1. Introdução

A Amazônia Legal abriga uma das maiores reservas de biodiversidade do planeta e desempenha papel estratégico na economia brasileira. Entre as atividades produtivas relevantes da região destaca-se a pesca e o processamento de pescado, que constituem importantes fontes de renda e segurança alimentar para comunidades ribeirinhas.

O processamento industrial de pescado, entretanto, gera quantidades significativas de resíduos orgânicos, incluindo vísceras, cabeças, espinhas e tecidos adiposos. Em muitos casos, esses resíduos são descartados de forma inadequada, seja por disposição direta em corpos hídricos ou por destinação informal, contribuindo para aumento da carga orgânica nos rios e proliferação de macrófitas aquáticas (Esteves, 2011).

Além dos impactos ambientais, a subutilização desses resíduos representa uma perda de potencial energético e econômico, especialmente considerando sua elevada concentração de lipídios e proteínas.

Nos últimos anos, o conceito de bioeconomia circular tem emergido como abordagem promissora para integrar produção de energia, aproveitamento de resíduos e desenvolvimento regional (Geissdoerfer et al., 2017).

Nesse contexto, o projeto ARANDU insere-se no âmbito de um termo de cooperação técnico-científica voltado ao desenvolvimento de soluções tecnológicas para o aproveitamento energético de resíduos da cadeia pesqueira amazônica, com foco na extração de óleo, para produção de biodiesel, e biogás/biometano. A iniciativa busca promover a valorização de subprodutos, redução de impactos ambientais e fortalecimento da bioeconomia regional por meio de pesquisa aplicada, integração institucional e geração de rotas sustentáveis de conversão energética.

2. Metodologia

A metodologia do Projeto Arandu está estruturada em múltiplas frentes integradas de investigação, conduzidas por grupos de pesquisa com competências complementares, com o objetivo de avaliar de forma sistêmica o potencial tecnológico, econômico e socioambiental do aproveitamento de resíduos da pesca. As atividades contemplam desde a caracterização físico-química e avaliação do potencial metanogênico dos resíduos, passando pelo desenvolvimento e validação de processos para extração de triglicerídeos e obtenção de biocombustíveis, até a análise de coprodutos e rotas de valorização, como o uso do digestato na agricultura e o aproveitamento da fração proteica para formulação de ração animal.

Também são conduzidos estudos de codigestão com glicerina visando avaliar ganhos de produtividade, estabilidade do processo e redução do tempo de retenção hidráulica, além do mapeamento das principais espécies processadas na região amazônica e da disponibilidade de resíduos para definição de cadeias de suprimento e replicabilidade da solução em escala regional e nacional. Paralelamente, são elaborados cenários técnico-econômicos e modelos de negócios, incluindo análise regulatória, oportunidades em mercados de carbono e instrumentos financeiros verdes, bem como avaliação de rotas de comercialização de produtos intermediários e finais, como biogás, biometano, biodiesel e lipídios extraídos.

Para facilitar a compreensão da integração entre as diferentes rotas tecnológicas avaliadas no projeto, foi desenvolvido um diagrama conceitual do sistema ARANDU. O modelo integra processos de conversão energética, aproveitamento de subprodutos e cadeias produtivas locais, estruturando um arranjo de bioeconomia circular adaptado às condições da Amazônia Legal. A Figura 1 a seguir apresenta a metodologia de forma esquemática.

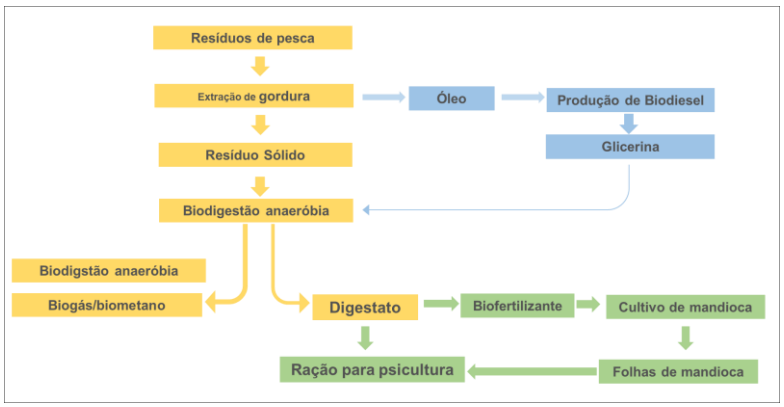


Figura 1 - Diagrama conceitual do sistema integrado ARANDU. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Sendo assim, o projeto parte dos resíduos gerados em frigoríficos de pescado e integra três rotas principais de valorização:

1. produção de biodiesel a partir da fração lipídica;
2. produção de biogás e biometano via biodigestão anaeróbia;
3. produção de biofertilizantes e insumos para ração de piscicultura.

Esse método permite maximizar o aproveitamento energético e nutricional dos resíduos, reduzindo desperdícios e criando novas cadeias produtivas regionais.

2.1 Estrutura do projeto

O projeto ARANDU foi iniciado em junho de 2025 com prazo de execução de 18 meses e envolve quatro instituições parceiras. As atividades estão estruturadas em quatro etapas principais:

1. caracterização dos resíduos
2. avaliação de rotas tecnológicas
3. integração de processos
4. concepção de planta modular.

2.2 Avaliação do potencial metanogênico

Estão sendo conduzidos ensaios laboratoriais de Potencial Bioquímico de Metano (BMP) para avaliar a produção de biogás a partir dos resíduos.

Os experimentos considerarão diferentes cenários:

- resíduos in natura
- resíduos + efluentes do frigorífico
- resíduos após extração de gordura
- resíduos após extração de gordura + glicerina.

A glicerina utilizada será proveniente da produção de biodiesel, que corresponde a aproximadamente 10% do volume produzido (Knothe et al., 2015).

2.3 Extração de gordura e produção de biodiesel

A fração lipídica rica em triglicerídeos será extraída e utilizada como matéria-prima para produção de biodiesel por meio de transesterificação. Esse processo gera glicerina como coproduto, a qual poderá ser reutilizada na codigestão anaeróbia, aumentando o rendimento do processo de produção de biogás.

2.4 Aproveitamento energético de resíduos orgânicos

A biodigestão anaeróbia é uma das tecnologias mais utilizadas para conversão de resíduos orgânicos em energia renovável, permitindo a produção de biogás rico em metano (Angelidaki et al., 2018). Esse processo apresenta diversas vantagens:

- redução da carga orgânica de resíduos
- geração de energia renovável
- produção de fertilizantes orgânicos
- redução de emissões de gases de efeito estufa.

2.5 Potencial energético dos resíduos da pesca

Os resíduos do processamento de pescado possuem composição química favorável à produção de biocombustíveis, especialmente devido ao elevado teor de lipídios.

Tabela 1 – Potencial energético de resíduos da pesca

Parâmetro	Faixa típica
Teor de lipídios	15 – 40 %
Proteínas	30 – 60 %
Potencial de biogás	400 – 700 Nm^3/t
Potencial de metano	250 – 450 Nm^3/t
Potencial de biodiesel	100 – 300 L/t

Fonte: Adaptado de Mata-Alvarez et al. (2014) e IEA Bioenergy (2020).

2.6 Modelo de economia circular do projeto

O projeto ARANDU propõe um modelo integrado de aproveitamento de resíduos da pesca, conectando diferentes processos tecnológicos em um sistema de economia circular.



Figura 2 - Esquema conceitual de economia circular. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.7. Concepção de planta modular

A deficiente infraestrutura logística da Amazônia impõe desafios relevantes para transporte de resíduos orgânicos.

Nesse contexto, o projeto avalia o desenvolvimento de plantas modulares de processamento, baseadas em sistemas compactos instalados em contêineres. A Figura 3, a seguir, ilustra o conceito da planta modular de biodigestão:

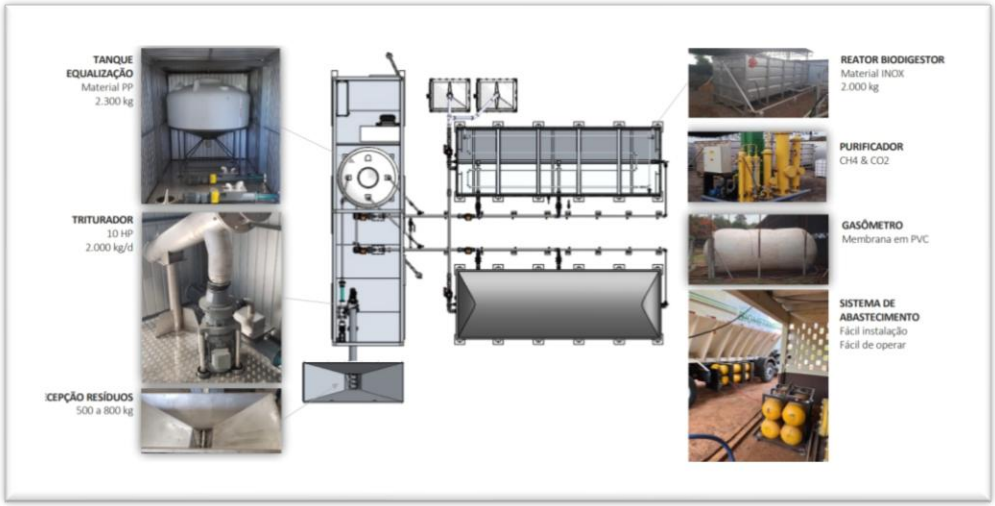


Figura 3 - Conceito de planta modular de biodigestão. Fonte: Modelo modular comercial (2026).

Esse conceito permite:

- processamento local dos resíduos
- redução de custos logísticos
- escalabilidade do modelo
- replicação em diferentes localidades da Amazônia.

2.8 Impactos ambientais

Entre os benefícios ambientais esperados destacam-se:

- redução do descarte inadequado de resíduos
- redução da carga orgânica em corpos hídricos
- mitigação de emissões de gases de efeito estufa.

2.9 Impactos socioeconômicos

O projeto também possui potencial para gerar impactos positivos no desenvolvimento regional, incluindo:

- geração de renda para comunidades ribeirinhas
- fortalecimento da piscicultura
- redução de custos de alimentação na aquicultura.

É importante destacar que a ração representa aproximadamente 70–80% dos custos de produção na piscicultura (FAO, 2022).

2.10 Contribuições do projeto para a bioeconomia amazônica

O projeto ARANDU contribui para três dimensões estratégicas do desenvolvimento sustentável da Amazônia:

- ✓ **Energia e descarbonização**
  Produção de biogás, biometano e biodiesel a partir de resíduos orgânicos.
- ✓ **Economia circular**
  Aproveitamento integral dos resíduos do processamento de pescado.
- ✓ **Desenvolvimento socioeconômico**
  Integração com cadeias produtivas locais e geração de oportunidades para comunidades ribeirinhas.

Essas contribuições estão alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas

3. Resultados

As atividades combinaram campanhas de campo, caracterização físico-química, ensaios laboratoriais de extração e digestão anaeróbia, desenvolvimento de uma plataforma territorial (Atlas ARANDU) e análise regulatória para monetização de atributos ambientais.

Coletas e procedimento amostral: foram realizadas coletas em frigoríficos de Manaus e região, cobrindo espécies relevantes (tambaqui, pirarucu e bagres) e frações variadas (partes moles, partes duras, gorduras e efluentes). A Figura 4 apresenta as etapas realizadas, onde as amostras de resíduos foram triadas, embaladas a vácuo e mantidas a −18 °C para preservar integridade e rastreabilidade; esse protocolo padronizado permitiu base experimental representativa para as análises subsequentes.

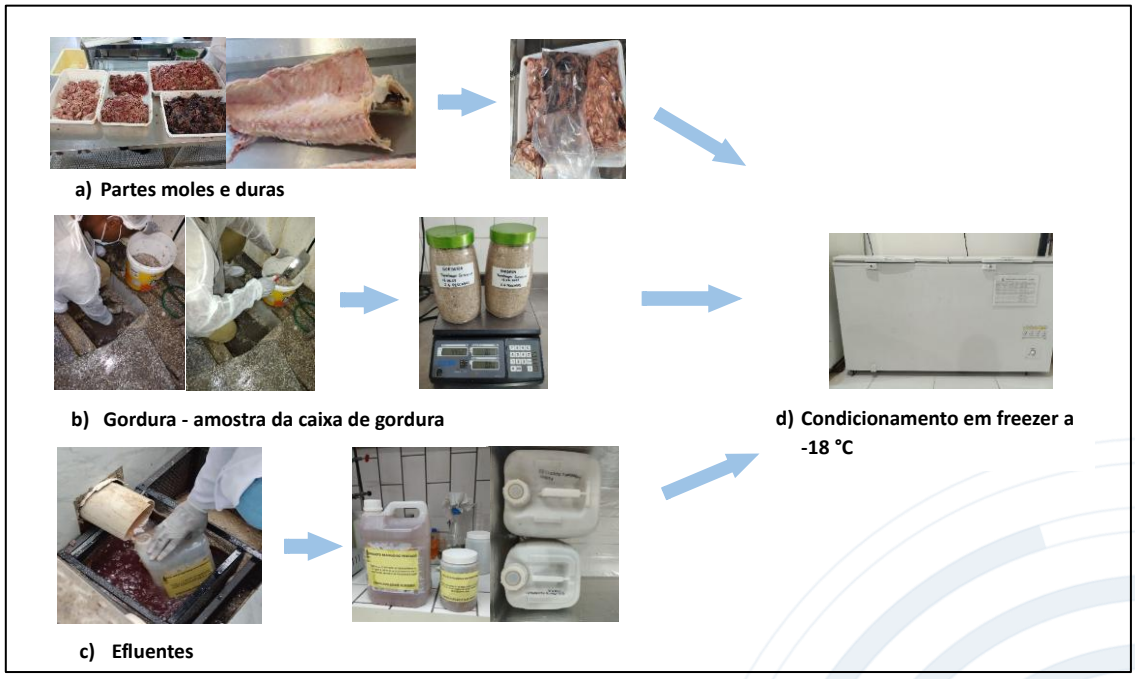


Figura 4 - Coleta e procedimento amostral dos resíduos. Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Extração e caracterização de lipídios: a recuperação de óleo foi testada por Soxhlet (referência para teor máximo), extração úmida e extração úmida pressurizada (autoclave: 120 °C, 60 min). Os resultados preliminares mostraram dependência da espécie, o tambaqui apresentou teor lipídico significativamente maior (por exemplo, fração mole ≈ 10,9 ± 1,1%) e melhor desempenho em extração úmida sob condições moderadas; já o pirarucu exibiu teores baixos (fração mole ≈ 1,8 ± 0,25%) e respondeu melhor à rota pressurizada, embora a recuperação ainda fique abaixo do teor total medido por Soxhlet.

A composição dos óleos, com predominância de ácidos palmítico, oleico e esteárico, indica compatibilidade com aplicações energéticas (biodiesel), sujeita a etapas convencionais de refino/degomagem.



Figura 5 - Ensaios de extração de lipídeos das biomassas. Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e cinética: os testes experimentais, realizado em reatores de bancada com medição de biogás corrigida para CNTP, validaram o aparato e as rotinas analíticas. Observou-se comportamento bifásico/diauxia em alguns ensaios, indicando acúmulo temporário de VFA que limitou inicialmente a metanogênese até que as sintrofias e arqueias se adaptassem. A modelagem com a equação de Gompertz modificada ajustou bem as curvas de produção, e o fechamento de balanço em DQO apresentou coerência com a produção observada. No planejamento fatorial (2^2) aplicado ao pirarucu/tambaqui, a concentração de sólidos (TS) teve efeito significativo na velocidade de produção (k), enquanto a alcalinidade (bicarbonato) impactou o rendimento acumulado em alguns casos; os modelos apresentaram alto ajuste (p. ex. R^2 ≈ 0,9867 para rendimento acumulado), subsidiando faixas operacionais a serem testadas posteriormente.

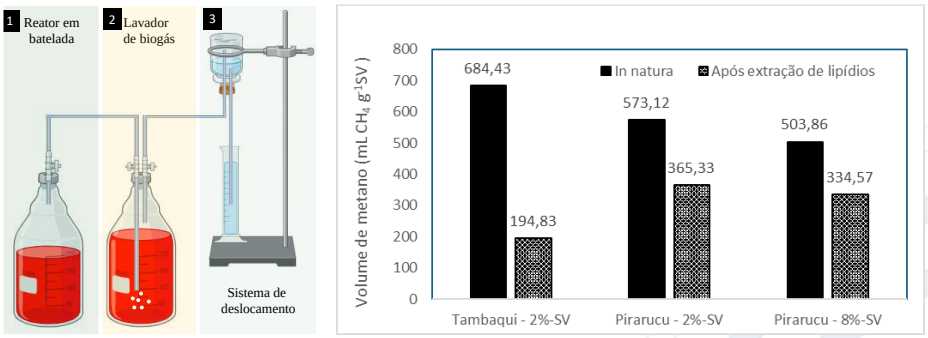


Figura 6 - (A) Sistema de avaliação de BMP; (B) rendimento de metano por SV adicionado. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Atlas ARANDU — estimativa territorial: a plataforma foi construída a partir de bases oficiais (IBGE, MPA, Embrapa, Peixe BR, ABIP) e utiliza fator médio de geração de resíduos (48,8% do peixe processado) combinado com BMP de literatura para estimativas iniciais. As análises espaciais apontam concentração do potencial energético em cadeias como tilápia e tambaqui, identificando regiões prioritárias para implantação de plantas de biogás e estratégias logísticas. O Atlas foi modelado em formatos CSV/GeoJSON para painéis interativos e será aprimorado com dados de BMP empíricos e variáveis econômicas/logísticas.

Aspectos regulatórios e monetização: o estudo identificou que o biometano e os triglicerídeos extraídos podem ser enquadrados em múltiplos mecanismos de monetização (CBIO — RenovaBio; CGOB — Lei do Combustível do Futuro; SBCE e mercados voluntários), com destaque para créditos associados à mitigação de metano e substituição de combustíveis fósseis. Contudo, a viabilização econômica requer sistemas robustos de MRV, rastreabilidade da matéria-prima e governança para evitar dupla contagem, ou seja, a criação de valor dependerá tanto de integridade institucional quanto do desempenho técnico.

4. Discussão

Os resultados consolidados até o momento reforçam a viabilidade técnica da valorização energética dos resíduos de pescado como fonte renovável estratégica para a Amazônia Legal, evidenciando potencial para integração entre produção de biogás/biometano com a produção de biodiesel, utilizando os triglicerídeos extraídos dos resíduos.

No que se refere à extração de lipídios, observou-se elevada variabilidade interespecífica, com o tambaqui apresentando teores significativamente superiores aos do pirarucu. Esse achado reforça a necessidade de segmentação tecnológica por espécie e fração processada, uma vez que a eficiência da extração úmida sob condições moderadas mostrou-se mais aderente a matrizes com maior teor lipídico livre, enquanto a rota pressurizada favoreceu matrizes de menor teor, ainda que com recuperação inferior ao teor total determinado por Soxhlet. Do ponto de vista industrial, tal diferença impacta diretamente o balanço energético do processo, a demanda térmica e a viabilidade econômica da produção de biodiesel, indicando que plantas multiproduto devem incorporar flexibilidade operacional e estratégias de blend de matérias-primas. A composição predominante em ácidos graxos saturados e monoinsaturados (C16:0, C18:0 e C18:1) sugere boa estabilidade oxidativa e perfil adequado para transesterificação convencional, embora a etapa de pré-tratamento (degomagem e neutralização) permaneça crítica para atender especificações regulatórias.

Nos ensaios de digestão anaeróbia, o comportamento bifásico observado na espécie tambaqui indica limitações cinéticas associadas ao acúmulo transitório de ácidos graxos voláteis, sugerindo possível desbalanceamento entre as comunidades acidogênicas e metanogênicas em condições iniciais de operação. A significância estatística da concentração de sólidos totais sobre a constante cinética (k) confirma que a difusão de substrato e a transferência de massa são parâmetros determinantes para a taxa de conversão, especialmente em resíduos com frações particuladas e lipídicas elevadas. Por outro lado, a influência da adição de bicarbonato foi mínima para ambas as espécies avaliadas, sem impacto expressivo no rendimento acumulado de metano dentro das faixas testadas.

Esse resultado sugere que os resíduos apresentam capacidade tampão intrínseca suficiente para sustentar a estabilidade do processo em condições controladas, reduzindo a dependência de insumos alcalinizantes externos. Do ponto de vista de implantação industrial, tal característica representa vantagem competitiva, pois implica menor custo operacional recorrente, simplificação do controle químico do reator e redução da complexidade de dosagem e monitoramento de alcalinidade. Em sistemas descentralizados ou de pequeno porte, essa menor necessidade de correção química pode ser decisiva para a viabilidade econômica.

O elevado coeficiente de determinação dos modelos ajustados ($R^2 \approx 0,99$) demonstra robustez preditiva da modelagem por Gompertz modificada, permitindo extrapolações controladas para escalonamento e definição de tempo de retenção hidráulica em sistemas contínuos.

A integração entre extração de óleo e digestão anaeróbia revela potencial sinergético: a remoção prévia de triglicerídeos pode mitigar inibições por ácidos graxos de cadeia longa no biodigestor, ao mesmo tempo em que a glicerina proveniente da transesterificação pode atuar como co-substrato em estratégias de codigestão, aumentando a produtividade volumétrica de metano. Essa lógica de cascata reforça o conceito de biorrefinaria, maximizando recuperação de carbono e eficiência exergética do sistema.

No plano territorial, o Atlas ARANDU constitui ferramenta estratégica para reduzir incertezas logísticas e identificar polos prioritários de implantação, ao combinar fatores médios de geração de resíduos com dados georreferenciados de produção aquícola. Entretanto, a utilização de valores de BMP provenientes da literatura impõe margem de incerteza às estimativas energéticas iniciais, destacando a importância da incorporação progressiva de dados empíricos regionais para refinar cenários e melhorar a acurácia das projeções.

Sob a ótica regulatória e de monetização, a possibilidade de enquadramento em instrumentos como CBIO, CGOB e mercados de carbono amplia o espectro de receitas potenciais e pode ser decisiva para superar barreiras de CAPEX em regiões com infraestrutura limitada. Contudo, a geração efetiva de valor dependerá da implementação de sistemas de monitoramento, reporte e verificação (MRV) tecnicamente robustos e auditáveis, bem como de arranjos institucionais que garantam adicionalidade e evitem dupla contagem de créditos ambientais.

5. Conclusão

O Projeto ARANDU consolida-se como uma iniciativa estratégica de pesquisa, desenvolvimento e inovação voltada à valorização energética e produtiva de resíduos da pesca na Amazônia Legal, posicionando-se como vetor estruturante de bioeconomia, descarbonização e desenvolvimento regional. Ao integrar diferentes rotas tecnológicas — produção de biogás e biometano, extração de triglicerídeos para biodiesel, geração de biofertilizantes e insumos para ração de piscicultura — o projeto estrutura um modelo de economia circular capaz de maximizar o aproveitamento energético, nutricional e econômico da biomassa residual.

A abordagem sistêmica proposta combina a extração de lipídios para produção de biodiesel com a biodigestão anaeróbia da fração remanescente, potencializada pela codigestão com glicerina, elevando a eficiência global do sistema e ampliando a geração de bioenergia. Essa integração tecnológica não apenas aumenta o rendimento energético, mas também viabiliza a produção de insumos agrícolas e aquícolas, fortalecendo cadeias produtivas locais, agregando valor à produção pesqueira e mitigando impactos ambientais associados ao descarte inadequado dos resíduos.

Outro diferencial reside na concepção de plantas modulares descentralizadas e transportáveis, adaptadas às condições logísticas e territoriais da Amazônia. Essa estratégia permite a instalação de unidades próximas aos pontos de geração dos resíduos, reduzindo custos logísticos, aumentando a eficiência operacional e ampliando a replicabilidade da solução em diferentes municípios da região, com potencial de escalabilidade regional.

Os resultados do Projeto Arandu demonstram que os resíduos da cadeia pesqueira amazônica apresentam potencial técnico consistente para integração em rotas de biorrefinaria, combinando extração de lipídios e digestão anaeróbia com desempenho cinético previsível e estabilidade operacional. A variabilidade interespecífica observada reforça a necessidade de estratégias tecnológicas adaptativas por espécie e fração processada, enquanto a baixa dependência de aditivos alcalinizantes representa vantagem econômica para implantação descentralizada.

Sendo assim, as estimativas preliminares indicam que os resíduos da pesca na Amazônia Legal podem representar fonte relevante de bioenergia descentralizada, contribuindo para a diversificação da matriz energética regional, para a segurança energética de comunidades isoladas e para a redução de emissões de gases de efeito estufa.

Adicionalmente, a elaboração do Atlas de Bioenergia dos Resíduos da Pesca ampliará a base técnica e informacional sobre o potencial energético dessa cadeia produtiva no Brasil, oferecendo subsídios qualificados para formulação de políticas públicas, planejamento energético regional e atração de investimentos em tecnologias de valorização de resíduos. Adicionalmente, o enquadramento em instrumentos de monetização ambiental amplia a atratividade do modelo, indicando que a viabilidade do sistema depende da articulação entre desempenho técnico, logística regional e governança regulatória. A etapa subsequente deverá concentrar-se na validação em escala piloto contínua e na consolidação de arranjos produtivos territorialmente estruturados, capazes de transformar o potencial energético identificado em solução economicamente sustentável e ambientalmente robusta

Dessa forma, o Projeto ARANDU transcende a dimensão tecnológica e configura-se como uma plataforma de inovação aplicada à bioeconomia amazônica, articulando geração de energia, produção agroindustrial e inclusão socioeconômica, em consonância com estratégias contemporâneas de desenvolvimento sustentável.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelo apoio financeiro ao projeto, por meio de recursos oriundos da Cláusula de Investimento em PD&I regulada pela ANP.

Referências

Acta Veterinaria Brasilica, v. 16, n. 3, agosto de 2022, p. 262–72. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.21708/avb.2022.16.3.10821.

Angelidaki, Irini, et al. “Biogas Upgrading and Utilization: Current Status and Perspectives”. Biotechnology Advances, v. 36, n. 2, 2018, p. 452–66. PubMed, https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.

Cavali, Jucilene, et al. “Proximal composition, fatty acid profile, omegas and lipid quality in the tambaqui (Colossoma macropomum Cuvier, 1818) (Serrasalmidae) in ‘flatted cut’”.

Fagerström, A., Al Seadi, T., Rasi, S., & Briseid, T. (2018). The role of anaerobic digestion and biogas in the circular economy (J. D. Murphy, Ed.). IEA Bioenergy Task 37.

Fundamentos de limnologia. Editora Interciência, 2011.

Geissdoerfer, Martin, et al. “The Circular Economy – A new sustainability paradigm?” Journal of Cleaner Production, v. 143, fevereiro de 2017, p. 757–68. ScienceDirect, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

Jannat, Md Abu Hanifa, e Seokhwan Hwang. “Bioaugmentation to Improve Anaerobic Digestion of Fish Waste: Feed-to-Microbes Ratio, Augmentation Dosage and Kinetic Analysis”. Bioresource Technology, v. 441, fevereiro de 2026, p. 133604. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133604.

Knothe, Gerhard, et al., organizadores. The Biodiesel Handbook. AOCS Publishing, 2005. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1201/9781439822357.

Mata-Alvarez, J., et al. “Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives”. Bioresource Technology, v. 74, n. 1, agosto de 2000, p. 3–16. ScienceDirect, https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00023-7.

Mgbechidinma, Chiamaka Linda, et al. “Fatty Acid Composition and Nutritional Analysis of Waste Crude Fish Oil Obtained by Optimized Milder Extraction Methods”. Environmental Engineering Research, v. 28, n. 2, março de 2022, p. 220034–0. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.4491/eer.2022.034.

Pradana, Yano Surya, et al. “A Review of Biodiesel Cold Flow Properties and Its Improvement Methods: Towards Sustainable Biodiesel Application”. Energies, v. 17, n. 18, setembro de 2024, p. 4543. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.3390/en17184543.

The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. FAO, 2022. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.4060/cc0461en.