhões de pessoas, a usina teve suas obras iniciadas na década de 1980, interrompidas em 1986, retomadas em 2010 e novamente paralisadas em 2015 devido a investigações da Operação Lava Jato. Atualmente com 65% de conclusão física, a obra parada gera custos anuais de aproximadamente R$1 bilhão aos cofres públicos apenas para manutenção de equipamentos e segurança patrimonial. Segundo estimativas do Tribunal de Contas da União (TCU), se não houver definição sobre a conclusão, o custo total pode superar em R$43 bilhões o valor originalmente previsto de R$23 bilhões (BRASIL – TCU, 2025).

A retomada de Angra 3 tornou-se tema central no debate energético nacional. Em outubro de 2025, audiências públicas na Câmara dos Deputados e na Assembleia Legislativa do Rio de Janeiro discutiram os impactos financeiros e estratégicos da paralisação. Especialistas argumentam que abandonar a obra levaria ao colapso do setor nuclear brasileiro, incluindo a possível interrupção de Angra 1 e 2, pois instituições financeiras como BNDES e Caixa poderiam executar garantias e bloquear receitas operacionais. Em contrapartida, finalizar a usina exigirá investimentos de aproximadamente R$20 bilhões, mas ampliaria a participação nuclear para cerca de 3% da matriz elétrica nacional e geraria até 3.500 empregos diretos durante a construção (ELETRONUCLEAR, 2025).

Segundo a Eletronuclear (2025) (ELETRONUCLEAR, 2024), a energia nuclear também possui vantagens ambientais, com emissão média de 12 g/kWh de CO2, frente a 820 g/kWh de usinas a carvão. A usinas de Angra 1 e 2, juntas, evitam anualmente a emissão de cerca de 11,7 milhões de toneladas de CO2, em comparação a uma usina a carvão de mesma capacidade. Outro diferencial é a localização próxima aos centros de consumo e a compacidade da infraestrutura. Angra 3 ocupará apenas 0,08 km², muito inferior às áreas demandadas por usinas fotovoltaicas, eólicas ou hidrelétricas de capacidade semelhante.

2.2. Recursos minerais: a riqueza uranífera subutilizada

O Brasil possui recursos uraníferos de classe mundial, ocupando a sétima posição no ranking global com reservas medidas e inferidas de 232.813 toneladas de urânio (U_3O_8). As jazidas conhecidas distribuem-se principalmente na Província Uranífera de Lagoa Real (BA), com 87.000 toneladas, e em Santa Quitéria (CE), onde o urânio ocorre associado ao fosfato, totalizando 80.000 toneladas. Jazidas adicionais catalogadas, mas não exploradas localizam-se em Figueira (PR), Espinhara (PB), Amorinópolis (GO) e Rio Preto (GO) (ENERGIA, NEGÓCIOS E INOVAÇÃO, 2024).

Crucialmente, menos de um terço do território brasileiro foi alvo de prospecções geológicas sistemáticas, indicando potencial substancialmente maior. Estudos preliminares sugerem que a região Norte, especialmente em Pitinga (AM) e áreas do Pará, pode abrigar mais de 300.000 toneladas de urânio, consolidando o Brasil como potencial "pré-sal do urânio", analogia utilizada pelo Ministro de Minas e Energia para descrever a magnitude estratégica desses recursos.

A única mina em operação encontra-se em Caetité (BA), administrada pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB),

com capacidade atual de produção de 400 toneladas/ano de concentrado de urânio (*yellowcake*), podendo expandir para 800 t/ano mediante duplicação das instalações e exploração das minas do Engenho e da mina subterrânea. A produção atual é insuficiente para atender a demanda de Angra 1, 2 e futura Angra 3, que somadas requereriam cerca de 240 toneladas de urânio enriquecido anualmente, implicando necessidade de 2.000-2.500 toneladas de concentrado.

O projeto de expansão da produção uranífera brasileira de Santa Quitéria (CE) prevê produzir 2.300 toneladas anuais (ENERGIA, NEGÓCIOS E INOVAÇÃO, 2024) de concentrado de urânio associado à extração de fosfato. O empreendimento aguarda licenciamento ambiental do IBAMA desde 2020. A INB pretende captar R$80 bilhões em 15 anos (ENERGIA, NEGÓCIOS E INOVAÇÃO, 2024) mediante exploração de quatro projetos minerais, incluindo Santa Quitéria, visando tornar o Brasil exportador de urânio e diversificar receitas além do fornecimento à Eletronuclear.

Apesar da abundância de recursos, o Brasil enfrenta o paradoxo de possuir capacidade tecnológica para enriquecer urânio, sendo um dos 13 países com essa tecnologia, e ainda depender de importação de urânio enriquecido para suprir suas usinas. A Fábrica de Combustível Nuclear (FCN), em Resende (RJ), possui cascatas de ultracentrífugas capazes de enriquecer urânio a 4-5%, nível adequado para reatores civis, mas opera abaixo da capacidade plena devido à insuficiência de suprimento de concentrado nacional (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY et al., 2020).

2.3. Recursos minerais: a riqueza uranífera subutilizada

O Brasil destaca-se entre os poucos países com domínio completo do ciclo do combustível nuclear, desde a mineração até a fabricação de elementos combustíveis. Este domínio estratégico abrange:

- Mineração e beneficiamento: Operações em Caetité (BA) com técnicas de lixiviação ácida para extração de urânio, produzindo *yellowcake* (U_3O_8).
- Conversão: Capacidade de converter *yellowcake* em hexafluoreto de urânio (UF_6), forma química necessária para o enriquecimento.
- Enriquecimento: Tecnologia nacional de ultracentrifugação desenvolvida pela Marinha do Brasil e transferida para uso civil, com instalações em Resende. O Brasil domina o enriquecimento a níveis inferiores a 5%, adequados para geração elétrica, e desenvolve capacidade para níveis superiores necessários ao programa de propulsão nuclear de submarinos.
- Fabricação de elementos combustíveis: A FCN em Resende produz varetas combustíveis completas, fechando o ciclo e eliminando dependência externa nesta etapa crítica.
- Gestão de resíduos: Infraestrutura para armazenamento temporário de rejeitos de baixa e média radioatividade, embora ainda sem solução definitiva para repositório permanente.

Este domínio tecnológico confere ao Brasil autonomia estratégica e potencial para participar do mercado internacional de serviços nucleares. O programa de propulsão nuclear para submarinos, conduzido pela Marinha, desenvolve em paralelo competências aplicáveis à geração civil, incluindo reatores compactos e sistemas de segurança avançados. A expertise acumulada posiciona o país favoravelmente para eventuais desenvolvimentos de pequenos reatores modulares (SMRs), tecnologia emergente com aplicações em regiões isoladas, polos industriais e mineração.

2.4. Posicionamento na Matriz Elétrica: Participação Marginal e Potencial Subutilizado

Apesar dos ativos estratégicos previamente descritos, a energia nuclear contribui com apenas 2% da matriz elétrica brasileira, percentual marginal quando comparado a países que apostam na fissão nuclear como pilar energético: França (70%), Ucrânia (55%), Eslováquia (54%), Bélgica (48%), Hungria (48%). Mesmo entre economias emergentes, a China expandiu rapidamente sua capacidade nuclear para aproximadamente 5% da matriz, com mais de 50 reatores em construção.

A matriz elétrica brasileira em 2023 dividia-se em 58,9% hidráulica, 13,2% eólica, 8,0% biomassa, 7,0% solar, 8,7% gás natural, 2,0% nuclear e 1,0% carvão (BRASIL – EPE, 2025). Fontes renováveis somam 87,1% do total, configurando uma das matrizes mais limpas do mundo. Contudo, essa predominância renovável oculta vulnerabilidades, tais como: (a) perda de capacidade de regularização dos reservatórios hidrelétricos, com novas usinas predominantemente a fio d'água, reduzindo flexibilidade operacional; (b) intermitência das fontes solar e eólica, que não geram continuamente e exigem complementação térmica ou hídrica; (c) distância crescente entre novos empreendimentos hidrelétricos (região Norte) e centros de consumo (Sul-Sudeste), elevando custos de transmissão.

A energia nuclear oferece resposta a essas vulnerabilidades mediante geração de base contínua, independente de variações climáticas. Estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicam que o Plano Decenal de Expansão 2027 (PDE 2027) prevê necessidade de complementação de potência de 13.200 MW até 2027 para atender ao crescimento da demanda. O Plano Nacional de Energia 2050 projeta capacidade nuclear instalada entre 8 GW e 10 GW até meados do século, implicando a construção de três a quatro novas usinas além de Angra 3. Esta expansão, segundo o PNE, permitiria reduzir em 6 GW a necessidade de expansão solar fotovoltaica, equilibrando a matriz com fonte despachável e não-intermitente.

A contribuição estratégica da energia nuclear transcende a mera geração de energia elétrica. Como argumenta Cunha (2019), presidente da Associação Brasileira para o Desenvolvimento de Atividades Nucleares (ABDAN), a nuclear mitiga riscos de racionamento, reduz dependência de despacho térmico emergencial a custos elevados, e libera recursos hídricos para operação flexível de seguimento de carga (*load following*), otimizando o sistema elétrico como um todo. Em períodos de crise hídrica, como 2021, a confiabilidade nuclear torna-se ainda mais evidente: enquanto hidrelétricas reduzem geração devido a baixos níveis de reservatórios, usinas nucleares mantêm operação plena.

3. CUSTOS, COMPETITIVIDADE E VIABILIDADE DA EXPANSÃO NUCLEAR

3.1. Custo nivelado de energia (LCOE): comparações e limitações

O Custo Nivelado de Energia (LCOE, *Levelized Cost of Energy*) constitui-se na métrica padrão para comparar a viabilidade econômica de diferentes fontes de geração elétrica. O LCOE representa o custo médio por MWh ao longo da vida útil de um projeto, incluindo investimento inicial (CAPEX), operação e manutenção (OPEX) e financiamento. Análises recentes revelam disparidade significativa entre o LCOE nuclear e o de fontes renováveis no Brasil.

Segundo estudo da EPE de 2025, o LCOE estimado para Angra 3 situa-se em R$653/MWh, valor calculado pelo BNDES considerando custos acumulados e recursos necessários para conclusão da obra. Este montante contrasta drasticamente com fontes renováveis competitivas: eólica onshore apresenta LCOE médio de R$113/MWh; solar fotovoltaica, R$115/MWh; e hidrelétrica, R$130/MWh. Mesmo comparando com fontes não-renováveis, a nuclear mostra-se mais cara: térmica a gás em ciclo combinado custa aproximadamente R$240/MWh (ELETRONUCLEAR, 2024).

Estudos internacionais confirmam essa tendência. Relatório da IEA (2025) indica que o LCOE nuclear varia conforme a região: Ásia (China, Índia) apresenta US$75/MWh, Estados Unidos US$110/MWh, e União Europeia US$170/MWh. O Brasil, com LCOE estimado em US$130/MWh para nuclear, posiciona-se em patamar intermediário, mas significativamente acima das renováveis, cujo LCOE situa-se entre US$23-26/MWh globalmente (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY et al., 2020).

A principal razão para custos nucleares elevados reside no CAPEX intensivo. Construir uma usina nuclear exige investimentos de US$6.500 a US$12.250 por kW instalado, montante duas a três vezes superior ao de parques eólicos ou solares. No caso de Angra 3, estimativas convergem para R$20-23 bilhões necessários para conclusão, custo agravado por décadas de paralisação e inflação acumulada. Adicionalmente, o longo período de maturação dos projetos nucleares (8-12 anos da construção à operação comercial) eleva os riscos financeiros e dificulta a captação de investimentos privados.

Contudo, críticos argumentam que comparações diretas de LCOE entre fontes base load (nuclear, térmica) e fontes intermitentes (solar, eólica) são metodologicamente limitadas. O LCOE não captura o valor sistêmico de atributos como confiabilidade, despachabilidade e serviços auxiliares. Estudo da PSR/Instituto Escolhas (2018) [34] demonstra que, ao incluir custos de modulação, sazonalização, infraestrutura de transmissão e reserva probabilística, o custo sistêmico total de fontes renováveis aumenta substancialmente: solar no Sudeste passa de R$ 226/MWh (LCOE puro) para R$ 328/MWh considerando todos os atributos, enquanto nuclear de Angra 3 sobe de R$ 453/MWh (LCOE) para R$ 528/MWh.

Mesmo com essa correção metodológica, a solar permanece R$200/MWh mais barata que a nuclear. Entretanto, a análise revela que nem todo MWh é economicamente igual: a capacidade nuclear de fornecer energia continuamente sem necessidade de backup térmico ou armazenamento agrega valor ao sistema elétrico que métricas simples de LCOE não capturam.

3.2. Impactos financeiros e tarifários: o dilema de Angra 3

A decisão sobre a conclusão de Angra 3 representa o maior dilema econômico do setor nuclear brasileiro. Estudo da EPE de 2025, embora sigiloso, foi parcialmente revelado por veículos de imprensa, indicando que a finalização da usina poderá gerar impacto tarifário entre R$21 bilhões e R$61,5 bilhões aos consumidores brasileiros ao longo de 40 anos, dependendo do cenário de financiamento e contratação adotado. Este impacto resulta da diferença entre o custo da energia nuclear (R$653/MWh) e alternativas mais baratas disponíveis no mercado.

A EPE contestou a abordagem da imprensa, argumentando que o relatório apresenta análise "abrangente e estratégica", não se limitando a comparações tarifárias, mas considerando segurança energética, soberania tecnológica e benefícios regionais. De fato, a análise puramente tarifária ignora externalidades positivas como: (a) geração de 3.500 empregos diretos durante a construção; (b) fortalecimento da cadeia produtiva nuclear nacional (Nuclep, INB, Eletronuclear); (c) manutenção de expertise tecnológica estratégica; (d) redução de vulnerabilidade a flutuações de preços de combustíveis fósseis.

Em contrapartida, abandonar Angra 3 implicaria custos imediatos e estruturais, destacando-se: (a) R$ 14 bilhões para pagamento de dívidas e descomissionamento do canteiro de obras; (b) possível execução de garantias pelo BNDES e Caixa, bloqueando receitas de Angra 2 e inviabilizando operação contínua das usinas existentes; (c) perda irreversível de R$ 7,8 bilhões já investidos na obra; (d) colapso do setor nuclear brasileiro, eliminando perspectivas futuras de expansão

e condenando o país à dependência de fontes fósseis em momentos de crise hídrica (BRASIL – TCU, 2025).

Análise de viabilidade econômica realizada por pesquisadores da UFPE (2025) avaliou o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) de Angra 3, concluindo que o projeto é "não apenas viável, mas vantajoso do ponto de vista financeiro" quando considerados prazos de operação de 60 anos e benefícios sistêmicos. Os autores argumentam que a estabilidade tarifária da nuclear, com LCOE competitivo frente às térmicas convencionais e superior confiabilidade, justifica economicamente a conclusão da obra, especialmente se integrada a estratégias de descarbonização de longo prazo (BRASIL – TCU, 2025).

3.3. Fontes renováveis: competitividade crescente e complementaridade

A expressiva redução dos custos das energias renováveis nos últimos 15 anos transformou o cenário energético global. No Brasil, leilões de energia eólica desde 2017 apresentam preço médio de R$113/MWh, enquanto solar fotovoltaica gira em torno de R$115/MWh, valores cinco vezes menores que em 2013. Globalmente, o custo de módulos fotovoltaicos caiu 86% na última década, impulsionado por avanços tecnológicos, melhoria de processos produtivos e economias de escala. Relatório da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) de 2025 confirma que 91% dos novos projetos renováveis mundiais em 2024 apresentaram custos inferiores às opções fósseis mais baratas. No Brasil, a eólica *onshore* custa em média US$0,030/kWh, abaixo da média global de US$0,034/kWh, enquanto a solar situa-se em US$0,048/kWh. Esta competitividade posiciona o Brasil entre os países com energia renovável mais barata do mundo, atraindo investimentos recordes de R$53 bilhões em 2024, gerando 457 mil empregos diretos e indiretos (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY et al., 2025).

A expansão renovável brasileira em 2025 foi significativa: 5.921 MW adicionados entre janeiro e setembro (BRASIL – EPE, 2025), sendo 1.718 MW solares, 1.506 MW eólicos e 2.468 MW térmicos sendo 40,6% da energia produzida por fontes de biomassa e o restante, 59,4%, sendo gerado por fontes fósseis e nuclear. . Esta dinâmica reforça a matriz predominantemente renovável, mas evidencia também o papel persistente das térmicas, acionadas para garantir segurança em momentos desfavoráveis em termos hidrológicos e/ou de vento insuficiente.

Visto tal panorama, a energia nuclear e renováveis não são antagônicas, mas complementares. Enquanto solar e eólica oferecem custos marginais baixíssimos, mas sofrem intermitência, a nuclear provê energia de base estável. Estudos da EPE demonstram que expandir a participação renovável para 44% da matriz até 2035 é viável sem aumentos relevantes no custo sistêmico, isto é, sem elevar de forma significativa o custo total do sistema elétrico para atender à demanda com segurança, incluindo não só o custo de geração, mas também os gastos com transmissão, distribuição, operação da rede, acionamento de usinas de apoio e demais encargos necessários para garantir confiabilidade ao fornecimento de energia, desde que combinada com fontes despacháveis (nuclear, térmica a gás, hidrelétrica regularizada). Esta sinergia, fontes renováveis para redução de custos médios e nuclear para estabilidade, emerge como estratégia ótima para o Brasil. Estudos da EPE demonstram que expandir a participação renovável para 44% da matriz até 2035 é viável sem aumentos relevantes no custo sistêmico, isto é, sem elevar de forma significativa o custo total do sistema elétrico para atender à demanda com segurança, incluindo não só o custo de geração, mas também os gastos com transmissão, distribuição, operação da rede, acionamento de usinas de apoio e demais encargos necessários para garantir confiabilidade ao fornecimento de energia.

3.4. Economia de escala e tecnologias emergentes

A economia de escala constitui argumento frequente dos defensores da expansão nuclear. Países como França e Coreia do Sul reduziram custos significativamente mediante programas nucleares contínuos, que permitiram padronização de projetos, capacitação de mão-de-obra especializada e desenvolvimento de cadeias de suprimento eficientes. No Brasil, a construção intermitente, Angra 1 em 1972-1985, Angra 2 em 1976-2001, Angra 3 iniciada em 1984 e paralisada, impediu a criação dessa economia de escala, mantendo custos elevados.

O PNE 2050 projeta a construção de 10 a 12 novas usinas até 2060, o que, se implementado consistentemente, poderia reduzir custos unitários em 20-30% mediante aprendizado tecnológico e industrial. Contudo, a viabilização desse programa depende de reformas institucionais, desburocratização regulatória e atração de investimentos privados.

Uma alternativa promissora emerge com os pequenos reatores modulares (SMRs - *Small Modular Reactors*), reatores de 30 a 300 MW projetados para fabricação modular, instalação rápida e operação flexível. SMRs oferecem vantagens estratégicas, tais como: (a) construção em fábrica e transporte, reduzindo prazos de 8-12 anos para 3-5 anos; (b) investimento inicial menor (US$ 500- 1.100/kW estimado pela IEA), facilitando financiamento; (c) aplicações descentralizadas em mineração, datacenters, comunidades isoladas da Amazônia; (d) segurança passiva aprimorada, com sistemas que operam por princípios físicos sem intervenção humana.

A China e Rússia já operam SMRs comerciais, enquanto Estados Unidos, Canadá e Reino Unido desenvolvem projetos-piloto. No Brasil, a CNEN iniciou em 2025 revisão do marco regulatório para viabilizar licenciamento de SMRs, incluindo consultas públicas sobre localização, transporte e segurança cibernética. Fórum SMR conduzido pela EPE e Abdan entre 2022-2024 reuniu especialistas para discutir viabilidade técnica, econômica e regulatória dessa tecnologia no contexto brasileiro. Pesquisadores da UFABC, em parceria com a Marinha, desenvolvem protótipo de micro reator

nuclear de 1-5 MW, capaz de abastecer comunidades de até 5.000 habitantes, tecnologia que coloca o Brasil entre os pioneiros nesse segmento (PLANAS, 2024). Estima-se que SMRs possam alcançar LCOE inferior a US$40/MWh (cerca de R$200/MWh) em escala comercial até 2030, tornando-se competitivos com solar e eólica, especialmente quando valorizada sua despachabilidade. Esta promessa tecnológica reforça o argumento de que a energia nuclear, longe de ser opção obsoleta, pode integrar o portfólio de soluções para a transição energética do século XXI (LIOU; IAEA, 2023).

3.5. Políticas públicas e continuidade do programa energético

A descontinuidade de políticas públicas constitui obstáculo estrutural ao desenvolvimento nuclear brasileiro. Ao contrário de programas nucleares bem-sucedidos (França, Coreia do Sul, China), que se sustentaram por décadas independentemente de alternâncias governamentais, o Brasil experimenta ciclos de euforia e abandono, refletindo prioridades mutáveis de cada administração.

O presidente da CNEN, Francisco Rondinelli, propôs em 2025 a elaboração de novo Programa Nuclear Brasileiro (PNB), estruturado em dez eixos temáticos com metas de curto, médio e longo prazos, coordenado pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e supervisionado pelo Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro (CDPNB). A proposta prevê reuniões temáticas ao longo de 2026, aprovação em 2027 e implementação até 2060, visando a construção de 10 a 12 usinas. O PNB deve ser "projeto de Estado, não de governo", com aprovação presidencial e compromisso suprapartidário de continuidade. Sem essa visão de Estado, argumenta, o setor permanecerá refém de oscilações políticas, incapaz de atrair investimentos de longo prazo e desenvolver cadeia produtiva sustentável.

A inclusão da mineração de urânio entre os eixos temáticos é fundamental. O presidente da CNEN defende que discussões sobre marco regulatório da mineração nuclear integrem o PNB, considerando a recente autorização para participação privada na extração de urânio (Lei nº 14.514/2022) e os debates sobre regime de partilha de produção, semelhante ao pré-sal. Sem exploração efetiva das reservas nacionais, o Brasil continuará importando urânio enriquecido, paradoxo insustentável para país com sétima maior reserva mundial (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. 2025).

4. DIMENSÕES ÉTICAS E SOCIAIS: ACEITAÇÃO PÚBLICA, RISCOS E GESTÃO RESPONSÁVEL

4.1. Percepção social da energia nuclear: entre medo e desinformação

A aceitação pública da energia nuclear constitui desafio global, amplificado no Brasil por fatores históricos e culturais. A pesquisa internacional *Public Attitudes toward Clean Energy* (PACE 2025), conduzida em 31 países, revela que 46% dos entrevistados apoiam energia nuclear, enquanto 23% se opõem. A redução de 28% para 23% na oposição, comparada à edição anterior, sugere melhoria gradual na percepção global. Países como Finlândia, França, Suécia e Polônia apresentam apoio superior a 40%, com disposição para subsidiar novos projetos nucleares equiparável à solar e à eólica (RAZUCK, 2025).

No Brasil, contudo, pesquisas específicas de aceitação nuclear são escassas, embora episódios recentes indiquem resistência significativa. O vazamento de água radioativa em Angra 1 (setembro de 2022), inicialmente omitido pela Eletronuclear e revelado apenas meses depois mediante denúncia anônima ao IBAMA, gerou crise de confiança entre moradores de Angra dos Reis e Paraty. Audiências públicas realizadas em março e maio de 2023 evidenciaram desconfiança da população quanto à transparência operacional e à capacidade de resposta a emergências.

Especialistas atribuem a resistência social a três fatores principais: (a) memória coletiva de acidentes históricos (Chernobyl 1986, Fukushima 2011, Goiânia 1987), que associam energia nuclear a catástrofes; (b) desinformação e escassez de educação científica sobre diferenças entre acidentes em reatores civis, eventos militares (bombas atômicas) e contaminação por fontes médicas; (c) falta de transparência e comunicação proativa das empresas e órgãos reguladores, que alimenta teorias conspiratórias e amplia medos.

Organizações da sociedade civil, como o Movimento Antinuclear Brasileiro (MAB), criticam duramente a expansão nuclear, apontando riscos de acidentes, ausência de plano adequado de emergência, falta de autonomia da CNEN (que regula, mas também promove atividades nucleares). O MAB denuncia também um suposto histórico de omissões por parte da Eletronuclear. A própria classificação da energia nuclear como "limpa" ou "verde" é contestada, argumentando-se que, embora não emita CO_2 durante a operação, o ciclo completo (mineração, enriquecimento, construção de usinas, descomissionamento) possui pegada ambiental significativa.

4.2. Gestão de resíduos radioativos: o calcanhar de Aquiles nuclear

A gestão de rejeitos radioativos representa, inequivocamente, o desafio ético e ambiental mais crítico da energia nuclear. Resíduos de alta radioatividade, como elementos combustíveis usados, permanecem perigosos por milhares de anos, exigindo armazenamento seguro, monitoramento perpétuo e garantias de isolamento da biosfera. No Brasil, essa questão permanece sem solução definitiva, configurando passivo ambiental crescente.

Atualmente, o complexo de Angra armazena 2.777 m³ de rejeitos radioativos de baixa e média atividade (luvas,

ferramentas, roupas contaminadas) em depósitos provisórios dentro da área da CNAAA. Os elementos combustíveis usados (alta radioatividade) são mantidos em piscinas especiais dentro dos prédios de segurança das usinas, aguardando eventual reprocessamento ou destinação final. Com Angra 1 e 2 em operação há décadas e Angra 3 prevista para 2028-2030, a capacidade de armazenamento temporário se esgotará entre 2028 e 2030.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) está finalizando estudos para definir o projeto do Centro Tecnológico Nuclear e Ambiental (Centena), repositório destinado a rejeitos de baixa e média radioatividade. Cinco cidades do Sudeste estão sob análise para sediar o Centena, mas a escolha permanece indefinida por questões políticas e receio de rejeição comunitária. Estimativas indicam que o projeto pode exigir investimentos de até R$300 milhões e levar cinco anos para conclusão.

Para rejeitos de alta radioatividade (combustível usado), o Brasil não possui sequer projeto consolidado de repositório geológico definitivo, solução tecnicamente recomendada pela IAEA e adotada por países como Finlândia (repositório Onkalo, em operação) e Suécia (em construção). A opção de reprocessamento, que permitiria extrair urânio e plutônio reutilizáveis, permanece vedada por compromissos internacionais de não-proliferação, embora pesquisas acadêmicas explorem viabilidade técnica.

Comparações com outros países revelam que mesmo nações com programas nucleares maduros enfrentam dificuldades: Estados Unidos abandonou o projeto de repositório Yucca Mountain após bilhões investidos; Alemanha debate há décadas a destinação de rejeitos. No Brasil, a ausência de repositório definitivo coloca em risco a continuidade operacional das usinas existentes, pois o enchimento das piscinas de armazenamento forçaria paradas para transferência a depósitos a seco, operação complexa e custosa.

4.3. Segurança operacional e riscos de acidentes: lições de Chernobyl e Fukushima

A segurança nuclear evoluiu significativamente desde os acidentes de Chernobyl (1986) e Three Mile Island (1979), incorporando múltiplas barreiras de contenção, sistemas redundantes de resfriamento, cultura de segurança rigorosa e fiscalização internacional. O acidente de Fukushima (2011), contudo, demonstrou que desastres naturais extremos (terremoto magnitude 9,0 seguido de tsunami) podem superar defesas projetadas, resultando em fusões de núcleo e liberação de radioatividade.

Especialistas enfatizam que acidentes em usinas nucleares são eventos raríssimos, com probabilidade estimada em 1 em 100.000 reatores-ano para projetos modernos. Os mais de 400 reatores operando globalmente acumulam milhares de reatores-ano de operação segura, taxa de acidentes significativamente inferior à de indústrias químicas ou petrolíferas. No caso brasileiro, Angra 1 e 2 operam há 40 e 24 anos, respectivamente, sem acidentes graves, demonstrando maturidade operacional.

Contudo, o vazamento de Angra 1 em setembro de 2022, embora de pequena escala (90 litros de água contaminada), revelou falhas graves de comunicação e transparência. A Eletronuclear demorou 21 dias para informar o CNEN e o IBAMA, violando protocolos de notificação imediata. A tentativa inicial de negar o vazamento quando confrontada por fiscais do IBAMA agravou a percepção de ocultação. Embora análises técnicas confirmassem que os níveis de radioatividade na água despejada no mar estavam abaixo dos limites regulatórios, não representando risco à saúde pública ou ecossistemas marinhos, o episódio corroeu a confiança da população e autoridades locais.

Prefeituras de Angra dos Reis e Paraty cobraram publicamente contrapartidas ambientais e questionaram a eficácia do Plano de Emergência Nuclear. Movimento Antinuclear Brasileiro e ONGs ambientalistas classificaram o incidente como prova da falta de controle efetivo sobre atividades nucleares na região. A multa de R$2 milhões aplicada pelo IBAMA, embora simbólica frente ao orçamento da Eletronuclear, sinalizou que omissões não serão toleradas. A cultura de segurança no setor nuclear brasileiro requer fortalecimento urgente. Programas de aceitação pública conduzidos pela ABEN (Associação Brasileira de Energia Nuclear) e Eletronuclear enfatizam a necessidade de "abrir as portas" do setor, promover visitas guiadas, tours virtuais, educação científica em escolas e diálogo permanente com comunidades. O presidente da Eletronuclear afirmou em 2024 que "diminuir o desconhecimento da população" é essencial para ampliar aceitação e apoio político à expansão nuclear.

4.4. Energia nuclear e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: contradições e sinergias

A relação entre a energia nuclear e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 revela-se intrinsecamente ambivalente. Por um lado, essa fonte energética contribui de maneira significativa para metas globais associadas à transição energética e ao desenvolvimento científico-tecnológico. Destacam-se as sinergias com o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ao fornecer eletricidade abundante, estável e de baixa emissão de carbono, essencial para o desenvolvimento socioeconômico; com o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Climática), por reduzir substancialmente as emissões de CO_2 ao substituir termelétricas baseadas em combustíveis fósseis; e com o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao impulsionar a pesquisa científica, a inovação tecnológica e a qualificação de mão de obra especializada.

Por outro lado, emergem tensões éticas e ambientais que evidenciam as limitações e contradições desse modelo energético. Entre elas, destacam-se os riscos relacionados ao ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), em razão da possibilidade, ainda que remota, de acidentes nucleares e contaminação radioativa; ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento), devido ao

aquecimento e à potencial contaminação de recursos hídricos decorrentes de descargas térmicas; ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), uma vez que a geração de resíduos radioativos de longa duração desafia os princípios de sustentabilidade intergeracional; e ao ODS 16 (Paz, Justiça e Instituições Eficazes), em virtude da opacidade informacional, de conflitos socioambientais e dos riscos de proliferação nuclear, que comprometem a confiança pública e a legitimidade institucional.

Nesse contexto, a postura ética defensável em relação à energia nuclear não deve basear-se em uma rejeição absoluta, que ignora seus benefícios climáticos e estratégicos, nem em uma aceitação acrítica, que desconsidera seus riscos e externalidades. Requer-se, antes, uma abordagem precaucionaria sólida, em que a expansão nuclear esteja condicionada a princípios de transparência radical, com divulgação proativa de informações operacionais, planos de emergência e práticas de gestão de resíduos; de participação social efetiva, mediante consultas públicas vinculantes e envolvimento das comunidades potencialmente afetadas; e de investimento contínuo em segurança, incluindo a adoção de reatores de Geração III+ e IV, sistemas de segurança passiva e fiscalização independente fortalecida. Finalmente, torna-se indispensável o estabelecimento de soluções definitivas para os resíduos radioativos e a integração planejada com fontes renováveis, de modo a articular a estabilidade da energia nuclear com a variabilidade das fontes solar e eólica, promovendo um sistema energético complementar, seguro e sustentável.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS: ENERGIA NUCLEAR COMO OPÇÃO ESTRATÉGICA CONDICIONADA

A análise desenvolvida neste ensaio sustenta a tese de que a fissão nuclear constitui complemento estratégico viável à matriz energética brasileira, desde que superados os desafios regulatórios e sociais que atualmente limitam sua expansão. Três conclusões principais emergem da investigação:

i) O Brasil possui ativos excepcionais para desenvolvimento nuclear, sétima maior reserva mundial de urânio, domínio tecnológico completo do ciclo do combustível, infraestrutura operacional consolidada e expertise técnico-científica acumulada em décadas. Esses ativos conferem autonomia estratégica e potencial para participação ativa na economia nuclear global, seja mediante exportação de urânio e serviços, seja por desenvolvimento de tecnologias próprias (SMRs, microrreatores). Desperdiçar esse capital mediante abandono do setor seria erro estratégico de longo prazo, reduzindo opções futuras para descarbonização e segurança energética.
ii) Os obstáculos à expansão nuclear não são primariamente técnicos, mas socioeconômicos e institucionais. O LCOE elevado (R$ 653/MWh para Angra 3 versus R$ 113-115/MWh para eólica/solar) torna a nuclear competitiva apenas quando valorizada sua despachabilidade e serviços sistêmicos, argumento insuficiente para justificar custos tarifários adicionais aos consumidores sem reformas que reduzam CAPEX mediante economia de escala e tecnologias modulares (SMRs). O arcabouço regulatório fragmentado, processos lentos de licenciamento e descontinuidade de políticas públicas inviabilizam planejamento empresarial e afastam investimentos. A resistência social, amplificada por falhas de comunicação e omissões (vazamento de Angra 1), corrói a legitimidade do setor e dificulta aprovação de novos projetos.
iii) A superação desses obstáculos é possível, mas exige reformas estruturais coordenadas, a saber: (a) consolidação regulatória mediante fortalecimento da ANSN como autoridade independente, unificação de licenciamentos, estabelecimento de prazos vinculantes e modernização normativa para SMRs; (b) transparência radical e comunicação proativa, incluindo divulgação em tempo real de incidentes, consultas públicas vinculantes e programas permanentes de educação científica; (c) solução prioritária para gestão de resíduos, com definição de repositório definitivo antes de expansão adicional; (d) estratégia integrada nuclear-renováveis, combinando a estabilidade da geração de base nuclear com a intermitência das renováveis, otimizando custos e segurança sistêmica; (e) visão de Estado de longo prazo, materializada em novo Programa Nuclear Brasileiro, com compromissos suprapartidários e recursos garantidos.

A energia nuclear no Brasil encontra-se, assim, em um momento decisivo. A retomada de Angra 3, decisão iminente do CNPE, será sinalizadora, pois sua conclusão pode revitalizar o setor, atraindo investimentos, capacitando mão-de-obra e viabilizando expansões futuras. Seu abandono, inversamente, levará ao fim das aspirações nucleares brasileiras, condenando o país à dependência de termoelétricas fósseis em crises hídricas e à subexploração de recursos uraníferos estratégicos.

A posição defendida neste ensaio é de aprovação condicional da expansão nuclear, concordando com a conclusão de Angra 3 e com o desenvolvimento de SMRs, mas condicionado a reformas institucionais, solução para a questão dos resíduos, transparência ampliada e planejamento integrado com renováveis. A energia nuclear não é panaceia, seus custos elevados, riscos residuais e desafios éticos persistem, mas tampouco é anacrônica: configura opção estratégica em portfólio diversificado de fontes que, combinando base nuclear, complementaridade renovável e eficiência energética, pode garantir ao Brasil matriz elétrica sustentável, segura e soberana na transição energética do século XXI.

O debate sobre energia nuclear transcende questões meramente técnicas ou econômicas, envolvendo escolhas éticas sobre que futuro energético desejamos construir e quais riscos estamos dispostos a aceitar. Informação qualificada, participação democrática e precaução responsável devem guiar essas escolhas, evitando tanto a paralisia do medo quanto

a arrogância tecnológica. A fissão nuclear, nascida em meio a guerras e tragédias, pode, se rigorosamente regulada, transparentemente operada e socialmente legitimada a contribuir para um futuro energético mais limpo, seguro e justo. Esse potencial, contudo, não se realizará automaticamente: dependerá da capacidade coletiva de aprender com erros passados, dialogar com comunidades afetadas e construir instituições robustas capazes de administrar tecnologias poderosas com sabedoria e responsabilidade.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES NUCLEARES. Metodologia para cálculo de atributos das fontes é lançado. Disponível em: https://abrapch.org.br/2018/10/metodologia-para-calculo-de-atributos-das-fontes-e-lancado/. Acesso em: 4 nov. 2025.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Projeto Angra 3. Apresentação no âmbito da Câmara dos Deputados, Brasília, 25 set. 2025. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/apresentacoes-em-eventos/apresentacao-de-convidados-2025/continuidade-da-obra-de-angra-3/5_BNDES.pdf. Acesso em: 4 nov. 2025.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2025 (BEN 2025): Síntese 2025. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_Síntese_2025_PT.pdf. Acesso em: 4 nov. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Discussão do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034: Apresentação EPE. Câmara dos Deputados, Brasília, 27 set. 2025. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/apresentacoes-em-eventos/apresentacao-de-convidados-2025/30-09-2025-10h-discussao-do-plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde-2034/1.%20EPE.pdf. Acesso em: 4 nov. 2025.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. Auditoria da estruturação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN): Aviso nº 190/GP/TCU, de 12 de março de 2025. Brasília: **TCU**, 2025. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cmads/outros-documentos/auditorias-do-tribunal-de-contas-da-uniao/auditoria-da-estruturacao-da-autoridade-nacional-de-seguranca-nuclear-ansn-aviso-no-190-gp-tcu-de-12-03-2025/view. Acesso em: 4 nov. 2025.

ELETRONUCLEAR. Angra 3: atualizações sobre o futuro da energia nuclear no Brasil. Rio de Janeiro: Eletronuclear, 2025. Disponível em: https://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Paginas/Angra-3,-atualiza%C3%A7%C3%B5es-sobre-o-futuro-da-energia-nuclear-no-Brasil.aspx. Acesso em: 4 nov. 2025.

ELETRONUCLEAR. Central Nuclear gerou mais de 15 milhões de MWh em 2024. Rio de Janeiro: Eletronuclear, 2024. Disponível em: https://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Paginas/Central-Nuclear-gerou-mais-de-15-milh%C3%B5es-de-MWh-em-2024.aspx. Acesso em: 4 nov. 2025.

ENERGIA, NEGÓCIOS E INOVAÇÃO. INB pretende tornar Brasil exportador de urânio. Brasília, 2024. Disponível em: https://enbpar.gov.br/inb-pretende-tornar-brasil-exportador-de-uranio/. Acesso em: 4 nov. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; NUCLEAR ENERGY AGENCY; OECD. Projected Costs of Generating Electricity: 2020 Edition. London: World Nuclear Association**,** 2020. Disponível em: https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power. Acesso em: 4 nov. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY; COP30 Presidency; Global Renewables Alliance. Delivering on the UAE Consensus: Tracking progress toward tripling renewable energy capacity and doubling energy efficiency by 2030. Abu Dhabi: **IRENA**, out. 2025. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Oct/IRENA_COP30_GRA_Tracking_the_UAE_Consensus_2025.pdf. Acesso em: 4 nov. 2025.

PLANAS, O. Pequenos reatores nucleares modulares (SMR). Energia-Nuclear.net, 22 abr. 2024. Disponível em: https://pt.energia-nuclear.net/usinas-nucleares/reator-nuclear/tipos/reatores-modulares-pequenos-smr. Acesso em: 5 nov. 2025.

LIOU, J.; **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA**, Office of Public Information and Communication. What are Small Modular Reactors (SMRs)? Vienna: **IAEA**, 2023. Disponível em: https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs. Acesso em: 5 nov. 2025.

RAZUCK, F. B. An Analysis of Brazil's Situation in the The Public Attitudes toward Clean Energy (PACE) Index in regard to Nuclear Energy. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4B, e2522, 2025. DOI: https://doi.org/10.15392/2319-0612.2024.2522. Disponível em: https://www.bjrs.org.br/revista/index.php/REVISTA/article/download/2522/1719/23303. Acesso em: 4 nov. 2025.

7. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Em conformidade com a Resolução Unesp n° 13, de 22 de abril de 2025, os autores declaram que o Perplexity foi utilizado na revisão gramatical e para configuração textual do texto, e que o resultado foi validado. Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste ensaio.