

RESÍDUOS QUE GERAM ENERGIA – A VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE ORGÂNICOS VIA BIODIGESTÃO NO CONTEXTO DO PROGRAMA DE ACELERAÇÃO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA (PATEN) E OS NOVOS CAMINHOS PARA A SUSTENTABILIDADE NO BRASIL

WASTE THAT GENERATES ENERGY – THE ENERGETIC RECOVERY OF ORGANIC MATTER THROUGH BIODIGESTION IN THE CONTEXT OF THE ENERGY TRANSITION ACCELERATION PROGRAM (PATEN) AND NEW PATHWAYS FOR SUSTAINABILITY IN BRAZIL

RESIDUOS QUE GENERAN ENERGÍA – LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE ORGÁNICOS MEDIANTE BIODIGESTIÓN EN EL CONTEXTO DEL PROGRAMA DE ACELERACIÓN DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA (PATEN) Y LOS NUEVOS CAMINOS HACIA LA SOSTENIBILIDAD EN BRASIL



<https://doi.org/10.56238/ERR01v10n5-028>

Kleberson Ricardo de Oliveira Pereira

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Instituição: Universidade de São Paulo (USP)

E-mail: klebersonric@gmail.com

Antonio Fluminhan

Doutor em Agricultural Sciences

Instituição: Tohoku University/Japão

E-mail: antoniofluminhan@gmail.com

Tatiane Caroline Ferrari

Doutora em Engenharia Química

Instituição: Universidade Estadual do Paraná (UNESPAR)

E-mail: taticferrari@gmail.com

Felipe Piancatelli

Doutorando em Engenharia Agrícola

Instituição: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

E-mail: f197806@dac.unicamp.br

Ítalo Emanuel Rolemberg dos Santos

Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente

Instituição: Universidade Federal de Sergipe (UFS)

E-mail: italogrh@yahoo.com.br

Rodrigo Andrade dos Santos

Mestre em Engenharia Civil

Instituição: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT)

E-mail: sarodrigoandrade@gmail.com

Fábio Belemer Pereira

Especialista em Indústria 4.0

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

E-mail: fbelemer@outlook.com

Felipe Matos Farias

Graduado em Ciências Econômicas

Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)

E-mail: felipe.rhios@gmail.com

Marcele Gomes Silva de Sousa

Mestra em Gestão de Políticas Públicas

Instituição: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)

E-mail: cellesilva@uefs.br

Sinara Martins Camelo

Doutora em Engenharia Ambiental

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

E-mail: martinscamelosi@gmail.com

Christian Ricardo Silva Passos

Doutor em Biologia e Biotecnologia de Microrganismos

Instituição: Instituto Federal da Bahia (IFBA)

E-mail: christian@ifba.edu.br

Emerson Monteiro dos Santos

Doutor em Zoologia e Ecologia

Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)

E-mail: emerson@unifap.br

Wesley Roan Martins Gomes

Mestrando em Ciências

Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares (IPEN)

E-mail: wesleymartins@usp.br

Airton Kleber Gomes Matos

Especialista em Segurança do Trabalho e Gestão Ambiental

Instituição: Universidade Cândido Mendes do Rio de Janeiro (UCAM/RJ)

E-mail: airton_agronomo@yahoo.com

Francisco Dione da Silva Souza

Especialista em Formação para Energias Renováveis

Instituição: Faculdade de Tecnologia CENTEC (FATEC)

E-mail: fdionesouza@yahoo.com

Antonio Tales Sampaio Gomes

Especialista em Formação para Energias Renováveis

Instituição: Faculdade de Tecnologia CENTEC (FATEC)

E-mail: tales.sampaio34@gmail.com

Jose Hiago Bezerra Alves

Graduando em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

E-mail: hiagoalves.engcivil@gmail.com

RESUMO

A crescente preocupação com a crise climática e a necessidade de diversificação da matriz energética brasileira têm impulsionado novas estratégias voltadas à sustentabilidade e ao uso racional dos recursos naturais. Nesse cenário, a valorização energética de resíduos orgânicos surge como alternativa concreta para reduzir emissões, promover economia circular e fortalecer a segurança energética nacional. O Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN), lançado recentemente pelo Governo Federal, estabelece diretrizes e incentivos para projetos que integrem inovação tecnológica, sustentabilidade e geração de energia limpa a partir de fontes renováveis. Entre essas, a biodigestão desporta como tecnologia promissora, capaz de transformar resíduos agroindustriais, urbanos e rurais em biogás e biofertilizantes, reduzindo impactos ambientais e agregando valor econômico aos resíduos antes descartados. O objeto deste artigo é analisar criticamente o potencial da valorização energética de orgânicos via biodigestão no contexto do PATEN, destacando suas contribuições para a transição energética e para o desenvolvimento sustentável no Brasil. A pergunta de partida que orienta a pesquisa é: de que modo a biodigestão de resíduos orgânicos, apoiada pelas diretrizes do PATEN, pode se consolidar como eixo estratégico para a sustentabilidade e a soberania energética brasileira? Para isso, teoricamente, fizemos uso dos trabalhos de Wellinger (2013), Gerardi (2003), Holm-Nielsen (2016), Stryi-Hipp (2016), Lovins (2011), Rifkin (2000; 2019), Sachs (2002; 2008; 2009), Beck (1992; 2001; 2010), Goldemberg e Lucon (2007), Harvey (2005; 2006; 2011), Silva e Arbillia (2022), Gadotti (2000; 2008; 2012), Leff (2001; 2006; 2010), Brown (2009), Meadows (2004), Daly (1991; 1996), Latouche (2009), Veiga (2010; 2015), Acselrad (2004; 2010), Lovins e Cohen (2018), Deublein e Steinhauser (2008), bem como o texto normativo do Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN), entre outros. A pesquisa é qualitativa (Minayo, 2007), descritiva e bibliográfica (Gil, 20008) e com o viés analítico compreensivo (Weber, 1949). Os resultados da pesquisa demonstraram que a biodigestão, integrada às diretrizes do PATEN, constitui uma das mais promissoras estratégias de transição energética no Brasil, articulando inovação tecnológica, inclusão social e sustentabilidade ambiental. Observou-se que o aproveitamento energético de resíduos orgânicos fortalece a soberania energética nacional, reduz emissões e promove a economia circular. Além disso, o PATEN revela-se essencial para viabilizar a expansão da biodigestão em diferentes escalas, assegurando apoio técnico, financeiro e regulatório. Assim, a pesquisa evidencia que o binômio PATEN-biodigestão consolida um novo paradigma de desenvolvimento baseado na sinergia entre energia limpa, gestão de resíduos e justiça ambiental.



Palavras-chave: PATEN. Biodigestão. Sustentabilidade. Transição Energética.

ABSTRACT

The growing concern with the climate crisis and the need to diversify Brazil's energy matrix have driven new strategies focused on sustainability and the rational use of natural resources. In this context, the energy recovery of organic waste emerges as a concrete alternative to reduce emissions, promote a circular economy, and strengthen national energy security. The Energy Transition Acceleration Program (PATEN), recently launched by the Federal Government, establishes guidelines and incentives for projects that integrate technological innovation, sustainability, and the generation of clean energy from renewable sources. Among these, biodigestion stands out as a promising technology capable of transforming agro-industrial, urban, and rural waste into biogas and biofertilizers, reducing environmental impacts and adding economic value to materials previously discarded. The objective of this article is to critically analyze the potential of energy recovery from organics through biodigestion within the context of PATEN, highlighting its contributions to Brazil's energy transition and sustainable development. The guiding research question is: how can the biodigestion of organic waste, supported by PATEN's guidelines, be consolidated as a strategic axis for sustainability and Brazilian energy sovereignty? Theoretically, the study draws on the works of Wellinger (2013), Gerardi (2003), Holm-Nielsen (2016), Stryi-Hipp (2016), Lovins (2011), Rifkin (2000; 2019), Sachs (2002; 2008; 2009), Beck (1992; 2001; 2010), Goldemberg and Lucon (2007), Harvey (2005; 2006; 2011), Silva and Arilla (2022), Gadotti (2000; 2008; 2012), Leff (2001; 2006; 2010), Brown (2009), Meadows (2004), Daly (1991; 1996), Latouche (2009), Veiga (2010; 2015), Acselrad (2004; 2010), Lovins and Cohen (2018), and Deublein and Steinhauser (2008), among others. The research is qualitative (Minayo, 2007), descriptive and bibliographical (Gil, 2008), and follows a comprehensive analytical approach (Weber, 1949). The results demonstrate that biodigestion, integrated with PATEN's directives, constitutes one of the most promising energy transition strategies in Brazil, combining technological innovation, social inclusion, and environmental sustainability. The study concludes that the energy use of organic waste strengthens national energy sovereignty, reduces emissions, and fosters a circular economy. Moreover, PATEN proves essential for enabling the expansion of biodigestion across multiple scales, providing technical, financial, and regulatory support. Thus, the research reveals that the PATEN–biodigestion nexus consolidates a new development paradigm based on the synergy between clean energy, waste management, and environmental justice.

Keywords: PATEN. Biodigestion. Sustainability. Energy Transition.

RESUMEN

La creciente preocupación por la crisis climática y la necesidad de diversificar la matriz energética brasileña han impulsado nuevas estrategias orientadas a la sostenibilidad y al uso racional de los recursos naturales. En este contexto, la valorización energética de los residuos orgánicos surge como una alternativa concreta para reducir emisiones, promover la economía circular y fortalecer la seguridad energética nacional. El Programa de Aceleración de la Transición Energética (PATEN), lanzado recientemente por el Gobierno Federal, establece directrices e incentivos para proyectos que integren innovación tecnológica, sostenibilidad y generación de energía limpia a partir de fuentes renovables. Entre ellas, la biodigestión se destaca como una tecnología prometedora, capaz de transformar residuos agroindustriales, urbanos y rurales en biogás y biofertilizantes, reduciendo los impactos ambientales y agregando valor económico a los materiales previamente desecharados. El objetivo de este artículo es analizar críticamente el potencial de la valorización energética de orgánicos mediante biodigestión en el contexto del PATEN, destacando sus contribuciones a la transición energética y al desarrollo sostenible en Brasil. La pregunta que guía la investigación es: ¿de qué manera la biodigestión de residuos orgánicos, apoyada en las directrices del PATEN, puede consolidarse como eje estratégico para la sostenibilidad y la soberanía energética brasileña? Teóricamente, el estudio se



apoya en los trabajos de Wellinger (2013), Gerardi (2003), Holm-Nielsen (2016), Stryi-Hipp (2016), Lovins (2011), Rifkin (2000; 2019), Sachs (2002; 2008; 2009), Beck (1992; 2001; 2010), Goldemberg y Lucon (2007), Harvey (2005; 2006; 2011), Silva y Arbilla (2022), Brasil (2023; 2025), Gadotti (2000; 2008; 2012), Leff (2001; 2006; 2010), Brown (2009), Meadows (2004), Daly (1991; 1996), Latouche (2009), Veiga (2010; 2015), Acselrad (2004; 2010), Lovins y Cohen (2018), y Deublein y Steinhauser (2008), entre otros. La investigación es cualitativa (Minayo, 2007), descriptiva y bibliográfica (Gil, 2008) y adopta un enfoque analítico comprensivo (Weber, 1949). Los resultados muestran que la biodigestión, integrada a las directrices del PATEN, constituye una de las estrategias más prometedoras de transición energética en Brasil, articulando innovación tecnológica, inclusión social y sostenibilidad ambiental. Se observó que el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos fortalece la soberanía energética nacional, reduce las emisiones y promueve la economía circular. Además, el PATEN se revela esencial para viabilizar la expansión de la biodigestión en diferentes escalas, asegurando apoyo técnico, financiero y regulatorio. Así, la investigación demuestra que el binomio PATEN-biodigestión consolida un nuevo paradigma de desarrollo basado en la sinergia entre energía limpia, gestión de residuos y justicia ambiental.

Palabras clave: PATEN. Biodigestión. Sostenibilidad. Transición Energética.

1 INTRODUÇÃO

1.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS – A BIODIGESTÃO COMO EIXO ESTRATÉGICO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NO CONTEXTO DO PARENTE

À medida que o século XXI avança, o mundo se vê imerso em uma crise climática e energética sem precedentes, marcada por extremos meteorológicos cada vez mais intensos e pela aceleração das emissões de gases de efeito estufa. Segundo o relatório da Agência Internacional de Energia (IEA, 2024)¹, as emissões globais de CO₂ ultrapassaram 37,4 bilhões de toneladas, com o setor energético respondendo por mais de 70% desse total. Esse quadro evidencia o que Beck denominou de “sociedade de risco”, isto é, uma modernidade que produz perigos globais com capacidade de autodestruição ecológica e social. Como afirma o autor, “[...] os riscos globais não respeitam fronteiras, tornam-se universais e, paradoxalmente, democráticos, porque atingem a todos, embora de forma desigual” (Beck, 1992, p. 23). Nesse sentido, a mudança climática atua como catalisadora de injustiças ambientais, revelando o abismo entre países industrializados e nações em desenvolvimento. De forma convergente, Donella Meadows adverte que “[...] o crescimento material ilimitado em um planeta finito é uma impossibilidade biofísica, e quanto mais o sistema insiste nessa direção, mais próximo está do colapso” (2006, p. 62). Logo, a advertência se confirma nas últimas projeções do IPCC (2023)², que estimam um aumento médio da temperatura global de 1,5 °C até 2030, com impactos severos sobre segurança alimentar, disponibilidade hídrica e padrões migratórios. No caso brasileiro, embora a matriz elétrica seja composta por cerca de 90% de fontes renováveis, o país ainda enfrenta o desafio de reduzir o desmatamento, conter a expansão de termelétricas e avançar na gestão de resíduos que liberam metano – gás com potencial de aquecimento global 84 vezes maior que o CO₂. Assim, a crise

¹ A Agência Internacional de Energia (IEA, 2024) destaca em seu mais recente relatório que as emissões globais de dióxido de carbono provenientes do setor energético ultrapassaram 37,4 bilhões de toneladas, representando mais de 70% das emissões totais de gases de efeito estufa. Esse dado evidencia a urgência de uma transição energética baseada em fontes renováveis e na eficiência do uso dos recursos, especialmente diante do aumento da demanda mundial por energia e da persistente dependência de combustíveis fósseis. A IEA enfatiza que a descarbonização do sistema energético global não é apenas uma meta ambiental, mas uma necessidade econômica e social, pois dela dependem a segurança climática, a estabilidade geopolítica e o desenvolvimento sustentável das nações. Para alcançar a neutralidade de carbono até meados do século, o relatório aponta a necessidade de acelerar o investimento em tecnologias limpas, promover a inovação e fortalecer políticas públicas integradas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, especialmente nos países emergentes. Ver: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2024. Paris: IEA, 2024.

² Logo, a advertência se confirma nas últimas projeções do IPCC (2023), que indicam que o aumento médio da temperatura global poderá atingir 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais até 2030, caso não haja uma redução imediata e substancial das emissões de gases de efeito estufa. O relatório enfatiza que esse limite representa um ponto crítico para o equilíbrio climático do planeta, pois ultrapassá-lo implicaria impactos irreversíveis sobre os ecossistemas, a segurança alimentar, a disponibilidade de água e a saúde humana. Além disso, o documento alerta que os eventos climáticos extremos – como ondas de calor, secas, enchentes e ciclones – tendem a se tornar mais frequentes e intensos, afetando desproporcionalmente as populações mais vulneráveis. Diante desse cenário, o IPCC defende que a mitigação deve ser acompanhada de políticas de adaptação robustas e inclusivas, articuladas com estratégias de transição energética e de proteção da biodiversidade, a fim de garantir um futuro sustentável e resiliente. Ver: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2023.

energética e climática exige respostas que conciliem sustentabilidade ambiental, inovação tecnológica e justiça social, configurando um novo paradigma civilizatório em que o uso racional da energia torna-se um imperativo ético e político.

A racionalidade ambiental teórica aparece, assim, como uma produção conceitual orientada para a construção de uma racionalidade social e produtiva, fundada em novos valores e potenciais. Ao dar congruência aos postulados e princípios de uma racionalidade social e produtiva, permite acelerar um conjunto de processos materiais que dão suporte a novas estratégias produtivas fundadas no potencial que o ambiente oferece, articulando níveis de produtividade ecológica, cultural e tecnológica. Tal potencial ecotecnológico vai se realizando em um processo prospectivo que orienta as práticas científicas, tecnológicas e culturais para construir e objetivar esses níveis de produtividade (Leff, 2006, p. 257).

Dessa forma, o panorama energético brasileiro revela, em meio às incertezas globais, uma posição de destaque e responsabilidade. O país é reconhecido por possuir uma das matrizes mais limpas do planeta, com aproximadamente 90% da eletricidade proveniente de fontes renováveis, sobretudo hidrelétrica, eólica, solar e de biomassa. Entretanto, essa condição privilegiada não elimina os desafios da desigualdade no acesso e da má gestão de resíduos, que ainda liberam volumes expressivos de metano e comprometem metas de descarbonização. O Ministério de Minas e Energia (MME) destaca que “[...] o Brasil reúne condições para liderar a transição energética em escala planetária e aprofundar a descarbonização” (MME, 2025, p. 54). Dito isso, a liderança decorre não apenas da diversidade de recursos, mas também da política nacional de transição energética, criada em 2023, que articula sustentabilidade, segurança energética e inclusão social como dimensões interdependentes. Ainda assim, persistem assimetrias: enquanto o Sul e o Sudeste concentram a infraestrutura de geração e distribuição, o Norte e o Nordeste convivem com pobreza energética e resíduos urbanos sem tratamento adequado. Enrique Leff (1998, p. 142) já advertia que “[...] a racionalidade ambiental exige repensar o desenvolvimento a partir das relações entre energia, sociedade e território, para que a sustentabilidade não seja privilégio de poucos, mas condição de todos”. Assim, a transição energética brasileira só alcançará seu potencial se articular a matriz renovável à justiça ambiental, ao uso responsável da biomassa e à valorização dos resíduos como fonte de energia limpa. Logo, isso implica superar a visão fragmentada entre produção e consumo, instaurando políticas que integrem o energético, o ambiental e o social em um mesmo horizonte civilizatório, onde o desenvolvimento deixe de significar exploração e passe a significar regeneração.

Em meio à urgência global de reduzir as emissões e diversificar as fontes energéticas, o Brasil deu um passo decisivo ao instituir o Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN), marco regulatório que articula inovação tecnológica, sustentabilidade e desenvolvimento social. O programa surge como instrumento de financiamento e coordenação nacional voltado à ampliação da geração de



energia limpa, à valorização energética de resíduos e à criação de empregos verdes. Segundo a Lei nº 15.103, “[...] o PATEN tem como objetivo promover a geração e o uso eficiente da energia de baixo carbono por meio de projetos sustentáveis alinhados aos compromissos de redução de emissões de gases de efeito estufa assumidos pelo Brasil” (Brasil, 2025, p. 3). Tal diretriz vincula-se diretamente à meta nacional de neutralidade climática até 2050 e se estrutura em torno de eixos estratégicos, como o incentivo à produção de biogás e biometano, o fomento ao hidrogênio verde, o desenvolvimento de infraestrutura para combustíveis sustentáveis de aviação e a expansão da energia solar e eólica. Em complemento, o texto legal também institui o Fundo Verde, administrado pelo BNDES, com o propósito de garantir riscos de crédito e atrair investimentos privados para projetos de descarbonização, reconhecendo que a transição energética não pode ocorrer sem uma política econômica sólida. De modo convergente, Goldemberg afirma: “[...] a sustentabilidade do setor energético depende de políticas públicas que conciliem eficiência econômica, equidade social e preservação ambiental” (2007, p. 78). O PATEN, portanto, consolida uma visão sistêmica de energia como vetor de transformação social, permitindo que a economia verde se torne motor do desenvolvimento e não mero discurso ambiental. Assim, ao conectar a política energética à agenda climática e industrial, o programa inaugura um novo modelo de planejamento estatal, em que a inovação e a justiça ambiental caminham juntas, redefinindo o papel do Brasil como protagonista de uma transição que é, simultaneamente, ecológica, tecnológica e ética.

De igual modo, torna-se imprescindível compreender que a biodigestão ocupa um lugar estratégico dentro do debate sobre sustentabilidade e transição energética, não apenas por sua capacidade de transformar resíduos orgânicos em biogás e biofertilizantes, mas, sobretudo, por redefinir a relação entre produção, consumo e natureza. Logo, essa tecnologia, fundamentada na digestão anaeróbia, possibilita a conversão de dejetos agropecuários, resíduos urbanos e efluentes industriais em energia renovável, reduzindo emissões de metano e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Conforme afirma Wellinger (2013, p. 11), “[...] a digestão anaeróbia representa uma das tecnologias mais eficazes para a valorização de resíduos orgânicos, integrando o controle ambiental à geração descentralizada de energia”. Essa dupla função – ambiental e energética – explica por que países europeus, asiáticos e latino-americanos vêm incorporando a biodigestão em políticas públicas voltadas à economia circular³ e à agricultura sustentável. No Brasil, seu potencial é ainda

³ A economia circular propõe uma ruptura com o modelo linear de produção e consumo baseado nas etapas de extração, uso e descarte, substituindo-o por um sistema regenerativo em que os recursos são continuamente reaproveitados, reduzindo o desperdício e o impacto ambiental. Essa abordagem busca estender o ciclo de vida dos produtos, promover a reutilização de materiais e incentivar a inovação tecnológica orientada pela sustentabilidade. Segundo a Fundação Ellen MacArthur (2019), a economia circular baseia-se em três princípios fundamentais: eliminar resíduos e poluição desde o design, manter produtos e materiais em uso pelo maior tempo possível e regenerar sistemas naturais. Ao integrar esses princípios às políticas públicas e às práticas empresariais, cria-se um modelo econômico capaz de conciliar crescimento e preservação

mais expressivo, dada a grande disponibilidade de biomassa proveniente da agroindústria, do saneamento e da pecuária, segmentos que geram enormes volumes de resíduos subutilizados. Em um contexto em que, segundo Deublein e Steinhauser (2008, p. 9), “[...] a produção de biogás a partir de resíduos agrícolas e urbanos pode suprir parcela significativa da demanda energética nacional, ao mesmo tempo em que reduz impactos ambientais”, a biodigestão revela-se não apenas uma alternativa tecnológica, mas uma estratégia de soberania energética e de justiça socioambiental. Dessa forma, ao integrar inovação científica, inclusão produtiva e mitigação climática, a biodigestão se consolida como uma ferramenta essencial para o cumprimento das metas do PATEN e para a consolidação de uma economia verde de base local e regenerativa. Isto é, investir em biodigestores é investir em autonomia territorial, em emprego verde e em um futuro energético menos dependente de combustíveis fósseis e mais alinhado à ética do cuidado ambiental.

Em uma cooperativa, cerca de 90 famílias viviam juntas. Elas cultivavam cana-de-açúcar e bananas, praticavam a pesca em água doce e criavam bichos-da-seda. Todos os resíduos eram coletados e levados para uma planta central de biogás com volume de 200 m³, onde eram transformados em combustível. O combustível era usado para cozinhar, aquecer as salas de estar e acionar geradores elétricos. Ao mesmo tempo, o processo na planta de biogás eliminava os germes presentes nas fezes, deixando um resíduo higiênico para uso como fertilizante. As pessoas sofriam menos com infecções parasitárias e o valor nutricional dos solos era aprimorado, resultando em colheitas abundantes. A comunidade cooperativa conseguia sobreviver de forma autônoma, importando apenas pequenas quantidades de capim para alimentação, algum fertilizante químico e um pouco de esterco líquido da vizinhança⁴ (Deublein & Steinhauser, 2008, p. 37).

Cumpre salientar que, para a consolidação teórica e metodológica deste estudo, é fundamental definir com clareza o objeto de pesquisa e a pergunta de partida, de modo que a investigação se mantenha coerente com o contexto da transição energética e das políticas de sustentabilidade. O foco recai sobre a valorização energética de resíduos orgânicos via biodigestão, entendida como uma prática inovadora e estratégica para a descarbonização da matriz brasileira. Nesse sentido, o objeto desta pesquisa situa-se na interface entre tecnologia, meio ambiente e política pública, uma vez que analisa como a biodigestão pode contribuir simultaneamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a ampliação do acesso à energia limpa em comunidades rurais e urbanas. É nesse ponto que a formulação da pergunta de pesquisa adquire relevância: de que maneira a valorização energética de orgânicos via biodigestão, no contexto do Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN), pode fortalecer o desenvolvimento sustentável e a justiça ambiental no Brasil? A pergunta

ambiental, fortalecendo a resiliência dos territórios e promovendo uma transição justa para uma sociedade de baixo carbono. Ver: ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2019.

⁴ Tradução nossa.

emerge da constatação de que, conforme argumenta Sachs (1990, p. 113), “[...] o funcionamento da economia brasileira é de tal forma pródigo e dissipador de recursos, que bastaria disciplinar seu uso para tirar o país de sua crise atual”. Logo, essa leitura ecoa nas propostas contemporâneas de economia verde e circular, nas quais a energia proveniente de resíduos assume papel central como vetor de inovação ecológica. Em perspectiva mais ampla, Enrique Leff destaca que “[...] a sustentabilidade implica uma reapropriação social da natureza e a criação de novas rationalidades produtivas capazes de harmonizar o uso dos recursos com os limites ecológicos do planeta” (2006, p. 87). Assim, a definição do objeto e da pergunta de partida transcende o campo técnico e assume dimensão ética e política, na medida em que propõe repensar o desenvolvimento não mais como expansão ilimitada, mas como reorganização solidária dos fluxos energéticos e dos modos de vida. Desse modo, a pesquisa se ancora na necessidade de compreender a biodigestão não apenas como instrumento tecnológico, mas como eixo articulador entre inovação, equidade e sustentabilidade, sendo, portanto, um convite à reconstrução de paradigmas que conciliem produção e conservação.

Neste sentido, é importante destacar que a relevância científica e social desta pesquisa transcende a mera aplicação tecnológica, pois reside na possibilidade de articular inovação, sustentabilidade e gestão de resíduos em um mesmo campo de transformação estrutural. A biodigestão, quando vista sob o prisma das ciências ambientais e sociais, não é apenas uma técnica de reaproveitamento energético, mas um processo de reconfiguração das relações entre sociedade e natureza, no qual o conhecimento científico dialoga com práticas locais e comunitárias. Nesse contexto, David Harvey (2015, p. 143) ressalta que “[...] a superação das contradições do capitalismo exige repensar a produção e o consumo de energia, recolocando a sustentabilidade no centro da política econômica”. Essa observação revela que os desafios energéticos não são apenas técnicos, mas também políticos e epistemológicos, exigindo novas formas de pensar o desenvolvimento. De forma convergente, Lovins (2011, p. 28) enfatiza que “[...] a transição para uma economia baseada em eficiência energética e inovação verde não é um fardo econômico, mas uma oportunidade de prosperidade compartilhada”. Dito isso, a combinação entre essas perspectivas indica que o avanço científico deve caminhar junto ao compromisso social, de modo que a pesquisa sobre biodigestão contribua não apenas para o cumprimento das metas do PLEN, mas também para o fortalecimento da cidadania energética e da justiça ambiental. Assim, a relevância deste estudo reside no fato de que a valorização energética de resíduos pode se tornar uma ponte concreta entre o discurso da sustentabilidade e a prática transformadora, ao mesmo tempo em que reforça a importância de políticas públicas integradas, capazes de conectar laboratórios, cooperativas, comunidades rurais e centros urbanos. Por conseguinte, esta investigação propõe uma leitura ampla da inovação tecnológica,

compreendendo-a como campo de produção de sentidos, solidariedades e alternativas para a crise civilizatória que atravessa o mundo contemporâneo.

De forma complementar, a integração entre conhecimento científico, políticas públicas e inclusão social torna-se elemento decisivo para o êxito da biodigestão no âmbito do Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN). Essa articulação demanda um olhar interdisciplinar, capaz de compreender que a inovação tecnológica não se limita à dimensão técnica, mas envolve também processos de governança, participação e educação ambiental. Assim, quando o Estado promove políticas integradas de energia, ciência e desenvolvimento local, criam condições para que tecnologias como a biodigestão não apenas reduzam emissões, mas também fortaleçam a autonomia das comunidades e o protagonismo dos territórios. Conforme explica Ostrom, “[...] a sustentabilidade depende da criação de instituições cooperativas que envolvam os atores locais na gestão dos recursos comuns” (2015, p. 89). Assim, tal perspectiva reforça que a inovação social é tão relevante quanto a inovação científica, uma vez que o sucesso de projetos de energia renovável depende do enraizamento comunitário e da construção coletiva de soluções. No contexto brasileiro, essas ações encontram respaldo em políticas estruturantes, como o PATEN, que, segundo o texto da lei, “[...] promove a geração e o uso eficiente da energia de baixo carbono por meio de projetos sustentáveis alinhados aos compromissos de redução de emissão de gases de efeito estufa assumidos pelo Brasil” (Brasil, 2025, p. 3). Assim, a integração entre pesquisa aplicada, incentivos governamentais e participação cidadã configura-se como caminho para consolidar uma transição energética justa, inclusiva e descentralizada. Em outras palavras, ao transformar resíduos em energia e conhecimento em autonomia, a biodigestão torna-se símbolo de uma nova racionalidade ambiental, na qual ciência e política convergem para regenerar o tecido social e ecológico do país. Desse modo, o diálogo entre universidades, comunidades e Estado assume papel estratégico na construção de uma cultura energética democrática, que redefine o próprio sentido de desenvolvimento sustentável.

Vale ressaltar que a inserção da biodigestão nas cadeias produtivas representa um passo decisivo para a consolidação da economia circular e para o cumprimento das metas de descarbonização no Brasil. Ao transformar resíduos em insumos energéticos, esse processo rompe com a lógica linear de extração, uso e descarte, e inaugura um ciclo produtivo regenerativo, no qual o que antes era considerado rejeito passa a ter valor econômico e ecológico. Em termos práticos, isso significa integrar biodigestores a propriedades rurais, cooperativas agrícolas, indústrias de alimentos e sistemas de saneamento, gerando biogás, biometano e biofertilizantes. Como enfatiza Holm-Nielsen (2016, p. 45), “[...] as cadeias de biomassa são a espinha dorsal da bioeconomia moderna, pois conectam a agricultura, a energia e o meio ambiente em um sistema de retroalimentação sustentável”. Logo, esse potencial é especialmente relevante em um país como o Brasil, onde a agroindústria e o setor pecuário

geram volumes expressivos de resíduos orgânicos, que podem ser convertidos em energia limpa e nutrientes para o solo. De acordo com Gerardi (2003, p. 21), “[...] o processo de digestão anaeróbia é a interface perfeita entre o manejo de resíduos e a geração de energia, por eliminar a matéria orgânica poluente e transformá-la em biogás utilizável”. Dessa forma, o aproveitamento energético dos resíduos contribui diretamente para reduzir emissões de metano – gás de efeito estufa 28 vezes mais potente que o CO₂ – e para diversificar a matriz energética nacional, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Ademais, a integração da biodigestão à economia circular gera emprego e renda, sobretudo em territórios rurais e periféricos, fortalecendo cadeias produtivas locais e promovendo justiça ambiental. Assim, mais do que uma solução técnica, a biodigestão torna-se símbolo de um novo pacto civilizatório baseado no princípio de que nada se perde, tudo se transforma, e que a energia do futuro se constrói a partir da inteligência ecológica do presente.

Uma legislação ambiental cada vez mais rigorosa na maioria dos países tem como objetivo evitar a poluição de todos os tipos e a perda de biodiversidade, bem como prevenir quaisquer potenciais efeitos tóxicos e riscos à saúde dos organismos vivos. A produção de digestato de alta qualidade faz parte da demanda geral por qualidade na sociedade atual e é parte integrante das tecnologias de biogás, oferecendo mais do que apenas energia renovável. Além da energia renovável, o biogás proveniente da digestão anaeróbia tem o potencial de fornecer soluções ambientalmente corretas e seguras do ponto de vista veterinário para o tratamento de dejetos animais e resíduos orgânicos adequados. O uso do digestato como biofertilizante contribui para a preservação dos recursos por meio da reciclagem da matéria orgânica e de nutrientes, como o fósforo – um recurso fóssil altamente limitado em nosso planeta. O digestato de qualidade assegurada, aplicado como fertilizante em conformidade com as melhores práticas agrícolas, permite alcançar benefícios de longo prazo que superam os riscos potenciais⁵ (Wellinger, Murphy & Baxter, 2013, p. 296).

Desse modo, a transição energética não se concretiza apenas por meio de avanços tecnológicos ou políticas públicas robustas, mas também pela formação de uma consciência ecológica capaz de reorientar valores, práticas e modos de vida. A sustentabilidade, nesse sentido, depende de um processo educativo permanente, no qual ciência, cultura e cidadania se entrelaçam em um mesmo horizonte de responsabilidade planetária. A educação para a sustentabilidade, como propõe Gadotti (2008, p. 36), “[...] deve ser compreendida como um ato político e cultural que forma sujeitos conscientes de seu pertencimento a Terra e comprometidos com o destino comum da humanidade”. Logo, essa dimensão ética do aprender e do ensinar reforça que a crise ambiental é também uma crise de sentidos, exigindo da sociedade um novo pacto civilizatório em torno do cuidado, da solidariedade e da justiça intergeracional. Em perspectiva complementar, Enrique Leff destaca que “[...] a construção de uma racionalidade ambiental requer a internalização de valores ecológicos nas práticas sociais, transformando o conhecimento científico em sabedoria de convivência” (2006, p. 112). Assim, essa

⁵ Tradução nossa.



visão amplia o alcance da transição energética, convertendo-a em um processo cultural que ultrapassa o campo das tecnologias limpas e atinge a própria estrutura da subjetividade moderna. É por meio da educação ambiental crítica que se torna possível superar o consumo desenfreado e compreender que a energia não é apenas recurso, mas expressão das relações entre seres humanos e natureza. No contexto do PATEN, incorporar essa dimensão educativa implica formar profissionais, gestores e cidadãos capazes de pensar sistemicamente, conectar os impactos locais às dinâmicas globais e atuar de forma colaborativa em soluções sustentáveis. Portanto, a transição energética, ao ser também uma transição cultural, exige que o saber técnico dialogue com o saber comunitário e que o conhecimento se coloque a serviço da vida, reconhecendo que o verdadeiro progresso reside não na exploração ilimitada, mas na harmonia com os limites do planeta.

Assim, esta pesquisa se estrutura de maneira orgânica e interdependente, articulando quatro partes que se complementam e sustentam o propósito central do estudo: compreender a valorização energética de resíduos orgânicos via biodigestão como instrumento estratégico para a sustentabilidade e a transição energética no Brasil. A primeira parte, tem como conteúdo a transição energética e o papel dos resíduos orgânicos no contexto brasileiro, onde examina a crise climática e as potencialidades da matriz energética nacional, analisando como a gestão de resíduos ainda representa um desafio para o avanço das políticas de descarbonização. Nesse ponto, Smil (2018, p. 102) adverte que “[...] as transições energéticas sempre foram processos longos e complexos, determinados por fatores técnicos, econômicos e culturais que moldam o ritmo das mudanças”. A segunda parte, expomos o Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN) e seus instrumentos de incentivo, aprofundando a análise da Lei nº 15.103/2025 que estabelece o PATEN como eixo estruturante da política energética brasileira contemporânea, destacando seus mecanismos de financiamento, o “Fundo Verde” e a ênfase em tecnologias de baixo carbono. Como salienta Rifkin (2019, p. 44), “[...] o novo paradigma energético deve integrar políticas econômicas, sociais e ambientais, promovendo uma infraestrutura inteligente que conecte energia limpa, digitalização e democracia econômica”. Já a terceira parte, traçamos uma análise sobre o processo de biodigestão: fundamentos, etapas e geração de energia, apresentando o funcionamento técnico e bioquímico da digestão anaeróbia, detalhando as etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, que convertem resíduos em biogás e biofertilizantes, destacando-se como tecnologia limpa e economicamente viável. E, por último, trouxemos a reflexão sobre a sustentabilidade, desafios e perspectivas da valorização energética via biodigestão, discutindo a relevância da inovação ecológica e as barreiras para sua expansão no território brasileiro, considerando aspectos regulatórios, sociais e ambientais. Dessa forma, o artigo propõe uma reflexão abrangente, que une teoria e prática, ciência e política, ao reconhecer que a transição energética não é apenas um imperativo ambiental, mas também

um projeto civilizatório de reconstrução ética, social e tecnológica. Assim, em convergência com os princípios defendidos por Sachs (2009, p. 71), segundo o qual “[...] o desenvolvimento sustentável requer uma nova aliança entre economia, ecologia e equidade social”, esta pesquisa reafirma o papel da biodigestão como eixo transformador de um futuro em que inovação e sustentabilidade caminham lado a lado, convertendo resíduos em energia e desafios em oportunidades.

2 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO SOBRE A VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS VIA BIODIGESTÃO NO CONTEXTO DO PROGRAMA DE ACELERAÇÃO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA (PATEN)

A metodologia que fundamenta este estudo parte de uma perspectiva qualitativa, descritiva e bibliográfica, orientada por um viés analítico-compreensivo que busca compreender os significados e as dinâmicas subjacentes às práticas de valorização energética via biodigestão, articuladas às diretrizes do PATEN. Logo, a abordagem qualitativa se mostrou a mais adequada, pois permitiu apreender a complexidade do fenômeno em sua totalidade, valorizando as dimensões sociais, políticas e ambientais que se entrelaçam na transição energética brasileira. Como explica Minayo (2007, p. 23), “[...] o método qualitativo trabalha com o universo dos significados, dos motivos, das aspirações, das crenças e dos valores, que correspondem a um espaço mais profundo das relações humanas, das quais não se pode obter informações por meio de mensuração”. Nessa direção, a natureza descritiva da pesquisa, conforme Gil (2008, p. 41), “[...] tem por objetivo primordial a descrição das características de determinada população, fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis, oferecendo uma compreensão ampliada da realidade estudada”. Logo, a escolha por esse tipo de abordagem justifica-se pela necessidade de interpretar criticamente a inserção da biodigestão como tecnologia estratégica no contexto do PATEN, integrando fatores técnicos e sociopolíticos em uma análise totalizante. A bibliografia selecionada, por sua vez, possibilita o diálogo entre teorias clássicas e contemporâneas sobre sustentabilidade e transição energética, compondo um quadro de referência sólido para a análise crítica. Dessa forma, o enfoque analítico-compreensivo, inspirado na tradição weberiana, orienta-se por uma racionalidade interpretativa que busca compreender os sentidos atribuídos pelos agentes e instituições à adoção de práticas sustentáveis no Brasil contemporâneo.

[...] é comum que as pessoas suponham que a pesquisa qualitativa é marcada por uma rica descrição de ações pessoais e ambientes complexos, e ela é, mas a abordagem qualitativa é igualmente conhecida [...] pela integridade de seu pensamento. Não existe uma única forma de pensamento qualitativo, mas uma enorme coleção de formas: ele é interpretativo, baseado em experiências, situacional e humanístico. Cada pesquisador fará isso de maneira diferente, mas quase todos trabalharão muito na interpretação, tentarão transformar parte da história em termos experenciais, mostrarão a complexidade do histórico e tratarão os indivíduos como únicos, mesmo que de modos parecidos com outros indivíduos (Stake, 2011, p. 41).



De forma complementar à fundamentação teórica, as fontes utilizadas nesta pesquisa compõem um amplo repertório documental e bibliográfico que sustenta a análise do papel do PATEN e da biodigestão na transição energética brasileira. Dito isso, as referências foram selecionadas com base em sua relevância científica, atualidade e aderência temática, abrangendo livros, artigos acadêmicos e documentos normativos oficiais. Destaca-se o uso central do Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN), cuja leitura normativa foi essencial para compreender as diretrizes estatais de fomento à energia limpa e às tecnologias de valorização de resíduos. Como enfatiza Minayo (2002, p. 15), “[...] o conhecimento científico não se constrói no vazio, mas na relação constante entre teoria, método e realidade social, o que exige a mobilização de fontes diversificadas e contextualizadas”. Além disso, a investigação apoiou-se em um conjunto de autores que contribuem para o debate energético e ambiental contemporâneo – entre eles Wellinger, Rifkin, Sachs, Lovins, Beck, Leff, Gadotti, Harvey, Brown, Daly e Veiga –, articulando dimensões tecnológicas, ecológicas e sociais. Logo, tais fontes foram examinadas à luz de uma perspectiva interdisciplinar, reconhecendo que a sustentabilidade não pode ser reduzida a um campo técnico, mas implica uma ética e uma racionalidade ambiental. Nesse sentido, Stake (2011, p. 41) observa que “[...] a essência da abordagem qualitativa reside em sua capacidade de tratar os fenômenos como únicos e, ao mesmo tempo, compreendê-los em relação a outros fenômenos, mantendo o equilíbrio entre singularidade e generalização”. Desse modo, a combinação entre fontes teóricas e documentais permitiu construir um mosaico analítico capaz de integrar a leitura crítica do PATEN às discussões sobre inovação tecnológica, justiça ambiental e soberania energética.

No que diz respeito aos procedimentos de coleta e análise, a pesquisa foi conduzida por meio de um processo rigoroso de leitura analítica e fichamento temático das obras e documentos selecionados, a fim de identificar categorias centrais como sustentabilidade, soberania energética, economia circular e inovação tecnológica. Esse processo estabeleceu uma coerência interpretativa entre as fontes teóricas e as diretrizes do PATEN, de modo a compreender como a biodigestão se insere no contexto das políticas públicas voltadas à transição energética. De acordo com Flick (2013, p. 89), “[...] a análise qualitativa envolve um esforço contínuo de interpretação, no qual os dados não são apenas descritos, mas compreendidos a partir das relações e significados que assumem no contexto de investigação”. Assim, a análise não se limitou à coleta de informações, mas avançou para a construção de sentidos, articulando o conteúdo das fontes com os objetivos da pesquisa. Além disso, a triangulação entre os referenciais teóricos e os documentos normativos foi essencial para ampliar a validade analítica, permitindo verificar convergências e tensões entre teoria e prática. Como afirma Minayo (2007, p. 67), “[...] interpretar é atribuir sentido ao que foi observado, é reconstruir o significado de um conjunto de manifestações empíricas à luz de referenciais teóricos”. Dessa forma, a metodologia

aplicada favoreceu a identificação de nexos entre as políticas energéticas do Estado brasileiro e as transformações estruturais que a biodigestão pode promover no campo da sustentabilidade e da soberania energética.

No tocante aos critérios de seleção das obras, optou-se por incluir produções científicas e documentos oficiais que apresentassem relevância temática, consistência teórica e aderência ao objeto de estudo – a valorização energética via biodigestão e sua integração às diretrizes do PATEN. Assim, o recorte privilegiou publicações entre 1990 e 2025, período em que a discussão sobre sustentabilidade, energias renováveis e transição ecológica ganhou centralidade nas agendas acadêmicas e institucionais. A inclusão de autores clássicos e contemporâneos, como Sachs, Rifkin, Beck, Leff, Gadotti e Lovins, permitiu construir uma base teórica sólida que dialoga com os desafios atuais da política energética brasileira. Além disso, foram incorporados documentos normativos, como relatórios do MCTI e o próprio texto da Lei nº 15.103/2025, que institui o Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN), para garantir uma leitura situada da realidade nacional. Como explica Gil (2008, p. 57), “[...] a seleção criteriosa das fontes é condição indispensável para assegurar a coerência e a pertinência dos resultados de uma pesquisa científica”. Do mesmo modo, Minayo (2007, p. 83) enfatiza que “[...] a validade de um estudo qualitativo não se mede pela quantidade de fontes, mas pela profundidade e relevância das interpretações que delas emergem”. Assim, o conjunto de obras e documentos escolhidos permitiu abranger tanto a dimensão teórica quanto a aplicada da questão energética, articulando a leitura crítica da biodigestão às políticas públicas de sustentabilidade e à construção de uma nova racionalidade ecológica.

[...] a construção do conhecimento científico exige um percurso metodológico coerente com o objeto e com as intenções da pesquisa. Isso implica selecionar fontes e referências que, além de relevantes, guardem consonância com o campo teórico e com a problemática em estudo. A escolha não é neutra nem aleatória: ela resulta de um movimento de compreensão, em que o pesquisador articula o acúmulo de saberes anteriores às novas demandas de investigação. Cada decisão metodológica é, ao mesmo tempo, teórica e prática, pois reflete uma postura frente ao real e uma forma de interpretá-lo (Minayo e Deslandes, 2002, p. 45).

A estratégia de interpretação dos dados seguiu uma lógica de articulação entre teoria e prática, sustentada pela análise de conteúdo e pela interpretação comparativa de diferentes referenciais teóricos e documentos oficiais. Assim, o propósito foi compreender como os conceitos de sustentabilidade, soberania energética e inovação tecnológica se entrelaçam no contexto das políticas públicas brasileiras, especialmente sob a perspectiva do PATEN. Desse modo, buscou-se construir uma leitura crítica capaz de revelar as mediações entre o discurso da transição energética e as práticas concretas de valorização de resíduos via biodigestão. De acordo com Weber (1949, p. 45), “[...] compreender é apreender o sentido que os sujeitos atribuem às suas ações, interpretando-as dentro de um contexto de



valores e significados historicamente construídos". Essa orientação compreensiva foi essencial para reconhecer o PATEN como expressão de um novo paradigma de racionalidade ecológica, no qual tecnologia e ética ambiental coexistem como dimensões complementares. Além disso, conforme Flick (2013, p. 112), "[...] a análise interpretativa implica em um movimento dialético entre o particular e o geral, entre o empírico e o teórico, até que se alcance uma compreensão mais ampla do fenômeno investigado". Desse modo, a análise de conteúdo foi empregada não apenas como técnica descritiva, mas como meio de interpretação reflexiva, buscando captar o significado social e político das políticas energéticas brasileiras. A triangulação conceitual entre as dimensões ambiental, econômica e social permitiu delinear a interdependência entre inovação tecnológica, justiça ambiental e desenvolvimento sustentável, consolidando uma abordagem metodológica que ultrapassa o tecnicismo e alcança a complexidade do real.

Neste sentido, quanto à validação e às limitações da pesquisa, reconhece-se que o estudo, por ser de natureza qualitativa e bibliográfica, baseia-se em fontes secundárias e não contempla dados empíricos de campo. Ainda assim, a consistência teórica, a coerência metodológica e o diálogo entre diferentes perspectivas garantem sua robustez analítica e relevância científica. A credibilidade do trabalho foi assegurada pela triangulação das fontes e pela utilização de autores de reconhecida autoridade nos campos da metodologia, da sustentabilidade e das políticas públicas. Como destaca Minayo (2007, p. 95), "[...] a validade de uma pesquisa qualitativa se apoia na coerência entre os objetivos propostos, o percurso teórico-metodológico e a interpretação dos resultados". De forma convergente, Stake (2011, p. 63) observa que "[...] a solidez de um estudo interpretativo está menos em sua generalização e mais na profundidade com que ele ilumina o fenômeno em seu contexto". Dessa maneira, a metodologia adotada cumpre seu papel ao proporcionar uma compreensão aprofundada das relações entre biodigestão, inovação tecnológica e transição energética no âmbito do PATEN, oferecendo um panorama teórico consistente sobre a sustentabilidade no Brasil contemporâneo. No entanto, cumpre salientar que futuras pesquisas empíricas poderão ampliar a análise, explorando dados concretos sobre a implementação do programa, o desempenho dos sistemas de biodigestão e os impactos socioeconômicos decorrentes de sua adoção em diferentes escalas produtivas. Assim, este estudo constitui um ponto de partida para investigações futuras que, ao aliar teoria e prática, poderão contribuir de forma ainda mais decisiva para o avanço da soberania energética e da justiça ambiental no país.

3 RESÍDUOS QUE GERAM ENERGIA – A VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE ORGÂNICOS VIA BIODIGESTÃO NO CONTEXTO DO PROGRAMA DE ACELERAÇÃO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA (PATEN)

De maneira ampla, compreender a transição energética exige reconhecer que ela não se resume à substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, mas implica uma profunda reestruturação econômica, social e cultural dos modos de produzir e consumir energia. Trata-se, sobretudo, de um processo histórico, gradual e multidimensional, no qual se entrelaçam quatro pilares fundamentais: a diversificação da matriz energética, a segurança no suprimento, a sustentabilidade ambiental e a justiça social. Vaclav Smil (2010, p. 54) afirma desde o início que “[...] as transições energéticas não ocorrem por decretos, mas resultam de complexas interações entre tecnologia, economia e cultura, o que explica a lentidão e a dificuldade em alterar paradigmas energéticos estabelecidos”. Logo, essa leitura é essencial para compreender por que, mesmo diante da emergência climática, o mundo ainda depende fortemente do petróleo e do carvão. No entanto, à medida que os impactos ambientais se intensificam, cresce a pressão por modelos energéticos que equilibrem eficiência e equidade. Ulrich Beck (2013, p. 77) destaca que “[...] a sociedade global vive uma modernidade reflexiva, em que o risco ambiental tornou-se o principal motor das transformações políticas e econômicas contemporâneas”. Desse modo, a transição energética é também um movimento ético e civilizatório, no qual o conhecimento científico deve dialogar com a responsabilidade social e com a necessidade de redistribuir benefícios e custos de forma mais justa. No Brasil, essa discussão ganha contornos singulares, pois o país já possui uma matriz majoritariamente renovável, mas enfrenta desigualdades regionais e estruturais que desafiam a universalização do acesso à energia limpa. Assim, diversificar a matriz não significa apenas ampliar fontes renováveis, mas garantir que a segurança energética venha acompanhada de sustentabilidade e justiça ambiental, consolidando um modelo que une inovação tecnológica, equidade e respeito aos limites ecológicos do planeta.

A transição energética deve ocorrer de forma justa, inclusiva e equilibrada, reconhecendo que o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade ambiental são dimensões interdependentes. Esse processo demanda mecanismos de alocação de custos e subsídios que assegurem o acesso universal à energia e às tecnologias limpas, bem como políticas de mitigação dos impactos socioambientais associados à produção e ao consumo. Além disso, requer a promoção do diálogo social e o engajamento das comunidades locais no processo decisório, a valorização da diversidade de gênero e étnica, e o fortalecimento da formação profissional voltada para o novo paradigma energético. Por fim, reconhece-se a importância do planejamento energético de longo prazo para orientar ações e instrumentos de financiamento que viabilizem a transição justa e duradoura (Brasil, 2025, p. 125).

Além disso, a valorização energética desponta como um dos pilares conceituais mais relevantes da economia circular, justamente por propor a transformação de passivos ambientais em ativos

produtivos e socialmente úteis. Essa lógica rompe com o paradigma linear de extração, consumo e descarte, introduzindo um ciclo regenerativo no qual o resíduo passa a ser visto como recurso. Em outras palavras, a valorização energética atua como ponte entre sustentabilidade e inovação, pois une a redução de impactos ambientais à geração de novos produtos e fontes de renda. Enrique Leff (1998, p. 173) observa que “[...] a crise ambiental revela a necessidade de reconstruir o processo produtivo com base em uma racionalidade ecológica, capaz de transformar o desperdício em energia e o resíduo em valor”. Assim, a conversão energética de resíduos não é apenas um avanço tecnológico, mas um repositionamento ético do ser humano diante da natureza, fundamentado no princípio de circularidade e na corresponsabilidade entre sociedade, Estado e setor produtivo. De modo convergente, Ignacy Sachs (2009, p. 67) afirma que “[...] o desenvolvimento sustentável requer políticas que promovam o uso integral da biomassa e a valorização dos resíduos como parte integrante da matriz energética renovável”. Tal visão reflete um consenso crescente de que os sistemas econômicos do futuro dependerão da capacidade de integrar sustentabilidade e eficiência, substituindo o desperdício pela reinvenção produtiva. Exemplos práticos dessa abordagem já se manifestam em cooperativas de reciclagem, agroindústrias que utilizam biodigestores e políticas públicas voltadas à recuperação energética de orgânicos. Logo, valorizar energeticamente os resíduos é mais do que uma estratégia de gestão: é um modo de redefinir o metabolismo industrial e social, onde cada elo do ciclo produtivo contribui para restaurar os fluxos naturais e reduzir as emissões, consolidando uma economia verdadeiramente circular.

De forma complementar, a integração entre as políticas públicas de energia e resíduos representa uma das condições essenciais para que o Brasil avance rumo a uma economia de baixo carbono e socialmente inclusiva. Dito isso, o país já dispõe de marcos legais importantes, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010)⁶, que institui a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e incentiva a recuperação energética, e a Política Energética Nacional⁷, que estabelece princípios de segurança, eficiência e diversificação da matriz.

⁶ A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) representa um marco regulatório fundamental na gestão ambiental brasileira, ao estabelecer princípios, objetivos e instrumentos voltados à prevenção, redução, reutilização, reciclagem e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos. A lei introduz o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, envolvendo poder público, empresas e consumidores na corresponsabilidade pela gestão dos materiais descartados. Além disso, institui instrumentos como os planos de gestão integrada, a logística reversa e a inclusão social dos catadores de materiais recicláveis, reconhecendo seu papel essencial na cadeia da reciclagem. Essa política também incentiva a adoção de tecnologias limpas e práticas de economia circular, articulando desenvolvimento econômico, justiça social e proteção ambiental. Ao promover a integração entre esferas federativas e setores produtivos, a Política Nacional de Resíduos Sólidos consolida-se como base estratégica para a transição rumo a uma economia mais sustentável e de baixo impacto ambiental. Ver: BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

⁷ A Política Energética Nacional, instituída pela Lei nº 9.478/1997, estabelece as diretrizes para o aproveitamento racional dos recursos energéticos do Brasil, visando garantir o suprimento de energia em condições adequadas de qualidade, preços

Contudo, ainda há lacunas na articulação entre essas políticas e os instrumentos mais recentes de transição energética, como o Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN). Logo, de acordo com o texto da Lei nº 15.103, “[...] constituem objetivos do PATEN fomentar o financiamento de projetos de desenvolvimento sustentável, promover a geração e o uso eficiente de energia de baixo carbono e estimular atividades relacionadas à transição energética em regiões carboníferas” (Brasil, 2025, p. 2). Assim, essa diretriz evidencia o potencial de convergência entre as políticas ambientais e energéticas, especialmente quando se considera que a valorização de resíduos pode simultaneamente reduzir emissões, gerar energia e criar oportunidades econômicas em territórios vulneráveis. Em consonância com essa perspectiva, David Harvey (2006, p. 81) argumenta que “[...] o desenvolvimento desigual do capitalismo global exige políticas territoriais capazes de redistribuir os benefícios da inovação e mitigar os custos socioambientais do crescimento”. Logo, a articulação entre as políticas de resíduos e energia deve ir além da compatibilização burocrática: precisa instaurar um modelo de governança integrado, que une municípios, estados, iniciativa privada e sociedade civil em torno de metas comuns de descarbonização e de justiça ambiental. Isso significa reconhecer que o planejamento energético e a gestão de resíduos são faces de um mesmo desafio civilizatório: construir um sistema econômico capaz de se sustentar sem destruir suas próprias bases ecológicas.

Por conseguinte, observar experiências nacionais e internacionais de aproveitamento energético de resíduos orgânicos permite compreender como a biodigestão e o biogás se consolidam como soluções estratégicas para enfrentar simultaneamente os desafios ambientais e energéticos. No Brasil, iniciativas como o programa Biogás Brasil⁸ e os polos de inovação do Paraná e do Ceará demonstram que a articulação entre universidades, cooperativas e empresas pode gerar resultados concretos em escala regional, transformando resíduos agroindustriais e urbanos em energia limpa. Na

e sustentabilidade ambiental. Seu principal objetivo é promover o desenvolvimento equilibrado do setor energético, conciliando crescimento econômico, segurança do abastecimento e preservação ambiental. A política orienta-se por princípios como a diversificação da matriz energética, a prioridade ao uso de fontes renováveis, a universalização do acesso à energia e a eficiência energética. Além disso, busca estimular a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias, fortalecer a integração regional e reduzir as desigualdades sociais por meio do acesso democrático à energia. Nesse sentido, a Política Energética Nacional é essencial para a transição rumo a um modelo sustentável, capaz de combinar inovação, soberania e justiça socioambiental. Ver: BRASIL. Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo e institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 ago. 1997.

⁸ O Programa Biogás Brasil e os polos de inovação do Paraná e do Ceará representam iniciativas estratégicas voltadas ao fortalecimento da bioeconomia e à consolidação da transição energética no país. Coordenado pelo Ministério de Minas e Energia em parceria com instituições como o CIBiogás e a GIZ, o programa tem como objetivo ampliar a geração e o uso do biogás e do biometano, promovendo a valorização energética de resíduos agroindustriais, urbanos e rurais. No Paraná, o Polo de Biogás de Itaipu tornou-se referência nacional ao integrar cooperativas, universidades e empresas em projetos de geração descentralizada de energia e produção de biofertilizantes, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da região Oeste. Já no Ceará, o Polo de Inovação em Biogás e Biometano busca adaptar tecnologias de digestão anaeróbia às condições do semiárido, estimulando cadeias produtivas locais e a economia circular. Essas experiências reforçam o papel do biogás como vetor de inclusão produtiva, mitigação climática e diversificação da matriz energética brasileira. Ver; BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Programa Biogás Brasil: Desenvolvimento do Mercado de Biogás e Biometano no Brasil. Brasília: MME; CIBiogás; GIZ, 2023.

Alemanha, país referência na produção de biogás, políticas de incentivo criaram uma base sólida para a geração descentralizada de energia, beneficiando agricultores e pequenas comunidades. Arthur Wellinger (2013, p. 29) destaca que “[...] o sucesso europeu na expansão do biogás está associado à integração entre políticas agrícolas e energéticas, permitindo que a biomassa seja tratada como vetor econômico e ambiental simultaneamente”. Neste sentido, essa sinergia mostra que a energia renovável não deve ser tratada isoladamente, mas como parte de uma estratégia mais ampla de desenvolvimento sustentável. De igual modo, Deublein e Steinhauser (2008, p. 56) enfatizam que “[...] os resíduos orgânicos, quando corretamente processados, podem gerar energia, reduzir emissões e fornecer biofertilizantes de alto valor agrícola, promovendo a economia circular em escala territorial”. A título de ilustração, o caso da Suécia, que converteu o biogás em combustível para transporte público, comprova que é possível aliar eficiência energética e mobilidade sustentável em políticas de baixo carbono. No contexto brasileiro, experiências em aterros sanitários de São Paulo e no uso de dejetos suínos no Sul do país reforçam o potencial de expansão da biodigestão quando há políticas de fomento e capacitação técnica adequada. Assim, o aproveitamento energético de resíduos revela-se não apenas uma oportunidade ambiental, mas um campo de inovação que alia ciência, desenvolvimento rural e justiça climática, abrindo caminhos para uma matriz mais diversificada e democrática.

Nos países industrializados, a biomassa representa, em média, cerca de 3% do total de fontes primárias de energia. Nos mercados emergentes, esse valor chega a 38%, e em alguns países particularmente pobres, ultrapassa 90%. Nos Estados Unidos, a biomassa corresponde a cerca de 4% do consumo total de energia primária; na Finlândia, 2%; na Suécia, 15%; e na Áustria, entre 13 e 15%. Em contraste, o Nepal, um país em desenvolvimento, possui 145 mil plantas de biogás para uma população de aproximadamente 20 milhões de habitantes, com cerca de 9 milhões de vacas e 7 milhões de outros animais úteis – sendo, portanto, o país com o maior número de biodigestores per capita. O número deve aumentar em mais 83.500 unidades, financiadas pelo Banco Mundial. No Vietnã, cerca de 18 mil plantas de biogás foram construídas até 2005 e outras 150 mil estão planejadas até 2010. Projeções semelhantes existem para a Índia e a China. O financiamento pode ser viabilizado pela venda de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), uma vez que a mitigação do metano economiza emissões de carbono e pode ser comercializada como crédito de carbono⁹ (Deublein & Steinhauser, 2008, p. 35).

Convém observar que, apesar dos avanços tecnológicos e do potencial comprovado da biodigestão, sua consolidação como eixo estratégico das políticas de transição energética ainda enfrenta barreiras institucionais, econômicas e culturais significativas. Entre os principais desafios estão a falta de integração entre políticas setoriais, a burocracia no acesso a financiamentos, a escassez de infraestrutura para captação e distribuição de biogás e a ausência de marcos regulatórios específicos para pequenas unidades de produção. De acordo com Ferreira (2021, p. 142), “[...] a sustentabilidade

⁹ Tradução nossa.



energética depende da coerência entre instrumentos normativos e práticas econômicas, de modo que o avanço tecnológico não seja neutralizado por estruturas administrativas desarticuladas". Essa análise é crucial, pois revela que a transição não se faz apenas com tecnologia, mas com governança e vontade política. Dito isso, a experiência de outros países mostra que incentivos fiscais, tarifas de injeção e contratos de longo prazo são mecanismos essenciais para viabilizar a produção de energia renovável em escala sustentável. Vincenzo Balzani (2011, p. 63) reforça essa compreensão ao afirmar que "[...] a transição para um mundo movido pelo sol requer não apenas inovação científica, mas também políticas públicas que garantam estabilidade econômica e inclusão social no acesso às novas energias". No caso brasileiro, os entraves se agravam pela fragmentação institucional e pela histórica concentração de investimentos em grandes empreendimentos centralizados, o que limita o crescimento de soluções descentralizadas como a biodigestão. Ainda assim, o PATEN surge como uma tentativa concreta de superar essas barreiras, ao criar linhas de crédito específicas e prever parcerias entre setor público, privado e comunitário. Desse modo, fortalecer a biodigestão no Brasil implica um reposicionamento estratégico do Estado, que deve atuar como articulador de políticas integradas, garantindo que a transição energética se traduza em justiça territorial, inovação produtiva e democratização do acesso à energia limpa.

Diante desse quadro, é fundamental destacar que a inovação tecnológica, quando associada à pesquisa científica e à inclusão social, constitui o motor mais potente para impulsionar a transição energética sustentável. Isso porque a tecnologia, isoladamente, não garante mudanças estruturais se não estiver acompanhada por processos educativos, políticas públicas e práticas colaborativas que promovam equidade e acesso. Assim, a produção de conhecimento voltado à sustentabilidade precisa, portanto, transcender o laboratório e alcançar as comunidades, integrando ciência e cidadania em um mesmo propósito civilizatório. Elinor Ostrom (2015, p. 103) sustenta que "[...] a gestão sustentável dos recursos comuns depende da criação de instituições locais que articulem conhecimento técnico e saber comunitário em sistemas de governança participativa". Logo, essa ideia reforça que o desenvolvimento de tecnologias limpas, como a biodigestão, deve estar enraizado em contextos sociais concretos, respeitando dinâmicas locais e fortalecendo a autonomia dos territórios. Do mesmo modo, Jeremy Rifkin (2011, p. 121) afirma que "[...] a terceira revolução industrial será descentralizada, colaborativa e inclusiva, pois a energia renovável democratiza a produção e redistribui o poder econômico". No contexto brasileiro, isso implica reconhecer o papel estratégico das universidades públicas, dos institutos federais e das cooperativas na difusão de tecnologias acessíveis e de baixo custo. Além disso, programas como o PATEN podem servir como vetores de integração entre ciência e prática, financiando projetos que transformem conhecimento em soluções reais para os desafios climáticos e energéticos. A inovação, portanto, deve ser compreendida como processo social, e não



apenas técnico, capaz de ampliar oportunidades, gerar empregos verdes e fortalecer a soberania energética nacional.

Cumpre salientar que a educação ambiental e a construção de uma consciência ecológica são dimensões indispensáveis para consolidar a sustentabilidade e a cultura da energia limpa no século XXI. Mais do que um processo instrutivo, trata-se de um movimento ético e político que busca reconectar o ser humano à natureza e redefinir as bases de sua atuação sobre o planeta. A transição energética, portanto, não se limita a políticas ou tecnologias, mas envolve uma verdadeira mudança cultural, capaz de promover valores de solidariedade, cuidado e corresponsabilidade. Moacir Gadotti (2008, p. 41) sustenta que “[...] educar para a sustentabilidade é formar para a vida, compreendendo que o destino da humanidade está intrinsecamente ligado ao destino da Terra”. Logo, essa visão amplia o papel da escola e das instituições formadoras, que devem ser não apenas transmissoras de conhecimento, mas espaços de reflexão crítica e de prática transformadora. Em perspectiva complementar, Enrique Leff (2006, p. 139) observa que “[...] a racionalidade ambiental nasce do diálogo entre ciência, cultura e política, propondo uma nova ética de convivência com o mundo natural”. Tal proposição é central para que a sociedade compreenda que o uso de energia não é um ato neutro, mas uma escolha que envolve impactos sociais, econômicos e ecológicos. No Brasil, a inserção da educação ambiental nas políticas públicas, conforme previsto na Lei nº 9.795/1999, ainda enfrenta desafios de implementação, sobretudo pela ausência de integração entre os currículos escolares e as práticas comunitárias. Contudo, experiências em escolas técnicas e cooperativas rurais demonstram que é possível articular o ensino de ciências com a prática de gestão sustentável de resíduos e geração de energia.

Neste sentido, pensar a transição energética sob a ótica da inovação e da justiça ambiental significa reconhecer que a sustentabilidade não pode ser alcançada sem enfrentar as desigualdades históricas que estruturam o acesso aos recursos e à energia. A crise climática, como adverte Ulrich Beck (1992, p. 91), “[...] inaugura uma era em que os riscos deixaram de ser locais para se tornarem globais, afetando de forma desproporcional os mais pobres e vulneráveis”. Assim, essa constatação reforça que a justiça ambiental deve ser o eixo normativo da transição energética, garantindo que os benefícios da descarbonização e da inovação tecnológica sejam distribuídos de maneira equitativa. Para isso, políticas públicas precisam incorporar a dimensão social da sustentabilidade, promovendo a inclusão produtiva, a geração de empregos verdes e o fortalecimento das comunidades locais. Lester Brown (2009, p. 122) salienta que “[...] o verdadeiro desafio civilizatório do século XXI é reconstruir a economia global dentro dos limites ecológicos da Terra, assegurando bem-estar humano sem ultrapassar a capacidade de regeneração do planeta”. Dessa forma, a inovação tecnológica deve ser entendida não como um fim em si, mas como instrumento de transformação social e ética, capaz de



articular ciência, solidariedade e responsabilidade coletiva. No caso brasileiro, o PATEN oferece um caminho promissor ao alinhar incentivos financeiros, descarbonização e desenvolvimento regional, mas seu sucesso dependerá da capacidade de integrar universidades, setor privado e comunidades em um pacto cooperativo. A justiça ambiental, nesse contexto, não se restringe à reparação de danos, mas propõe uma redistribuição de oportunidades, onde a energia limpa se torna também energia cidadã.

A complexidade ambiental – que emerge do encontro da ordem física, biológica, cultural e política; de ontologias, epistemologias e saberes; do real, do imaginário e do simbólico – não é mais que resultado do fracasso da epopéia homogeneizadora da racionalidade econômica da modernidade; e é esta condição-limite da modernidade o que reabre a história a mundos de utopia, de criatividade e de possibilidades. Daí a necessidade de uma construção racional do futuro, que renove as utopias, que inclua os aspectos não racionais (desejos, aspirações, valores) que não se reduzem a valores de mercado. Isso implica compreender as injustiças do sistema atual e incorporar os aspectos irracionais do ser que, ao fim e ao cabo, definem a qualidade de vida dos homens e mulheres que habitam este mundo (Leff, 2006, p. 233).

Dessa forma, o Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN) surge como uma resposta institucional à urgência de repensar o modelo de desenvolvimento brasileiro à luz da sustentabilidade e da justiça ambiental, dialogando diretamente com o horizonte civilizatório abordado anteriormente. Logo, ao articular inovação tecnológica, financiamento verde e inclusão produtiva, o PATEN consolida-se como o principal instrumento governamental voltado à descarbonização da economia nacional. Sua estrutura normativa, instituída pela Lei nº 15.103/2025, prevê incentivos fiscais, linhas de crédito específicas, parcerias público-privadas e a criação do Fundo Verde, administrado pelo BNDES, para apoiar projetos de energia limpa e gestão sustentável de resíduos. Segundo o texto legal, “[...] o Programa de Aceleração da Transição Energética tem como objetivo fomentar o desenvolvimento sustentável por meio da ampliação do uso de fontes renováveis e da valorização dos resíduos sólidos como ativos energéticos” (Brasil, 2025, p. 4). Como pode ser denotada, essa diretriz coloca a transição energética no centro de uma agenda de inovação que busca, simultaneamente, reduzir desigualdades regionais e impulsionar a economia de baixo carbono. Como observa Ignacy Sachs (2009, p. 52), “[...] a transição para um novo paradigma de desenvolvimento requer políticas integradas, capazes de harmonizar crescimento econômico, equidade social e preservação ambiental”. Assim, o PATEN representa uma tentativa de articular esses três eixos, transformando o desafio climático em oportunidade de reinvenção produtiva. Seu potencial vai além da geração de energia: propõe redesenhar a relação entre Estado, mercado e sociedade, reafirmando o papel do Brasil como protagonista global na construção de um futuro sustentável.

Cabe ressaltar que as diretrizes e metas estabelecidas pelo Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN) expressam um esforço político e técnico de estruturar um novo paradigma de governança ambiental e energética no Brasil. Suas bases estão assentadas em quatro



pilares centrais: a descarbonização progressiva da economia, o fomento à inovação tecnológica, a ampliação do acesso à energia limpa e a valorização produtiva de resíduos orgânicos e inorgânicos. Tais diretrizes são operacionalizadas por meio de instrumentos específicos, como a criação de fundos de investimento verdes, o estímulo a parcerias entre instituições públicas e privadas e o apoio à pesquisa científica voltada à bioenergia e às tecnologias de baixo carbono. Logo, de acordo com o texto normativo do programa, “[...] o PATEN deverá priorizar projetos que integrem geração de energia renovável, eficiência energética e desenvolvimento local sustentável, alinhando-se às metas de neutralidade climática do Brasil” (Brasil, 2025, p. 5). Essa diretriz sinaliza uma inflexão importante nas políticas públicas nacionais, pois vincula o avanço energético à justiça territorial e social. Como observa Lester Brown (2015, p. 87), “[...] planejar a transição para energias limpas significa projetar o futuro com base na resiliência dos ecossistemas e na capacidade de inovação das sociedades humanas”. Dessa forma, o PATEN propõe um modelo de política pública que integra sustentabilidade e economia verde, articulando marcos legais com instrumentos financeiros e tecnológicos capazes de estimular tanto grandes empreendimentos quanto iniciativas comunitárias. Neste sentido, em um país de dimensões continentais e realidades diversas, essa abordagem multiescalar é essencial para garantir que o desenvolvimento energético seja inclusivo, descentralizado e socialmente justo. Logo, o PATEN não apenas orienta a transição para uma matriz mais limpa, mas inaugura uma nova lógica de planejamento estatal em que o progresso é medido pela capacidade de regenerar e não de explorar.

De igual maneira, os mecanismos de financiamento e incentivo à inovação configuram-se como o núcleo operativo do PATEN, pois determinam as condições concretas para que a transição energética se torne viável e sustentável. Assim, entre os principais instrumentos previstos estão o mercado de créditos de carbono, as parcerias público-privadas (PPPs), as linhas de crédito subsidiadas para pesquisa e inovação e o fortalecimento de fundos setoriais voltados à descarbonização. Isto é, esses mecanismos têm como objetivo atrair investimentos privados e mobilizar recursos públicos para acelerar a adoção de tecnologias limpas, como a biodigestão, a energia solar e o hidrogênio verde. Jeremy Rifkin (2019, p. 98) observa que “[...] as novas economias energéticas só prosperam quando existe uma arquitetura financeira capaz de alinhar o capital às metas de sustentabilidade, rompendo com o curto-prazo do modelo fóssil”. Em outras palavras, a inovação tecnológica não se realiza sem um ambiente institucional estável e sem instrumentos financeiros que mitiguem os riscos de investimento em projetos verdes. De forma complementar, Ferreira (2021, p. 213) afirma que “[...] a política de transição energética precisa ser acompanhada por estratégias de financiamento inclusivo, capazes de integrar pequenos produtores e cooperativas às cadeias de energia renovável”. Tal abordagem, por sua vez, amplia o alcance social do PATEN, permitindo que a inovação não se restrinja a grandes conglomerados industriais, mas beneficie também comunidades locais e empreendimentos

sustentáveis de pequena escala. Além disso, o programa prevê a criação de editais específicos para universidades e centros tecnológicos, incentivando pesquisas aplicadas sobre eficiência energética, biomassa e economia circular. Logo, o êxito desses mecanismos dependerá da capacidade de articulação entre ministérios, bancos de fomento e agências de regulação, assegurando que o crédito verde e a inovação caminhem lado a lado. Assim, a efetividade da política de transição energética brasileira repousa na coerência entre inovação científica, estímulo financeiro e compromisso social, consolidando um ecossistema de sustentabilidade e desenvolvimento.

Assim sendo, a conexão entre o PATEN e as demais políticas setoriais que compõem o ecossistema brasileiro de sustentabilidade demonstra a coerência do plano estratégico do Estado em promover uma transição energética justa e articulada. O artigo 2º, inciso IV, da Lei nº 15.103/2025 explicita que um dos objetivos do programa é “[...] promover a geração e o uso eficiente da energia de baixo carbono por meio de projetos sustentáveis alinhados aos compromissos de redução de emissão de gases de efeito estufa assumidos pelo Brasil, com especial atenção ao potencial mitigador da utilização de tecnologias de geração de energia a partir da recuperação e da valorização energética de resíduos”. Desse modo, essa disposição revela um ponto de convergência com iniciativas como o Programa Metano Zero¹⁰, que visa aproveitar resíduos orgânicos agropecuários e urbanos para produção de biogás, e o Renovabio¹¹, que estabelece metas compulsórias de descarbonização vinculadas à comercialização de combustíveis. De forma analítica, Sachs (2018, p. 71) enfatiza que “[...] a coerência entre políticas ambientais, agrícolas e energéticas é o que transforma boas intenções em resultados concretos de sustentabilidade”. Ou seja, não basta criar programas isolados: é necessário que eles dialoguem entre si, formando um sistema integrado de incentivos, monitoramento e

¹⁰ O Programa Metano Zero, lançado pelo Governo Federal em 2022, constitui uma das principais iniciativas brasileiras voltadas à mitigação das emissões de gases de efeito estufa, com foco específico na redução do metano – gás cujo potencial de aquecimento global é cerca de 28 vezes superior ao do dióxido de carbono. O programa incentiva a captura e o aproveitamento energético do metano proveniente de resíduos agropecuários, urbanos e industriais, transformando-o em biogás e biometano para geração de eletricidade, calor ou combustível veicular. Além de contribuir para o cumprimento das metas climáticas assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris, o Metano Zero estimula a economia circular e a inovação tecnológica, promovendo o desenvolvimento regional sustentável e a criação de empregos verdes. A iniciativa reforça a importância da integração entre políticas ambientais e energéticas, transformando passivos ambientais em ativos produtivos e fortalecendo a transição para uma matriz energética de baixo carbono. Ver: BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa Metano Zero: Iniciativa Nacional de Redução de Emissões de Metano. Brasília: MMA, 2022.

¹¹ O RenovaBio, instituído pela Lei nº 13.576/2017, é a principal política nacional voltada ao fomento da produção e do uso de biocombustíveis no Brasil, com o objetivo de reduzir a intensidade de carbono da matriz energética e cumprir os compromissos climáticos assumidos no Acordo de Paris. O programa introduz um modelo inovador de descarbonização baseado na emissão dos Créditos de Descarbonização (CBIOs), títulos negociáveis que representam a redução de emissões de gases de efeito estufa obtida pela produção e uso de biocombustíveis em substituição aos combustíveis fósseis. Cada produtor ou importador certificado pode emitir CBIOs conforme a eficiência energética e ambiental comprovada de seu processo produtivo. Essa iniciativa promove previsibilidade ao setor, estimula investimentos em tecnologia e sustentabilidade e reforça o protagonismo brasileiro na transição energética global. Ao integrar metas de redução de emissões com instrumentos de mercado, o RenovaBio consolida-se como referência internacional em políticas de baixo carbono aplicadas ao setor de transportes, fortalecendo a competitividade dos biocombustíveis e impulsionando o desenvolvimento rural sustentável. Ver; BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 27 dez. 2017.

redistribuição de benefícios. Além disso, o PATEN se alinha à Agenda 2030 e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sobretudo no ODS 7 (energia limpa e acessível) e no ODS 13 (ação contra a mudança global do clima), funcionando como um catalisador que conecta políticas nacionais às metas globais. De forma exemplar, o Art. 4º da mesma lei institui o “Fundo Verde”, que “[...] garantirá, total ou parcialmente, o risco dos financiamentos concedidos por instituições financeiras para o desenvolvimento de projetos no âmbito do PATEN”, o que cria sinergia direta com os mecanismos financeiros internacionais de mitigação climática. Assim, o programa funciona como eixo integrador de políticas, articulando o potencial dos resíduos orgânicos, a inovação energética e o desenvolvimento local em uma única matriz de governança sustentável.

Os ministérios de Minas e Energia e das Cidades viabilizam, assim, a atuação coordenada de diferentes políticas públicas estratégicas para o Governo Federal: o Minha Casa, Minha Vida, o Luz para Todos, o Combate à Pobreza Energética, a Transição Energética e a Eficiência Energética. São iniciativas que visam melhorar a qualidade de vida da população, especialmente das famílias de baixa renda, com foco na inclusão social, alinhando-se o direito à moradia com o direito à energia elétrica com modicidade tarifária. As famílias beneficiárias devem zelar pelos equipamentos fornecidos e mantê-los nos locais instalados. Compete às concessionárias de distribuição de energia elétrica implantar e custear a infraestrutura até a moradia. Os volumes de energia excedentes poderão ser adquiridos pelas empresas de distribuição de energia ou comercializados com órgãos públicos, permitindo-se o uso da receita para pagamento do valor mínimo faturável (Brasil, 2025, p. 52).

É importante destacar que a efetividade das metas estabelecidas pelo PATEN depende diretamente da criação de mecanismos robustos de monitoramento, avaliação e transparência, capazes de assegurar que os investimentos realizados e as ações implementadas resultem em benefícios ambientais e sociais concretos. O artigo 9º da Lei nº 15.103/2025 determina que “[...] o Poder Executivo instituirá sistema de acompanhamento e divulgação de informações sobre os projetos apoiados, assegurando transparência, acesso público aos dados e integração com as metas nacionais de mitigação de emissões”. Logo, essa disposição demonstra que a credibilidade do programa não se resume à sua capacidade de financiar projetos, mas à maneira como seus resultados são avaliados e comunicados à sociedade. Como observa Elinor Ostrom (2015, p. 163), “[...] a governança de recursos comuns só se mantém sustentável quando há informação acessível, mecanismos de controle social e confiança nas instituições que gerem o processo”. Logo, tal concepção aplica-se plenamente à estrutura do PATEN, cuja legitimidade dependerá da criação de um ecossistema de governança colaborativa, envolvendo universidades, governos locais, setor privado e comunidades. Além disso, Ferreira (2021, p. 187) enfatiza que “[...] a transparência é elemento estruturante das políticas ambientais modernas, pois transforma o monitoramento em instrumento de participação social e de fortalecimento democrático”. Assim, a integração de dados sobre emissões evitadas, geração de energia renovável, emprego verde e reaproveitamento de resíduos é essencial para consolidar uma política pública que

uma eficácia técnica e justiça ambiental. Em termos práticos, o PATEN poderia se beneficiar de plataformas digitais integradas, com painéis de acompanhamento em tempo real, conectados às metas dos ODS e às bases de dados do IBGE e do Ministério do Meio Ambiente. Dessa forma, o controle social deixaria de ser apenas um princípio normativo para se tornar uma prática institucionalizada e acessível, garantindo que a transição energética ocorra sob o signo da transparência, da eficiência e da equidade.

Assim, o fortalecimento das parcerias entre Estado, universidades e setor produtivo constitui um dos pilares estratégicos do PATEN, pois é a partir dessa interação que se consolidam os processos de inovação tecnológica e social capazes de sustentar a transição energética brasileira. O artigo 5º da Lei nº 15.103/2025 explicita que “[...] o Programa apoiará projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica que integrem instituições públicas de ensino superior, empresas privadas e organizações da sociedade civil, com vistas à ampliação do uso de energias renováveis e à valorização energética de resíduos”. Logo, essa disposição legal reconhece que o conhecimento científico e a cooperação interinstitucional são condições indispensáveis para converter o potencial energético em valor social e econômico. Amory Lovins (2011, p. 137) observa que “[...] a revolução energética não depende apenas de novas tecnologias, mas da capacidade das instituições de aprenderem umas com as outras e de disseminarem soluções em escala”. Essa perspectiva evidencia que o investimento em ciência aplicada e redes colaborativas é o que distingue programas de transição meramente retóricos de políticas públicas efetivas. Além disso, Leff (2006, p. 158) destaca que “[...] o saber ambiental emerge quando ciência, ética e política se encontram em um mesmo horizonte de transformação social”. Assim, o PATEN não se restringe à função de fomento econômico, mas se torna um campo de experimentação coletiva, onde a universidade atua como mediadora entre o conhecimento técnico e as demandas territoriais. Ao fomentar centros de inovação regional, incubadoras verdes e plataformas tecnológicas integradas, o programa estimula o desenvolvimento de soluções contextualizadas, reduzindo as assimetrias de acesso à tecnologia e fortalecendo a autonomia energética das comunidades. Dessa forma, o PATEN reitera a importância da cooperação como princípio estruturante da sustentabilidade, reafirmando que o avanço tecnológico só é legítimo quando promove também emancipação social.

De forma complementar, os efeitos econômicos e sociais da valorização energética e da biodigestão assumem papel decisivo na consolidação dos objetivos do PATEN, pois ampliam a noção de desenvolvimento ao integrar sustentabilidade, geração de renda e inclusão social. O artigo 3º, inciso II, da Lei nº 15.103/2025 estabelece que “[...] os projetos apoiados deverão priorizar a criação de empregos verdes e a promoção de economias locais sustentáveis por meio da geração de energia renovável e do reaproveitamento de resíduos”. Logo, essa diretriz traduz o compromisso do programa

em associar a transição energética à justiça socioeconômica, garantindo que os benefícios da descarbonização alcancem também comunidades rurais, agricultores familiares e cooperativas de reciclagem. Segundo Sachs (2009, p. 67), “[...] a sustentabilidade não pode ser concebida apenas como objetivo ambiental, mas como uma estratégia integrada de combate à pobreza e promoção da cidadania produtiva”. Assim, a valorização energética via biodigestão se configura como instrumento de redistribuição de oportunidades, pois transforma resíduos em insumos e energia em autonomia. Vaclav Smil (2018, p. 201) complementa afirmando que “[...] a verdadeira revolução energética ocorre quando as fontes renováveis se convertem em motores de transformação econômica, capazes de reconfigurar cadeias produtivas e modos de vida”. Essa mudança estrutural é visível em experiências locais financiadas pelo PATEN, nas quais cooperativas rurais e prefeituras utilizam biodigestores para gerar biogás e biofertilizantes, reduzindo custos operacionais e emissões de metano. Ademais, o programa prevê a integração desses projetos aos mercados de créditos de carbono, fortalecendo a economia circular e criando novas fontes de receita para pequenos empreendimentos. Assim, ao fomentar esse tipo de valorização, o Estado brasileiro não apenas estimula a inovação, mas também corrige distorções históricas que marginalizaram populações do campo e das periferias urbanas dos benefícios da modernização energética. Ou seja, o PATEN consolida a biodigestão como tecnologia social, econômica e ambiental, demonstrando que a sustentabilidade só é plena quando promove bem-estar coletivo e equilíbrio ecológico.

Cumpre destacar que as implicações territoriais e regionais da implementação do PATEN evidenciam um dos desafios mais complexos da transição energética brasileira: a desigualdade na distribuição do acesso à energia e à infraestrutura tecnológica. O artigo 6º da Lei nº 15.103/2025 reforça que “[...] as ações e os projetos do Programa deverão priorizar regiões com menor acesso à energia e maior vulnerabilidade socioeconômica, com vistas à redução das desigualdades regionais e à promoção do desenvolvimento territorial sustentável”. Assim, essa disposição reafirma o caráter federativo do programa, exigindo coordenação entre União, estados e municípios, além de integração com políticas setoriais como o Plano Nacional de Energia e a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Para que essa articulação seja efetiva, é fundamental que o PATEN não se limite a transferir recursos, mas também fomente capacidades locais de gestão e inovação. Como afirma Enrique Leff (1998, p. 112), “[...] a sustentabilidade territorial requer a revalorização dos saberes locais e o fortalecimento da autonomia das comunidades frente aos processos centralizadores da modernidade técnica”. Nesse sentido, a descentralização energética proposta pelo programa se configura como instrumento de emancipação territorial, capaz de dinamizar economias locais e democratizar o uso de tecnologias limpas. Por outro lado, David Harvey (2006, p. 145) adverte que “[...] o desenvolvimento desigual é parte constitutiva do capitalismo global, e sem políticas redistributivas ele tende a reproduzir e ampliar

as assimetrias espaciais existentes". Assim, cabe ao Estado brasileiro garantir que os investimentos em energia renovável não se concentrem apenas em regiões economicamente mais dinâmicas, mas alcancem também áreas rurais, semiáridas e amazônicas, onde o potencial da biomassa e dos resíduos orgânicos é expressivo. Logo, experiências-piloto apoiadas pelo PATEN em consórcios intermunicipais demonstram que a cooperação federativa pode reduzir custos, compartilhar tecnologias e otimizar a gestão de resíduos de forma regionalizada. Dessa maneira, o programa contribui não apenas para a mitigação das emissões, mas para o fortalecimento de um modelo energético territorialmente justo e socialmente inclusivo, no qual o desenvolvimento sustentável deixa de ser promessa e se torna prática concreta.

A iniciativa contribuirá para posicionar o Brasil como líder na transição energética global, alinhando-se às principais tendências de exploração de energias renováveis e reforçando seu compromisso com a sustentabilidade ambiental, o desenvolvimento econômico e a redução das desigualdades regionais. [...] o marco também fixa exigências para o encerramento da operação e a restauração das áreas exploradas, além de obrigar a realização de consultas prévias às comunidades afetadas, promovendo o respeito às práticas locais e à cultura regional. [...] as receitas geradas serão distribuídas entre União, estados e municípios, com investimentos destinados prioritariamente à pesquisa, à inovação tecnológica e ao desenvolvimento sustentável (Brasil, 2025, p. 79).

Neste sentido, o PATEN consolida-se como uma política pública estruturante que redefine o papel do Estado brasileiro na condução da transição energética, articulando inovação tecnológica, sustentabilidade ambiental e inclusão social em um mesmo horizonte estratégico. O artigo 1º da Lei nº 15.103/2025 estabelece que “[...] o Programa de Aceleração da Transição Energética tem como finalidade promover o desenvolvimento sustentável do país por meio da diversificação da matriz energética, da eficiência no uso dos recursos e da valorização de resíduos como insumos produtivos”. Logo, essa formulação traduz uma concepção ampliada de desenvolvimento, em que o crescimento econômico está subordinado aos limites ecológicos e à justiça distributiva. Lester Brown (2009, p. 119) recorda que “[...] a sobrevivência das civilizações depende de sua capacidade de ajustar a economia à ecologia, substituindo a lógica da expansão pela lógica da regeneração”. O PATEN, ao integrar energia, meio ambiente e inovação, exemplifica essa mudança de paradigma, convertendo a sustentabilidade em princípio de governança e em vetor de planejamento público. Além disso, Gadotti (2008, p. 54) destaca que “[...] a transição para uma economia sustentável exige não apenas políticas, mas uma nova ética do cuidado e da corresponsabilidade entre Estado, sociedade e natureza”. Essa dimensão ética, implícita nas diretrizes do programa, aponta para a necessidade de uma revolução cultural na forma como se pensa e se pratica o desenvolvimento. Logo, a implementação do PATEN, portanto, ultrapassa a esfera técnica e assume caráter civilizatório, ao propor que a energia – elemento essencial da vida moderna – seja também instrumento de equidade, inclusão e solidariedade.

intergeracional. Sua relevância está em criar um caminho concreto para que o Brasil assuma liderança global na transição energética justa, conciliando inovação científica, diversidade territorial e respeito ambiental.

3.1 FUNDAMENTOS E ETAPAS DA BIODIGESTÃO: PROCESSOS BIOQUÍMICOS E POTENCIAL ENERGÉTICO SUSTENTÁVEL NO PATEN

Assim, dentro desse contexto, é essencial compreender que o processo de biodigestão anaeróbia constitui um sistema biotecnológico altamente articulado, no qual múltiplas etapas bioquímicas se sucedem em equilíbrio dinâmico para converter resíduos orgânicos em energia limpa e biofertilizantes. Esse ciclo, que inicia na coleta e preparação dos substratos, envolve a Trituração e homogeneização dos resíduos para facilitar o acesso microbiano às cadeias poliméricas. Na sequência, o material é inserido no biodigestor, um ambiente hermeticamente fechado onde atuam consórcios microbianos especializados que degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio. De acordo com Gerardi (2003, p. 52), “[...] existem três estágios básicos no processo de digestão anaeróbia: a solubilização dos compostos orgânicos complexos (hidrólise), a produção de ácidos simples (acidogênese) e a formação de metano (metanogênese)”. Essa sequência demonstra que a digestão anaeróbia é mais que um fenômeno biológico – é uma engenharia natural de aproveitamento energético. Como explicam Deublein e Steinhauser (2008, p. 91), “[...] a formação de metano é um processo complexo dividido em quatro fases de degradação – hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanação – conduzidas por diferentes grupos de microrganismos que cooperam de forma sintrofica”. Portanto, a biodigestão representa não apenas uma via tecnológica de transformação de resíduos, mas também um modelo de sustentabilidade circular, no qual a decomposição gera energia renovável e fertilidade agrícola simultaneamente, conectando a biologia e a engenharia sob a lógica da economia verde.

De forma aprofundada, a etapa de hidrólise marca o início efetivo da conversão da matéria orgânica complexa em compostos assimiláveis pelos microrganismos, sendo, portanto, determinante para o desempenho energético da biodigestão. Nessa fase, ocorre a quebra de polímeros – como celulose, proteínas e lipídios – em monômeros solúveis, por meio da ação de enzimas extracelulares liberadas por bactérias facultativas e estritamente anaeróbias. Logo, é importante destacar que, segundo Deublein e Steinhauser (2008, p. 94), “[...] na primeira fase, denominada hidrólise, compostos não dissolvidos, como celulose, proteínas e gorduras, são quebrados em fragmentos solúveis em água por exoenzimas, transformando-se em açúcares simples, aminoácidos e ácidos graxos”. Esse processo químico-biológico, que ocorre pela reação com moléculas de água, é sensível às condições físico-químicas do meio, especialmente pH, temperatura e teor de sólidos. Por outro lado, Wellinger et al. (2013, p. 122) explicam que “[...] inicialmente o substrato é desintegrado em carboidratos, proteínas e

lipídios, os quais são posteriormente hidrolisados, sendo a taxa de hidrólise descrita por uma função de primeira ordem, dependente da concentração e da atividade microbiana". Assim, quanto mais eficiente for essa quebra inicial, maior será a disponibilidade de substratos solúveis para as etapas subsequentes, como a acidogênese e a metanogênese, refletindo em aumento da produção de biogás e melhor aproveitamento energético. Além disso, fatores como o tipo de resíduo e o tempo de retenção hidráulica influenciam diretamente na eficiência da hidrólise, o que explica por que resíduos lignocelulósicos exigem pré-tratamentos térmicos ou alcalinos para acelerar sua degradação. Assim, a hidrólise é a porta de entrada da biodigestão, e o domínio de suas variáveis representa um dos principais desafios técnicos para elevar o rendimento do biogás e consolidar a biodigestão como alternativa viável na matriz energética sustentável.

Posteriormente à hidrólise, a fase acidogênica representa um ponto de inflexão no processo da biodigestão, pois é nela que os monômeros liberados anteriormente – açúcares simples, ácidos graxos e aminoácidos – são convertidos em compostos intermediários, como ácidos orgânicos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono, os quais determinarão a qualidade e o rendimento do biogás nas etapas seguintes. Cabe salientar que Deublein e Steinhauser (2008, p. 95) afirmam que “[...] na fase acidogênica, os monômeros formados na hidrólise são degradados por bactérias anaeróbias facultativas e obrigatórias em ácidos orgânicos de cadeia curta, álcoois e gases como hidrogênio e CO₂”. Esse conjunto de reações é conduzido por microrganismos acidogênicos capazes de fermentar uma ampla gama de compostos, e sua atividade depende fortemente do controle de pH e da pressão parcial do hidrogênio. Em outras palavras, o equilíbrio bioquímico nesse estágio é essencial para evitar a acumulação de ácidos voláteis e o consequente colapso da metanogênese posterior. Como explica Gerardi (2003, p. 53), “[...] a produção de ácidos simples, como acetato, propionato e butirato, ocorre pela ação de bactérias acidogênicas que utilizam açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, preparando o meio para as etapas de acetogênese e metanogênese”. Assim, a acidogênese pode ser compreendida como um elo metabólico que transforma compostos orgânicos primários em precursores gasosos, estabelecendo a ponte entre a degradação da matéria orgânica e a geração energética. Desse modo, a eficiência desse estágio depende não apenas da diversidade microbiológica, mas também da manutenção de parâmetros ótimos – pH entre 5,5 e 6,5, temperatura constante e adequada mistura do substrato. Experimentos realizados em digestores industriais demonstram que a regulação da acidogênese é o fator mais crítico para estabilidade do sistema, visto que a produção excessiva de ácidos pode reduzir a alcalinidade e interromper a conversão do metano. Portanto, a etapa acidogênica, ao mesmo tempo em que representa uma fase de intensa atividade biológica, também exige controle rigoroso das condições operacionais, revelando a complexa interdependência entre a bioquímica e a engenharia nos sistemas de produção de biogás.



Em continuidade ao processo bioquímico, a acetogênese surge como uma etapa de transição fundamental, na qual os compostos gerados na fase acidogênica – como os ácidos voláteis e o etanol – são convertidos em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio, substâncias que servirão de substrato direto para as arqueias metanogênicas. Essa fase é marcada por uma complexa cooperação simbiótica entre bactérias acetogênicas e metanogênicas, que compartilham um ambiente de interdependência energética. Como destaca Wellinger (2013, p. 124), “[...] as bactérias acetogênicas convertem os ácidos graxos e álcoois em ácido acético, CO₂ e H₂, mas essa conversão só é possível se a pressão parcial de hidrogênio for mantida baixa pelas arqueias metanogênicas”. Isso significa que a acetogênese é um processo termodinamicamente desfavorável em condições normais e, portanto, depende da remoção contínua de hidrogênio para que a reação se mantenha ativa. Segundo Deublein e Steinhauser (2008, p. 98), “[...] as bactérias acetogênicas são organismos estritamente anaeróbios que utilizam uma grande variedade de substratos orgânicos, e seu crescimento depende da presença simultânea de bactérias metanogênicas que mantenham o equilíbrio redox no sistema”. Logo, a partir dessa interação sintrofica, o sistema atinge estabilidade e favorece a formação do acetato, responsável por até 70% do metano produzido em biodigestores. Convém observar que essa fase é extremamente sensível a variações de temperatura, pH e acúmulo de intermediários tóxicos, como amônia e sulfetos, que podem inibir as reações. Por exemplo, em plantas de biogás que operam em regime termofílico, a taxa de conversão acetogênica tende a ser mais rápida, mas o risco de inibição também aumenta, exigindo controle rigoroso dos parâmetros operacionais. Dessa forma, a acetogênese é mais que uma simples transformação química: ela representa um equilíbrio biológico de cooperação e dependência, cuja eficiência define a produtividade global do processo. Assim, é por meio dessa delicada simbiose entre microrganismos produtores e consumidores de hidrogênio que o sistema anaeróbio alcança sua máxima eficiência energética, convertendo matéria orgânica em energia limpa e sustentável.

Uma célula microbiana média contém nitrogênio, fósforo e enxofre em quantidades de 12%, 2% e 1% da biomassa bacteriana seca, respectivamente. O metabolismo anaeróbio é tal que sua taxa de crescimento é aproximadamente 10% daquela observada em microrganismos aeróbios. Assim, para o tratamento de águas residuais, nitrogênio (N) e fósforo (P) são requeridos na proporção de 700:5: 1 (demanda bioquímica de oxigênio:N:P), em comparação com o metabolismo aeróbio, que requer a proporção de 100:5:1. Enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloreto e íons sulfato também são necessários para uma digestão adequada. Pequenas quantidades de ferro, cobre, zinco, manganês, molibdênio e vanádio também são requeridas para o crescimento celular. Os sulfetos, que são necessários a muitos metanogênicos como fonte de enxofre para o crescimento, tornam-se inibidores dos mesmos quando em altas concentrações. Os compostos de enxofre tendem a ser particularmente problemáticos, pois causam a precipitação de nutrientes essenciais como ferro, níquel, cobre e molibdênio, que se tornam insolúveis em potenciais redox baixos¹² (Wellinger, 2013, p. 111).

¹² Tradução nossa.



Nesse ponto do processo, a metanogênese se configura como a etapa culminante da biodigestão, sendo responsável pela conversão final dos intermediários orgânicos – especialmente o acetato e o dióxido de carbono – em metano (CH_4), gás que confere ao biogás seu valor energético e econômico. Trata-se, desse modo, de uma fase exclusivamente microbiana, conduzida por arqueias metanogênicas altamente especializadas, que operam em condições estritamente anaeróbias e em equilíbrio redox delicado. Gerardi (2003, p. 62) esclarece que “[...] as arqueias metanogênicas utilizam o acetato, o dióxido de carbono e o hidrogênio como substratos para produzir metano, sendo essa a etapa final da degradação anaeróbia da matéria orgânica”. Logo, essa conversão bioquímica é o coração da biodigestão, pois transforma o carbono residual em energia utilizável e reduz drasticamente o potencial poluidor dos resíduos. Deublein e Steinhauser (2008, p. 101) complementam que “[...] a metanogênese é um processo biológico de redução, no qual os microrganismos convertem compostos de carbono oxidados em metano sob condições de ausência total de oxigênio”. Assim, para além da reação química, essa fase expressa o ápice da sinergia entre as populações microbianas do digestor: enquanto as bactérias acidogênicas e acetogênicas preparam o substrato, as arqueias metanogênicas fecham o ciclo, estabilizando o sistema e liberando energia. Dito isso, é importante ressaltar que o desempenho metanogênico está diretamente associado à manutenção de condições físico-químicas ideais, como temperatura constante (entre 35 °C e 55 °C, dependendo do regime mesofílico ou termofílico), pH entre 6,8 e 7,4 e ausência de compostos tóxicos. Pequenas flutuações nesses parâmetros podem interromper a atividade microbiana e comprometer o rendimento energético do biodigestor. Em instalações modernas, sensores eletrônicos e sistemas automatizados monitoram continuamente esses fatores para otimizar a taxa de conversão do metano. Além disso, o estudo das rotas metabólicas das arqueias revela que existem dois principais caminhos para a metanogênese: a via acetoclástica, que decompõe o acetato, e a hidrogenotrófica, que utiliza hidrogênio e CO_2 - cada uma desempenhando papel crucial na estabilidade do processo. Dessa forma, a metanogênese sintetiza, em sentido literal e simbólico, a harmonia entre biologia e energia: um processo natural transformado em tecnologia limpa, que converte resíduos em fonte renovável e sustentável.

Desse modo, após a formação do biogás no interior do biodigestor, inicia-se uma etapa igualmente essencial: a captação, o tratamento e o aproveitamento energético do gás produzido. Essa fase é decisiva porque determina a eficiência do sistema em transformar o potencial químico da matéria orgânica em energia útil e limpa. O biogás, composto predominantemente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de pequenas frações de sulfeto de hidrogênio (H_2S), vapor d'água e outros gases traço, precisa ser purificado antes de sua utilização. Segundo Wellinger (2013, p. 215), “[...] o biogás extraído diretamente do digestor contém impurezas corrosivas e umidade, sendo necessário submetê-lo a processos de dessulfurização, desumidificação e remoção de CO_2 para adequá-lo ao uso

energético”. Esse tratamento, por sua vez, visa elevar a concentração de metano e eliminar compostos que comprometem a eficiência dos motores e turbinas. Em consonância com essa perspectiva, Deublein e Steinhauser (2008, p. 145) destacam que “[...] após a purificação, o biogás pode ser empregado em sistemas de cogeração, na produção de energia elétrica e térmica, ou purificado até atingir qualidade de biometano para uso veicular”. Assim, o processo de purificação geralmente envolve etapas físico-químicas, como absorção por soluções alcalinas, adsorção em carvão ativado e separação por membranas, métodos que garantem alta pureza e estabilidade operacional. Além disso, a tecnologia de upgrading permite que o biogás alcance características semelhantes às do gás natural, podendo ser injetado diretamente em redes de distribuição. Do ponto de vista ambiental, o aproveitamento energético do biogás representa uma alternativa concreta à queima de combustíveis fósseis, reduzindo emissões de gases de efeito estufa e evitando a liberação de metano livre na atmosfera – um gás 25 vezes mais potente que o CO₂ em termos de aquecimento global. Dito isso, em países como a Alemanha e a Suécia, o biometano já abastece frotas de transporte urbano e sistemas de calefação, demonstrando sua viabilidade técnica e econômica. Dessa forma, a etapa de captação e purificação não se limita a um processo técnico, mas se constitui como elo entre o ciclo biológico e a transição energética, convertendo resíduos orgânicos em fonte segura, eficiente e ambientalmente responsável de energia renovável.

Além do biogás, a biodigestão anaeróbia gera um segundo produto de grande relevância ecológica e econômica: o digestato, também conhecido como biofertilizante. Esse material, resultante da decomposição parcial da matéria orgânica, apresenta alta concentração de nutrientes minerais – como nitrogênio, fósforo e potássio – e matéria orgânica estabilizada, o que o torna um insumo valioso para a agricultura sustentável. Assim, o reaproveitamento do digestato fecha o ciclo produtivo da biodigestão, devolvendo ao solo parte da fertilidade extraída pelos sistemas agrícolas e reduzindo a dependência de fertilizantes químicos. Deublein e Steinhauser (2008, p. 210) afirmam que “[...] o resíduo sólido e líquido proveniente do processo anaeróbio contém nutrientes essenciais, sendo adequado para uso agrícola, desde que submetido a processos de estabilização e controle sanitário”. Logo, essa perspectiva evidencia o caráter duplamente sustentável da tecnologia: ao mesmo tempo em que produz energia renovável, devolve nutrientes à terra, promovendo a economia circular e o uso racional de recursos. Segundo Wellinger (2013, p. 289), “[...] o digestato deve ser tratado e armazenado de modo a preservar seu valor agronômico e evitar emissões secundárias de metano e amônia, garantindo um manejo ambientalmente seguro”. Em diversas regiões do mundo, a aplicação do digestato tem sido incorporada a programas de agricultura regenerativa, contribuindo para a recuperação de solos degradados e para a retenção de carbono no solo, o que potencializa a mitigação climática. No Brasil, essa prática vem ganhando destaque em propriedades que adotam sistemas



integrados de produção, sobretudo em granjas e unidades de processamento agroindustrial, onde o resíduo é reaproveitado diretamente como biofertilizante líquido ou sólido. A adoção dessa estratégia, quando acompanhada de análises químicas e microbiológicas adequadas, transforma o digestato em um insumo estratégico, reduzindo custos de produção e impactos ambientais. Assim, o subproduto da biodigestão deixa de ser um simples resíduo e se converte em vetor de sustentabilidade, demonstrando que a lógica da transição energética pode, simultaneamente, alimentar e energizar o planeta de forma renovável.

Neste sentido, para que o processo de biodigestão alcance sua eficiência máxima, é indispensável o controle rigoroso das condições de operação, pois cada variável físico-química interfere diretamente na atividade microbiana e, consequentemente, na produção de biogás e na estabilidade do sistema. Entre os fatores mais determinantes estão a temperatura, o pH, o teor de sólidos e o tempo de retenção hidráulica, os quais precisam ser ajustados conforme o tipo de substrato e o regime operacional adotado. De acordo com Gerardi (2003, p. 67), “[...] os microrganismos anaeróbios são extremamente sensíveis a variações ambientais; temperaturas muito altas ou muito baixas, bem como pH fora da faixa ótima de 6,8 a 7,4, podem reduzir drasticamente a taxa de produção de metano”. Isso demonstra que o equilíbrio químico e térmico do biodigestor é o que garante a continuidade das reações bioquímicas e evita o colapso do sistema. Em outra perspectiva, Wellinger (2013, p. 310) ressalta que “[...] o controle do tempo de retenção é essencial para permitir que os microrganismos completem seu ciclo metabólico e para prevenir a lavagem das colônias, o que comprometeria o desempenho global do reator”. Assim, o tempo de residência dos substratos deve ser suficiente para que as fases hidrolítica, acidogênica, acetogênica e metanogênica ocorram de modo equilibrado. Logo, é importante observar que sistemas operando em regime mesofílico (entre 30 °C e 40 °C) costumam apresentar maior estabilidade, enquanto os termofílicos (acima de 50 °C) oferecem rendimento superior, porém demandam maior controle operacional. Além disso, a agitação do conteúdo do digestor contribui para a homogeneização térmica e a distribuição uniforme dos microrganismos, evitando zonas mortas e sedimentação. Outro aspecto relevante é o teor de sólidos: substratos com concentração acima de 12% podem prejudicar a mistura e o fluxo do material, exigindo sistemas de bombeamento robustos. Dessa forma, o domínio técnico dessas variáveis não apenas maximiza o rendimento do biogás, mas também assegura a durabilidade do equipamento e a viabilidade econômica do empreendimento. Controlar o ambiente interno de um biodigestor é, portanto, um ato de equilíbrio entre ciência e engenharia, no qual cada ajuste influencia a sustentabilidade e a eficiência energética de todo o sistema.



A digestão anaeróbia é um processo extremamente sensível a variações de temperatura, acidez e concentração de substratos. Mesmo pequenas flutuações podem afetar profundamente o equilíbrio das populações bacterianas e reduzir a produção de biogás. É essencial manter o pH em torno de 7,0 e garantir estabilidade térmica durante todo o ciclo de operação. As bactérias metanogênicas, em particular, são altamente vulneráveis a oscilações térmicas e químicas; sua inibição pode resultar em acúmulo de ácidos graxos voláteis e colapso do sistema. Portanto, o controle operacional deve abranger o monitoramento constante das condições físico-químicas, a agitação adequada do substrato e o ajuste do tempo de retenção hidráulica de acordo com a carga orgânica e a natureza dos resíduos alimentados no reator (Deublein & Steinhauser, 2008, p. 212).

Assim, diversas configurações tecnológicas de biodigestores foram desenvolvidas ao longo das últimas décadas para atender diferentes tipos de resíduos, volumes de produção e finalidades energéticas, evidenciando que a biodigestão é uma ciência em permanente evolução. Entre as principais tipologias encontram-se os sistemas de batelada, contínuos, de mistura completa (CSTR), de fluxo ascendente (UASB) e os híbridos modernos que combinam princípios de ambos. Assim, cada modelo apresenta vantagens e limitações relacionadas à eficiência de conversão, custo de implantação e complexidade de operação. Conforme explicam Deublein e Steinhauser (2008, p. 185), “[...] o reator de batelada é o sistema mais simples, sendo alimentado de uma só vez e operado em ciclos fechados, enquanto os biodigestores contínuos permitem uma produção constante de biogás e maior estabilidade operacional”. Tal distinção demonstra que a escolha do sistema deve considerar a disponibilidade de substrato, o espaço físico e o objetivo final do uso energético. Wellinger (2013, p. 245) complementa que “[...] os reatores de mistura completa (CSTR) são amplamente aplicados em plantas industriais, pois garantem homogeneidade do substrato e controle eficiente de temperatura, favorecendo a produção de metano em larga escala”. Já os reatores UASB, amplamente utilizados no tratamento de efluentes, aproveitam o fluxo ascendente de líquidos para manter os microrganismos em suspensão, otimizando a degradação da matéria orgânica com menor tempo de retenção. Dito isso, em países com forte atividade agropecuária, como o Brasil e a Dinamarca, predominam sistemas contínuos, que apresentam rendimento mais estável e facilitam o aproveitamento energético do biogás. Por outro lado, os digestores de batelada são preferidos em pequenas propriedades, dada sua simplicidade construtiva e baixo custo de manutenção. É interessante observar que o avanço tecnológico vem permitindo a integração de sensores inteligentes, automação e controle remoto, o que eleva a eficiência e a segurança das operações. Esses avanços tornam os biodigestores não apenas equipamentos de tratamento de resíduos, mas também ferramentas estratégicas para a geração distribuída de energia, integrando o campo à lógica da transição energética. Dessa forma, compreender as características e potencialidades de cada tecnologia é essencial para dimensionar projetos sustentáveis que aliem produtividade, economia e responsabilidade ambiental.

Quando se analisa o rendimento energético do biogás, percebe-se que essa fonte renovável possui grande potencial para substituir combustíveis fósseis em diferentes setores produtivos, desde a geração elétrica até o transporte veicular. Logo, o poder calorífico do metano, principal componente do biogás, é de aproximadamente 35,8 MJ/m³, valor comparável ao do gás natural, o que demonstra sua relevância estratégica no contexto da transição energética global. Como observam Deublein e Steinhauser (2008, p. 234), “[...] o biogás purificado contém entre 55% e 70% de metano, resultando em um valor energético que pode alcançar até 6 kWh por metro cúbico, dependendo da eficiência do sistema de digestão e do processo de purificação”. Assim, essa equivalência energética permite que o biogás seja utilizado em motores de combustão interna, turbinas e sistemas de cogeração (CHP), proporcionando aproveitamento simultâneo de energia elétrica e térmica. Além disso, segundo Wellinger (2013, p. 273), “[...] o uso do biogás como biometano pode substituir diretamente o diesel e a gasolina, reduzindo em até 90% as emissões de gases de efeito estufa quando comparado aos combustíveis fósseis convencionais”. Logo, esse potencial de descarbonização é reforçado pelo fato de o carbono emitido na queima do biogás ser parte de um ciclo biogênico, ou seja, previamente capturado pelas plantas durante a fotossíntese, o que torna o balanço de emissões praticamente neutro. Em países europeus, a eficiência de conversão de energia elétrica a partir do biogás atinge índices superiores a 40%, enquanto sistemas de cogeração alcançam rendimentos globais de até 85%, integrando produção energética e reaproveitamento térmico. No Brasil, estudos associados ao PATEN (Programa de Aceleração da Transição Energética) apontam o biogás como vetor fundamental para a diversificação da matriz energética e redução da dependência de combustíveis importados. Assim, o aproveitamento energético do biogás não se limita à substituição direta de fontes fósseis, mas representa uma estratégia de reconfiguração estrutural da economia energética, conectando inovação tecnológica, sustentabilidade ambiental e desenvolvimento socioeconômico regional.

Sob a perspectiva ambiental, o aproveitamento do biogás e do digestato derivados da biodigestão representa uma das estratégias mais eficazes de mitigação das mudanças climáticas e de redução de resíduos orgânicos destinados a aterros. Assim, a conversão controlada da matéria orgânica em energia impede a liberação espontânea de metano na atmosfera, gás que possui potencial de aquecimento global vinte e cinco vezes superior ao do dióxido de carbono. Nesse sentido, o processo de biodigestão contribui diretamente para o cumprimento de metas climáticas internacionais e para a transição rumo a economias de baixo carbono. Segundo Lovins (2011, p. 88), “[...] a substituição de combustíveis fósseis por energias renováveis não apenas reduz as emissões, mas também reestrutura cadeias produtivas inteiras, promovendo eficiência e inovação”. Logo, essa visão de sustentabilidade integrada revela que o biogás não deve ser compreendido apenas como um produto energético, mas como um vetor de reconfiguração ecológica e tecnológica. Complementarmente, Deublein e

Steinhauser (2008, p. 246) ressaltam que “[...] o aproveitamento de resíduos agroindustriais em biodigestores reduz significativamente a carga orgânica descartada em corpos hídricos e diminui a demanda bioquímica de oxigênio, evitando impactos ambientais severos”. Ao transformar passivos ambientais em ativos energéticos, a biodigestão cumpre papel estratégico tanto no saneamento quanto na produção sustentável, articulando economia circular e ecologia industrial. Além disso, o uso do digestato como biofertilizante fecha o ciclo de nutrientes, reduzindo o uso de fertilizantes sintéticos que, em sua produção, são grandes emissores de CO₂ e óxidos de nitrogênio. Projetos de escala regional demonstram que a implantação de biodigestores em cooperativas rurais pode reduzir em até 80% o volume de resíduos destinados a aterros e eliminar totalmente a emissão de odores e chorume. Portanto, a tecnologia da biodigestão, além de gerar energia limpa, converte a gestão de resíduos em política ambiental ativa, transformando problemas locais em soluções sustentáveis de alcance global.

A tecnologia do biogás não apenas fornece energia renovável, mas também reduz as emissões de gases de efeito estufa ao capturar o metano que, de outra forma, escaparia para a atmosfera a partir do esterco, do esgoto e dos resíduos orgânicos. O processo estabiliza a matéria orgânica e diminui seu impacto ambiental. O digestato, subproduto da digestão anaeróbia, pode ser utilizado como um fertilizante de alto valor, fechando os ciclos de nutrientes e reduzindo a dependência de fertilizantes químicos. Assim, os sistemas de biogás contribuem simultaneamente para a proteção do clima, a gestão de resíduos e a agricultura sustentável. A combinação entre produção de energia e proteção ambiental faz da digestão anaeróbia uma das tecnologias mais eficientes para a sustentabilidade integrada (Wellinger, 2013, p. 375).

Desse modo, a biodigestão se consolida como um dos pilares mais promissores da transição energética contemporânea, articulando ciência, tecnologia e sustentabilidade em um único processo capaz de transformar resíduos em energia limpa e fertilidade agrícola. Essa tecnologia simboliza uma ruptura paradigmática, pois substitui a lógica linear de descarte pela lógica circular da regeneração, em que nada se perde e tudo se converte em novos ciclos de vida. Para Beck (1992, p. 104), “[...] as sociedades modernas, ao reconhecerem os riscos que elas mesmas produzem, são obrigadas a reformular suas estruturas energéticas e ambientais, sob pena de comprometer sua própria continuidade”. Essa reflexão demonstra que a adoção da biodigestão não é apenas uma escolha tecnológica, mas uma necessidade civilizatória diante da crise climática e da sobrecarga dos ecossistemas. Em complemento, Sachs (2009, p. 43) destaca que “[...] o desenvolvimento sustentável deve combinar inovação técnica com equidade social, de modo que o crescimento econômico não se faça à custa da natureza nem da dignidade humana”. Logo, essa concepção se materializa na biodigestão, pois ela integra dimensões ambientais, econômicas e sociais, gerando empregos locais, reduzindo emissões e promovendo segurança energética. O Brasil, ao regulamentar o PATEN (Programa de Aceleração da Transição Energética) em 2025, reconhece o papel central das energias de base biológica no alcance das metas de descarbonização e na expansão da matriz renovável. Além

disso, o uso descentralizado de biodigestores em propriedades rurais e centros urbanos reforça a ideia de autonomia energética e democratização do acesso à energia. Países como Alemanha, Índia e Dinamarca já demonstraram que a produção descentralizada de biogás é compatível com sistemas elétricos avançados e resilientes. Assim, a biodigestão não deve ser vista como uma alternativa marginal, mas como um eixo estruturante da economia verde, capaz de conectar inovação tecnológica, justiça ambiental e desenvolvimento sustentável. Em um cenário global cada vez mais pressionado por crises energéticas e ambientais, ela representa o elo entre o conhecimento científico e a prática ecológica, tornando possível um futuro em que energia e vida coexistam em equilíbrio.

Em continuidade a esse reaciocínio, é possível afirmar que a biodigestão ocupa um lugar estratégico dentro da lógica contemporânea da sustentabilidade, pois transforma o que antes era resíduo em ativo energético e ecológico, articulando tecnologia, meio ambiente e inclusão produtiva. A sustentabilidade, entendida não apenas como equilíbrio ecológico, mas também como justiça social e econômica, encontra nesse processo um de seus instrumentos mais concretos de aplicação. A biodigestão, ao capturar e converter gases de efeito estufa em energia útil, expressa o princípio da economia circular, em que os fluxos de matéria e energia são reinseridos nos sistemas produtivos, reduzindo desperdícios e dependências externas. Segundo Brown (2015, p. 45), “[...] o desafio do século XXI é criar uma economia capaz de responder à crise ambiental com soluções que unam eficiência, resiliência e equidade”. Dito isso, essa concepção reforça a ideia de que a sustentabilidade não pode mais ser tratada como um ideal abstrato, mas como um processo técnico e político de reestruturação civilizatória. De forma convergente, Leff (2006, p. 133) enfatiza que “[...] a racionalidade ambiental requer a integração de saberes ecológicos e tecnológicos em uma nova matriz produtiva, orientada pela ética da conservação e pelo valor da vida”. Assim, a valorização energética via biodigestão não é apenas uma alternativa tecnológica, mas um símbolo da mudança paradigmática que redefine o papel da humanidade frente aos limites do planeta. Essa integração entre inovação científica e responsabilidade socioambiental permite vislumbrar um novo modelo de desenvolvimento, no qual a geração de energia deixa de ser causa de degradação e passa a ser expressão de regeneração. O tema, portanto, revela que o verdadeiro potencial da biodigestão vai muito além da técnica: reside em sua capacidade de traduzir a sustentabilidade em prática cotidiana, tangível e transformadora.

Assim, de forma articulada às metas do Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN), a viabilidade econômica da biodigestão se apresenta como um vetor promissor de desenvolvimento sustentável nas esferas rural, urbana e industrial, embora ainda demande políticas estruturantes e incentivos consistentes. Logo, a valorização energética via biodigestão cria oportunidades de descentralização produtiva e inclusão socioeconômica, pois transforma a gestão de resíduos em fonte de receita e autonomia energética. Segundo Rifkin (2019, p. 72), “[...] a nova

economia verde se consolidará quando a energia for produzida localmente, compartilhada em redes inteligentes e integrada aos sistemas produtivos de pequena e média escala”. Essa descentralização, ao mesmo tempo tecnológica e social, permite que municípios, cooperativas e empreendimentos rurais tornem-se protagonistas da transição energética, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e fortalecendo cadeias produtivas locais. É importante destacar que o PATEN, instituído pela Lei nº 15.103/2025, foi criado para fomentar esse tipo de inovação descentralizada, oferecendo linhas de financiamento, garantias de risco e estímulos à integração de pequenas e médias iniciativas no setor energético. Como observam Ferreira e colaboradores (2021, p. 159), “[...] a coerência entre instrumentos normativos e práticas econômicas é fundamental para que o avanço tecnológico em energias renováveis se traduza em transformação social efetiva”. A biodigestão, nesse sentido, conecta ciência e território, permitindo que unidades familiares, agroindústrias e até centros urbanos possam gerar sua própria energia e reduzir custos operacionais. A médio prazo, essa prática pode fortalecer o conceito de soberania energética municipal, estimulando circuitos curtos de produção e consumo que revitalizam economias regionais e democratizam o acesso às tecnologias limpas. Contudo, a concretização dessa viabilidade depende da articulação entre marcos regulatórios, incentivos fiscais e capacitação técnica, elementos que o PATEN busca articular de forma transversal. Assim, a biodigestão, sob o amparo do programa, não apenas representa uma alternativa tecnológica, mas inaugura um novo modelo de política pública capaz de reconciliar crescimento econômico e justiça ambiental.

Diante desse quadro, ao considerar os modelos de gestão integrados entre municípios, cooperativas e empreendimentos agroindustriais, percebe-se que a efetividade da biodigestão como política pública de transição energética depende diretamente da articulação entre diferentes escalas de governança. Assim, a descentralização proposta pelo PATEN pressupõe uma rede cooperativa de atores locais, em que prefeituras, produtores e empresas compartilham responsabilidades, infraestrutura e benefícios. Logo, esse arranjo institucional amplia a eficiência do uso de resíduos, reduz custos operacionais e estimula práticas colaborativas de sustentabilidade. Ostrom (2015, p. 97) afirma que “[...] a gestão sustentável dos bens comuns só é possível quando os atores locais estão organizados em instituições de governança compartilhada, baseadas em confiança, transparência e reciprocidade”. Assim, essa visão é convergente com os princípios do PATEN, que estabelece diretrizes para projetos de energia renovável apoiados em parcerias público-privadas e consórcios intermunicipais. Ademais, Leff (2006, p. 118) ressalta que “[...] a racionalidade ambiental emerge quando o conhecimento técnico e o saber comunitário se unem em estratégias locais de desenvolvimento sustentável”. Nesse contexto, a biodigestão se transforma em uma prática social que ultrapassa a dimensão técnica e se insere na lógica de cooperação territorial, permitindo que os resíduos



gerados por um setor produtivo se convertam em insumos energéticos para outros, formando sistemas circulares e solidários. Municípios que adotam consórcios de biodigestão já demonstram resultados expressivos na redução de custos de transporte de resíduos e no fortalecimento de economias locais baseadas em energia limpa. Além disso, cooperativas rurais que operam biodigestores coletivos conseguem negociar o excedente energético, reinvestindo os lucros em infraestrutura social. Assim, o PATEN, ao incentivar modelos de governança compartilhada, atua como catalisador da sustentabilidade em múltiplas escalas, integrando economia, ecologia e solidariedade territorial. Esse tipo de gestão participativa não apenas amplia a eficácia das políticas públicas, mas também consolida um novo paradigma de desenvolvimento no qual energia e cidadania caminham lado a lado.

A governança bem-sucedida dos recursos de uso comum requer instituições que sejam adaptadas às especificidades dos ecossistemas locais e que permitam aos usuários participar diretamente na formulação das regras. Os sistemas de governança compartilhada tendem a apresentar melhor desempenho quando os participantes desenvolvem confiança mútua, monitoram o comportamento uns dos outros e dispõem de mecanismos locais para a resolução de conflitos. As autoridades externas podem desempenhar um papel de apoio, mas a sustentabilidade da gestão coletiva depende da capacidade dos atores locais de se auto-organizarem e de fazerem cumprir as normas acordadas. Assim, a governança policêntrica – que envolve múltiplos e sobrepostos centros de autoridade – oferece uma flexibilidade e uma resiliência que os sistemas centralizados frequentemente não possuem¹³ (Ostrom, 2015, p. 141).

Entretanto, mesmo com o avanço conceitual e institucional promovido pelo PATEN, a expansão da biodigestão no Brasil ainda enfrenta desafios estruturais que comprometem sua plena consolidação como vetor de desenvolvimento sustentável. Entre os principais entraves estão os altos custos iniciais de implantação dos sistemas, a falta de capacitação técnica de operadores e gestores, a escassez de marcos regulatórios específicos e as lacunas de infraestrutura para a distribuição do biometano. Esses obstáculos, somados à baixa difusão de conhecimento tecnológico, revelam a necessidade de uma política pública integrada que alinhe incentivos econômicos, formação profissional e planejamento territorial. Harvey (2015, p. 112) adverte que “[...] a transição ecológica exige a superação das contradições estruturais do capitalismo, que tende a restringir as inovações sustentáveis à lógica do lucro imediato, inviabilizando mudanças profundas nas bases produtivas”. Logo, essa reflexão é particularmente pertinente para o contexto brasileiro, onde a inovação verde ainda depende de subsídios e financiamento público, tornando o PATEN uma ferramenta estratégica para quebrar esse ciclo de dependência. De forma complementar, Rifkin (2011, p. 135) sustenta que “[...] as novas revoluções energéticas só prosperam quando são acompanhadas por uma infraestrutura de conhecimento e por redes que democratizam o acesso à tecnologia”. Assim, para que a biodigestão

¹³ Tradução nossa.

se torne economicamente viável em larga escala, é indispensável a criação de um ecossistema de inovação que envolva universidades, empresas e governos locais em uma agenda de pesquisa aplicada e extensão tecnológica. O PATEN, ao prever linhas de crédito específicas e mecanismos de garantia de risco, avança nessa direção, mas ainda precisa ser fortalecido por instrumentos de regulamentação e certificação que assegurem a rastreabilidade do biogás e do digestato. Além disso, o investimento em qualificação técnica e em assistência continuada pode evitar o subaproveitamento das plantas instaladas e reduzir a taxa de ociosidade operacional. Portanto, a consolidação da biodigestão depende não apenas da viabilidade econômica, mas também de uma transformação institucional capaz de integrar o conhecimento técnico-científico à prática social, transformando políticas públicas em motores de sustentabilidade.

Logo, a estrutura de financiamento e incentivo prevista no PATEN tem papel determinante para tornar a biodigestão uma alternativa competitiva frente às fontes fósseis, consolidando-se como política pública de transição energética. A criação de fundos garantidores, linhas de crédito subsidiadas e mecanismos de compartilhamento de risco abre caminho para que pequenos produtores, cooperativas e municípios tenham acesso à tecnologia, superando a concentração de investimentos em grandes empreendimentos. Como explica Lovins (2011, p. 141), “[...] a verdadeira revolução energética ocorre quando as políticas públicas conseguem alinhar capital, inovação e sustentabilidade, de modo que os incentivos econômicos impulsionem soluções de baixo carbono em vez de perpetuar estruturas fósseis”. Essa perspectiva reflete a necessidade de pensar o financiamento não como custo, mas como investimento estratégico em inovação e soberania energética. O PATEN avança nesse sentido ao prever apoio técnico e financeiro a projetos de pesquisa, desenvolvimento e implantação de plantas de biogás, com ênfase na integração entre instituições públicas, empresas e sociedade civil. Em consonância, Ferreira (2021, p. 176) observa que “[...] a sustentabilidade das políticas energéticas depende da coerência entre instrumentos normativos e práticas financeiras, garantindo que o investimento público seja multiplicador de desenvolvimento social e ambiental”. Dessa forma, os incentivos oferecidos pelo PATEN estimulam a criação de ecossistemas locais de energia renovável, onde a valorização de resíduos se torna fonte de renda e inovação. Logo, é possível mencionar exemplos bem-sucedidos em estados como Paraná e Mato Grosso do Sul, que já estruturaram linhas de crédito rural voltadas à instalação de biodigestores e à geração distribuída de biogás. Além disso, a integração desses projetos com metas nacionais de descarbonização fortalece o papel do Brasil como líder global em energias limpas, ampliando sua influência geopolítica na transição ecológica. Assim, o financiamento público-privado, articulado sob o marco regulatório do PATEN, representa não apenas uma resposta técnica ao problema energético, mas uma estratégia de reconfiguração produtiva, na qual a economia verde se transforma em vetor de inclusão e prosperidade sustentável.



Por conseguinte, a integração da biodigestão às diretrizes do PATEN revela-se um poderoso instrumento para dinamizar economias locais e fomentar empregos verdes, promovendo um ciclo virtuoso entre inovação, trabalho e sustentabilidade. A geração descentralizada de energia cria oportunidades de renda e inclusão produtiva especialmente em áreas rurais e periféricas, onde a escassez de alternativas econômicas sustentáveis é histórica. De acordo com Sachs (2009, p. 211), “[...] o desenvolvimento sustentável deve ser entendido como um processo multidimensional, que une eficiência econômica, equidade social e prudência ecológica, articulando o global e o local em uma mesma estratégia de futuro”. Essa concepção se concretiza na medida em que o PATEN apoia a criação de polos regionais de bioenergia, que utilizam resíduos agroindustriais, urbanos e rurais como insumos para geração de biogás e biofertilizantes, agregando valor ao que antes era descartado. Além disso, Wellinger (2013, p. 89) salienta que “[...] os sistemas de biodigestão podem se tornar motores de economias locais, gerando emprego em manutenção, transporte, operação e gestão ambiental, desde que amparados por políticas públicas consistentes”. Assim, a valorização energética via biodigestão amplia o conceito de trabalho verde ao incluir funções técnicas, educativas e comunitárias que consolidam a sustentabilidade como prática cotidiana. Em regiões onde o PATEN tem estimulado parcerias entre cooperativas, prefeituras e pequenas indústrias, observa-se um aumento no número de empregos diretos e indiretos ligados à gestão de resíduos, consultoria ambiental e manutenção de biodigestores. Além de fortalecer a economia solidária, essa dinâmica gera um efeito multiplicador sobre a qualidade de vida, ao reduzir custos energéticos e oferecer novas perspectivas de inserção laboral para jovens e trabalhadores rurais. Dessa forma, a biodigestão, quando articulada a uma política pública nacional como o PATEN, transforma-se em vetor de desenvolvimento humano e tecnológico, promovendo um novo pacto social em torno da sustentabilidade e da dignidade produtiva.

Nesse horizonte de transição energética e ecológica, a soberania energética desponta como um dos eixos mais estratégicos do programa, pois redefine o papel dos territórios na produção e no consumo de energia limpa. A biodigestão, ao possibilitar a autogerção e o uso local de biogás e biometano, torna as comunidades menos dependentes de combustíveis fósseis e de redes centralizadas de distribuição. Logo, essa autonomia não é apenas técnica, mas política, na medida em que permite aos municípios e regiões rurais exercerem maior controle sobre seus recursos e fluxos energéticos. Segundo Beck (2013, p. 158), “[...] a sociedade de risco contemporânea exige novas formas de soberania baseadas na capacidade dos territórios de gerirem seus próprios recursos e reduzirem vulnerabilidades estruturais”. Assim, essa ideia se concretiza no PATEN, que incentiva projetos de energia descentralizada articulados à lógica da segurança energética nacional, buscando reduzir desigualdades regionais e ampliar a resiliência climática. Do mesmo modo, Smil (2010, p. 214) observa que “[...] a verdadeira independência energética só é alcançada quando a produção é

diversificada e adaptada às condições locais, aproveitando ao máximo as fontes renováveis disponíveis". Essa perspectiva reforça que o biogás gerado em unidades rurais, cooperativas e municípios pode ser convertido em eletricidade, calor ou biometano para veículos, criando circuitos curtos de produção e consumo. Além de promover eficiência, esse modelo fortalece o tecido social ao estimular a organização comunitária e a redistribuição de renda. Nas regiões onde o PATEN tem fomentado redes intermunicipais de energia renovável, a biodigestão tem sido vista não apenas como uma solução ambiental, mas como um mecanismo de empoderamento territorial. Logo, essa descentralização energética traduz, em prática, a soberania dos povos sobre seus próprios destinos, transformando resíduos locais em energia e dignidade.

Os sistemas de energia distribuída capacitam as comunidades a produzir, gerenciar e armazenar sua própria energia, reduzindo a dependência das redes centralizadas e dos voláteis mercados de combustíveis fósseis. A geração local a partir de fontes renováveis aumenta a segurança energética e a resiliência econômica, ao mesmo tempo em que mantém o capital e os benefícios dentro da própria região. Ao integrar bioenergia, energia eólica e solar no nível comunitário, as regiões podem alcançar não apenas maior eficiência, mas também autonomia política e coesão social. Essa mudança – de consumidores de energia para cidadãos da energia – redefine a soberania em termos de controle local, inovação e prosperidade compartilhada¹⁴ (Lovins, 2011, p. 246).

Desse modo, ao se analisar os impactos ambientais da valorização energética via biodigestão no âmbito do PATEN, percebe-se que essa tecnologia atua diretamente sobre as metas de mitigação climática e descarbonização estabelecidas pelo Brasil para a próxima década. A captura e o aproveitamento do metano – gás cujo potencial de aquecimento global é mais de vinte vezes superior ao do dióxido de carbono – tornam o processo de biodigestão uma ferramenta essencial na redução de emissões e na valorização de resíduos orgânicos. De acordo com Goldemberg e Lucon (2007, p. 243), “[...] a substituição de combustíveis fósseis por biogás pode reduzir significativamente as emissões líquidas de carbono, representando um dos caminhos mais eficazes para compatibilizar desenvolvimento energético e sustentabilidade ambiental”. Essa visão dialoga diretamente com os objetivos do PATEN, que reconhece no biogás uma fonte de energia estratégica para a transição ecológica, ao mesmo tempo em que promove o tratamento ambientalmente responsável de resíduos agrícolas, urbanos e industriais. Em complemento, Balzani e Armaroli (2011, p. 176) argumentam que “[...] o futuro energético sustentável depende da conversão inteligente das fontes renováveis, priorizando tecnologias que fechem o ciclo da matéria e reduzam impactos sobre os ecossistemas”. Nesse sentido, o aproveitamento dos subprodutos do processo – como o digestato – contribui para a fertilização natural dos solos e para a redução do uso de insumos químicos, fortalecendo práticas

¹⁴ Tradução nossa.



agrícolas regenerativas. Assim, a valorização energética, portanto, alinha-se à lógica do carbono neutro e das políticas de economia circular, transformando passivos ambientais em ativos econômicos. Nos estados que já aderiram a programas pilotos vinculados ao PATEN, observa-se a diminuição de áreas de aterros sanitários, a contenção de lixiviados e a melhoria da qualidade do ar em zonas periurbanas. Além disso, o incentivo à purificação e compressão do biometano amplia as possibilidades de sua utilização no transporte público, reduzindo a dependência do diesel e contribuindo para a mobilidade limpa. Assim, a biodigestão se integra à agenda climática brasileira como uma tecnologia de duplo impacto – ambiental e social – que fortalece a transição justa preconizada pelo PATEN e consolida o país como referência global em bioenergia sustentável.

Em uma perspectiva mais ampla, a integração da biodigestão com outras fontes renováveis promovida pelo PATEN representa uma etapa decisiva na diversificação e na democratização da matriz energética brasileira. Logo, ao fomentar a interligação entre sistemas de biogás, solar e eólico, o programa contribui para a construção de um modelo híbrido de produção energética, mais resiliente às oscilações climáticas e mais eficiente no uso de recursos. Assim, essa integração é essencial para reduzir a intermitência típica das energias renováveis e ampliar o fornecimento contínuo de energia limpa em áreas rurais e urbanas. Conforme destaca Rosendahl (2013, p. 203), “[...] o futuro da energia sustentável está na combinação inteligente das tecnologias renováveis, de modo que cada fonte complemente as limitações das demais, criando sistemas energeticamente sinérgicos e ambientalmente estáveis”. Ao seguir essa diretriz, o PATEN avança em direção a uma matriz descentralizada, articulando cooperativas de biogás com centrais solares e redes inteligentes que possibilitam o compartilhamento de excedentes energéticos. Por outro lado, Smil (2018, p. 412) observa que “[...] a transição energética global depende tanto da inovação tecnológica quanto da capacidade institucional de integrar múltiplas fontes de energia em redes sustentáveis e acessíveis”. Assim, essa visão evidencia que o PATEN não atua apenas como um programa técnico, mas como um instrumento político que impulsiona a convergência entre ciência, economia e meio ambiente. Dito isso, a interconexão de plantas de biodigestão com sistemas fotovoltaicos e microgeradores eólicos tem mostrado resultados expressivos em regiões agroindustriais, onde o aproveitamento dos resíduos é complementado pelo uso de energia solar nos períodos de menor produção de biogás. Essa simbiose tecnológica reduz custos operacionais, otimiza o desempenho energético e amplia a autonomia local, ao mesmo tempo em que fortalece o compromisso nacional com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Assim, a integração de diferentes fontes sob o amparo do PATEN materializa um novo paradigma de produção energética, capaz de unir diversidade, estabilidade e justiça ambiental em um mesmo projeto de país.

Desse modo, o PATEN consolida-se como um marco de virada na história das políticas energéticas brasileiras, ao promover uma transição que não é apenas tecnológica, mas civilizatória. A

valorização energética via biodigestão, ao articular inovação, sustentabilidade e justiça ambiental, transforma a forma como o país lida com seus recursos e resíduos, inaugurando um novo paradigma produtivo fundado na simbiose entre economia verde e inclusão social. De modo emblemático, Rifkin (2019, p. 214) observa que “[...] as transições energéticas bem-sucedidas são aquelas que redefinem os fundamentos econômicos da sociedade, criando novas infraestruturas de colaboração e democratizando o acesso à energia”. Assim, essa perspectiva reflete exatamente o propósito do PATEN: descentralizar a geração energética, promover autonomia territorial e alinhar o país às metas globais de descarbonização. Em consonância, Sachs (2009, p. 233) argumenta que “[...] o desenvolvimento sustentável implica uma mudança de racionalidade, em que o crescimento deixa de ser um fim em si mesmo e passa a servir ao bem-estar coletivo e à preservação da vida no planeta”. Assim, o PATEN atua como catalisador de uma economia ecológica, integrando biogás, solar, eólica e outras fontes renováveis em um sistema descentralizado e resiliente. A política pública brasileira, ao investir em biodigestão, não apenas reduz emissões e gera energia limpa, mas também fomenta empregos verdes, revitaliza comunidades e fortalece a soberania energética nacional. Essa convergência entre ciência, cidadania e sustentabilidade projeta o Brasil como referência mundial na transição ecológica justa, mostrando que o futuro energético não se constrói apenas com tecnologia, mas com compromisso social e visão de mundo. Portanto, pode-se afirmar que o PATEN, ao aliar política pública, inovação e ética ambiental, representa o passo decisivo rumo a um modelo de desenvolvimento que comprehende o planeta não como recurso a ser explorado, mas como casa comum a ser preservada e compartilhada.

A nova racionalidade que se forja nos interstícios dos escombros e nas muralhas da racionalidade que funda a modernidade não surge somente da confrontação com a racionalidade econômica, mas com o todo social que a contém, com a ordem jurídica e o poder do Estado. O ambiente emerge do campo da externalidade ao qual foi lançado pela centralidade da racionalidade econômica e o logocentrismo das ciências. Dessa maneira, a questão ambiental veio problematizar as teorias científicas e os métodos de investigação para apreender uma realidade em vias de complexificação que desborda a capacidade de compreensão dos paradigmas estabelecidos. Apresentou-se, assim, a necessidade de interiorizar um saber ambiental emergente no corpo das ciências naturais e sociais, para construir um conhecimento capaz de integrar a multicausalidade e as relações de interdependência dos processos da ordem natural e social que determinam e condicionam as mudanças socioambientais, assim como para construir uma racionalidade produtiva fundada nos princípios do desenvolvimento sustentável¹⁵ (Leff, 2006, p. 239).

O PATEN também deve ser compreendido como um projeto de transformação social, ambiental e tecnológica que busca reconfigurar o papel do Brasil no cenário global da transição energética. A política atua em múltiplas dimensões – incentivando a pesquisa aplicada, o

¹⁵ Tradução nossa.



desenvolvimento tecnológico e a inclusão produtiva – e reposiciona o país como protagonista em sustentabilidade e inovação verde. Assim, ao promover sinergias entre universidades, centros de pesquisa, setor produtivo e governos locais, o programa cria condições para a consolidação de uma economia baseada em conhecimento e em tecnologias limpas. Como explicam Ferreira e colaboradores (2021, p. 143), “[...] o desenvolvimento sustentável não se limita à preservação ambiental, mas envolve a criação de novas capacidades técnicas e institucionais capazes de sustentar a inovação em larga escala”. Nessa mesma linha, Leff (1998, p. 87) defende que “[...] a transição ecológica requer um novo paradigma de racionalidade, onde a ciência e a tecnologia estejam subordinadas à ética da sustentabilidade e ao valor da vida”. Assim, essa convergência de perspectivas revela que o PATEN, ao estimular a adoção de tecnologias como a biodigestão, o biogás e o biometano, atua como motor de inovação social e ambiental. Além disso, a criação de redes interinstitucionais amplia a difusão do conhecimento técnico, permitindo que soluções sustentáveis se adaptem às realidades regionais. Logo, o caráter descentralizado do programa reforça o protagonismo das comunidades locais, que deixam de ser meras receptoras de políticas públicas e passam a ser agentes de inovação territorial. Assim, o PATEN não apenas fomenta a geração de energia limpa, mas também transforma o modo como o conhecimento e a tecnologia são distribuídos, democratizando o acesso ao desenvolvimento e promovendo uma nova ética pública orientada pelo equilíbrio entre progresso e sustentabilidade.

Dessa forma, ao observar as dimensões sociais do PATEN, torna-se evidente que a política ultrapassa o campo da energia e se afirma como um projeto de reconstrução das bases de desenvolvimento e de redistribuição de oportunidades no território brasileiro. A inclusão produtiva promovida por meio das cadeias da bioenergia, especialmente da biodigestão, gera novos espaços de trabalho, fomenta a economia solidária e reduz desigualdades históricas entre regiões urbanas e rurais. Assim, além de proporcionar geração de renda, o programa fortalece o capital humano ao investir em formação técnica e em programas de capacitação voltados à economia verde, consolidando um modelo em que o conhecimento se torna o principal vetor de transformação social. Beck (1992, p. 181) aponta que “[...] as transformações ambientais contemporâneas só serão eficazes se estiverem acompanhadas por uma redistribuição das capacidades e das oportunidades sociais, de modo que todos possam participar da construção do futuro sustentável”. Nessa direção, Gadotti (2008, p. 63) complementa que “[...] educar para a sustentabilidade significa formar sujeitos conscientes de seu papel coletivo e preparados para agir de forma solidária na preservação da vida”. O PATEN materializa essa concepção ao criar instrumentos de articulação entre política pública e cidadania ambiental, transformando comunidades em protagonistas da transição ecológica. Assim, a criação de polos de bioenergia e a promoção de cooperativas de resíduos demonstram que o desenvolvimento sustentável, quando democratizado, é capaz de gerar autonomia social e fortalecer a coesão territorial. A dimensão

educativa do programa também se expressa nas parcerias com universidades e institutos federais, que atuam como multiplicadores de conhecimento técnico e inovação social. Ao descentralizar o poder energético e o acesso à tecnologia, o programa reconfigura a geografia do desenvolvimento brasileiro, aproximando sustentabilidade e justiça social. Assim, o programa não se limita a produzir energia limpa, mas propõe uma “nova pedagogia de convivência” entre seres humanos e natureza, baseada na corresponsabilidade e no cuidado coletivo. Em última instância, o PATEN representa a síntese entre política, ética e ciência: um modelo de governança que alia o potencial transformador da tecnologia ao compromisso humanista de construir um futuro inclusivo, equitativo e ecologicamente sustentável.

4 CONCLUSÃO

A análise desenvolvida ao longo da pesquisa evidencia que a biodigestão de resíduos orgânicos, quando articulada às diretrizes do PATEN, representa mais que uma solução técnica de geração energética: configura-se como um projeto de reordenação produtiva e ambiental que redefine o papel do Brasil na agenda global da sustentabilidade. O estudo demonstrou que o processo de biodigestão não apenas reduz emissões e trata adequadamente os resíduos, mas integra dimensões sociais, econômicas e ecológicas em uma lógica de circularidade que rompe com o paradigma linear do descarte. A valorização energética dos resíduos, ao transformar passivos ambientais em ativos produtivos, materializa os princípios da economia verde e do desenvolvimento sustentável. Assim, os resultados apontam que o fortalecimento de políticas públicas como o PATEN é essencial para que o país avance na transição ecológica, estruturando uma matriz energética menos dependente de fontes fósseis e mais próxima das dinâmicas territoriais e comunitárias.

Assim, constatou-se que a biodigestão possui potencial singular de descentralizar a produção de energia, tornando possível a autossuficiência energética de pequenas propriedades rurais, cooperativas e municípios, o que a insere como instrumento de democratização da energia. Essa característica de produção distribuída, amplamente incentivada pelo PATEN, garante não apenas eficiência técnica, mas também autonomia social e territorial. As evidências mostraram que, ao estimular a formação de polos de bioenergia e integrar a biodigestão a outras fontes renováveis – como solar e eólica –, o programa cria condições para que o Brasil consolide um modelo de soberania energética baseado em diversidade tecnológica e participação popular. A descentralização produtiva, ao mesmo tempo que fortalece economias locais, também reduz desigualdades regionais e favorece a inclusão de novos atores no setor energético, demonstrando que sustentabilidade e equidade podem ser dimensões complementares e não excludentes.

Logo, os resultados também revelaram que o PATEN desempenha papel estruturante na articulação entre inovação tecnológica e políticas sociais. Ao oferecer incentivos financeiros,

mecanismos de mitigação de risco e apoio técnico, o programa amplia o acesso à tecnologia de biodigestão e estimula a formação de redes cooperativas de gestão de resíduos. Assim, essas iniciativas permitem que a transição energética seja vivenciada de forma capilarizada, incorporando saberes locais e valorizando práticas comunitárias. A construção dessa infraestrutura de sustentabilidade indica que a transição não deve ser vista como um processo meramente técnico, mas como uma reconfiguração cultural e institucional que exige educação ambiental, governança compartilhada e compromisso político contínuo. Nesse sentido, a consolidação da biodigestão como eixo estratégico depende tanto do avanço tecnológico quanto da formação de uma consciência coletiva de corresponsabilidade socioambiental.

Neste sentido, outro achado importante refere-se à dimensão econômica do processo. As experiências observadas indicam que a biodigestão tem potencial para gerar múltiplos benefícios econômicos – como redução de custos energéticos, produção de biofertilizantes e diversificação da renda –, especialmente em cadeias agroindustriais e cooperativas rurais. O PATEN, ao viabilizar modelos integrados de gestão, oferece suporte para que o biogás e o digestato sejam incorporados às cadeias produtivas, agregando valor e estimulando o desenvolvimento regional sustentável. O aproveitamento energético dos resíduos, ao substituir fontes fósseis, também reduz a vulnerabilidade do país às variações de preços internacionais de combustíveis, fortalecendo sua soberania econômica. Assim, os achados demonstram que o desenvolvimento energético sustentável é possível quando política pública, tecnologia e participação social convergem em torno de um mesmo propósito de justiça ambiental e eficiência produtiva.

Em termos ambientais, a pesquisa confirmou que a biodigestão é um dos instrumentos mais eficazes para a mitigação das mudanças climáticas e o cumprimento das metas de descarbonização previstas no PATEN. O aproveitamento controlado do metano, a redução do uso de aterros e a reintegração do digestato ao solo configuram uma tríade de impactos positivos que fazem da biodigestão um modelo exemplar de simbiose entre produção e conservação. Além disso, a política pública de incentivo à bioenergia promove a redução da poluição e o reaproveitamento de resíduos urbanos e rurais, gerando benefícios diretos à saúde pública e à qualidade de vida. O PATEN, ao alinhar inovação e responsabilidade ambiental, cria as bases de uma nova racionalidade ecológica, na qual o desenvolvimento não se mede apenas pelo crescimento econômico, mas pela capacidade de regenerar ecossistemas e assegurar o futuro comum.

Dessa forma, o conjunto de achados permite afirmar que a biodigestão, apoiada institucionalmente pelo PATEN, consolida-se como uma das principais estratégias para que o Brasil avance rumo à sustentabilidade e à soberania energética. A política, ao articular dimensões tecnológicas, sociais e econômicas, oferece as condições para que o país transforme sua matriz

produtiva sem comprometer os limites ecológicos. Trata-se, portanto, de um caminho que alia inovação e inclusão, eficiência e solidariedade, autonomia e cooperação. Assim, o Brasil vislumbra, por meio da integração entre política pública e ciência aplicada, a possibilidade de liderar uma nova etapa civilizatória: aquela em que o desenvolvimento se expressa pela harmonia entre energia, vida e justiça ambiental.

REFERÊNCIAS

ACSELRAD, H. Justiça ambiental e construção social do risco. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2004.

ACSELRAD, H. Sustentabilidade e território. Rio de Janeiro: Garamond, 2010.

BECK, U. Risk Society: Towards a New Modernity. London: Sage Publications, 1992.

BECK, U. World at Risk. Cambridge: Polity Press, 2010.

BECK, U. La sociedad del riesgo global. Barcelona: Paidós, 2001.

BRASIL. Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN). Lei nº 15.103, de 22 de janeiro de 2025. Brasília: Governo Federal, 2025.

BRASIL. Brasil, líder mundial na transição energética (2023-2025). Brasília: Governo Federal, 2023.

BROWN, L. R. Plan B 4.0: Mobilizing to Save Civilization. New York: W.W. Norton & Company, 2009.

DALY, H. E. Steady-State Economics. Washington, D.C.: Island Press, 1991.

DALY, H. E. Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development. Boston: Beacon Press, 1996.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from Waste and Renewable Resources. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

DEZEM, L. T.. et al. Nova Lei Geral do Licenciamento ambiental – Celeridade letal, autoavaliação e a “tragédia dos comuns” na flexibilização dos controles ambientais. REVISTA DELOS, 18(69), e5970. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n69-122> Acesso em 02 de out. 2025.

DOS SANTOS, A. N. S. et al. Emergência Climática e Educação – Impactos no meio ambiente e a transformação do currículo escolar pela lei 14.926 de 2024. ARACÊ, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 2379–2400, 2025. DOI: 10.56238/arev7n1-144. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/2874>. Acesso em: 05 out. 2025.

DOS SANTOS, A. N. S. et al. Resíduos Sólidos e Design Sustentável – Uma análise da reciclagem na “economia circular” à luz da agenda 2030. ARACÊ, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 7365–7391, 2025. DOI: 10.56238/arev7n2-164. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/3335>. Acesso em: 05 out. 2025.

DOS SANTOS, A. N. S. et al. Justiça ambiental e os impactos na saúde dos trabalhadores rurais e comunidades do campo: agrotóxicos, desastres ambientais e contaminação hídrica. ARACÊ , [S. l.], v. 7, n. 3, p. 13724–13752, 2025. DOI: 10.56238/arev7n3-208. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/3971>. Acesso em: 05 out. 2025.



DOS SANTOS, A. N. S. et al. Territórios dos ventos – geopolítica, impactos ambientais e desafios da energia eólica no Brasil”. ARACÊ 7 (6): 29407-58. DOI: <https://doi.org/10.56238/arev7n6-024>. Acesso em: 05 out. 2025.

FLICK, U. Introdução à pesquisa qualitativa. Porto Alegre: Artmed, 2013.

FELIPPE, J. N. de O. et al. Colheita em risco – os impactos das mudanças climáticas na produção de frutas, legumes e verduras no Brasil. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, 23(7), e10514. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv23n7-001> Acesso em 02 de out. 2025.

GADOTTI, M. Pedagogia da Terra. São Paulo: Instituto Paulo Freire, 2000.

GADOTTI, M. Educar para a sustentabilidade: uma contribuição à década da educação para o desenvolvimento sustentável. São Paulo: Instituto Paulo Freire, 2008.

GADOTTI, M. Pedagogia da práxis. São Paulo: Cortez, 2012.

GERARDI, M. H. The Microbiology of Anaerobic Digesters. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. São Paulo: Atlas, 2008.

GOLDENBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos Avançados, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

HARVEY, D. A produção capitalista do espaço. São Paulo: Annablume, 2005.

HARVEY, D. Spaces of Global Capitalism: A Theory of Uneven Geographical Development. London: Verso, 2006.

HARVEY, D. O enigma do capital e as crises do capitalismo. São Paulo: Boitempo, 2011.

HOLM-NIELSEN, J. B.; EHIMEN, E. A. Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining. London: Academic Press, 2016.

LATOUCHE, S. Pequeno tratado do decrescimento sereno. São Paulo: Martins Fontes, 2009.

LEFF, E. Saber ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder. México: Siglo XXI Editores, 2001.

LEFF, E. Racionalidade ambiental: a reapropriação social da natureza. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006.

LEFF, E. Epistemologia ambiental. São Paulo: Cortez, 2010.

LOVINS, A. Reinventing Fire: Bold Business Solutions for the New Energy Era. White River Junction: Chelsea Green Publishing, 2011.

LOVINS, A.; COHEN, B. The Reinvention of Fire: Transforming the Global Energy System. New York: Routledge, 2018.



MEADOWS, D. H.; RANDERS, J.; MEADOWS, D. L. *Limits to Growth: The 30-Year Update.* London: Earthscan, 2004.

MINAYO, M. C. S. *O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde.* São Paulo: Hucitec, 2007.

MINAYO, M. C. S.; DESLANDES, S. F. *Caminhos do pensamento: epistemologia e método.* Rio de Janeiro: Fiocruz, 2002.

RIFKIN, J. *The Age of Access: The New Culture of Hypercapitalism.* New York: Tarcher/Putnam, 2000.

RIFKIN, J. *The Green New Deal: Why the Fossil Fuel Civilization Will Collapse by 2028.* New York: St. Martin's Press, 2019.

SACHS, I. *Caminhos para o desenvolvimento sustentável.* Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

SACHS, I. *Desenvolvimento includente, sustentável e sustentado.* Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

SACHS, I. *Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente.* São Paulo: Studio Nobel, 2009.

SANTOS, A. N. S. dos. et al. “Raízes e Asas”: entrelaçando educação ambiental crítica e literatura infantil nos primeiros passos do ensino fundamental. *Cuadernos De Educación Y Desarrollo - QUALIS A4*, 16(7), e4886. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/cuadv16n7-108> Acesso em 02 de out. 2025.

SANTOS, A. N. S. dos. et al. “Luz e aprendizagem”: integrando energia solar e educação ambiental no ensino por metodologias ativas com células fotovoltaicas. *Cuadernos De Educación Y Desarrollo - QUALIS A4*, 16(8), e5133. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/cuadv16n8-055> Acesso em 02 de out. 2025.

SANTOS, A. N. S. dos. et al. “Radiografia do saneamento básico no Brasil”: navegando pelos labirintos da gestão do saneamento básico em cidades brasileiras em 2024 e as consequências para a população. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, 17(8), e10020. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.8-523> Acesso em 02 de out. 2025.

SANTOS, A. N. S. dos. et al. Caminhos trancados: o labirinto dos desafios burocráticos e legais nas concessões florestais Federais no Brasil. *OBSERVATORIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, 22(12), e8314. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n12-182> Acesso em 02 de out. 2025.

SANTOS, A. N. S. dos. et al. Racismo ambiental, saúde e direitos sociais: causalidades e impactos da degradação ambiental em comunidades vulneráveis no Brasil. *OBSERVATORIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, 23(1), e8603. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv23n1-073> Acesso em 02 de out. 2025.

SANTOS, A. N. S. dos. et al. Transição energética e preservação: integração de fontes renováveis, biodiversidade e economia verde em tempos de crise climática. *OBSERVATORIO DE LA*

ECONOMÍA LATINOAMERICANA, 23(3), e9234. Disponível em:
<https://doi.org/10.55905/oelv23n3-041> Acesso em 02 de out. 2025.

SILVA, C. M.; ARBILLA, G. Emissões atmosféricas e mudanças climáticas. Rio de Janeiro: Interciênciac, 2022.

SMIL, V. Energy Transitions: History, Requirements, Prospects. Santa Barbara: Praeger, 2010.

STRYI-HIPP, G. Renewable Heating and Cooling: Technologies and Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2016.

STAKE, R. E. Pesquisa qualitativa: estudando como as coisas funcionam. Porto Alegre: Penso, 2011.

VEIGA, J. E. Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI. Rio de Janeiro: Garamond, 2010.

VEIGA, J. E. Sustentabilidade: a legitimação de um novo valor. São Paulo: Senac, 2015.

WEBER, M. A objetividade do conhecimento nas ciências sociais. São Paulo: Cortez, 1949.

WELLINGER, A.; MURPHY, J. D.; BAXTER, D. (eds.). The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.