BARREIRAS À IMPLEMENTAÇÃO DE BIODIGESTORES EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO

Lia Carolina Melo da Silva[(1)]
Especialista em Regulação da AGENERSA. Discente do Mestrado Profissional em Sistemas de Gestão com ênfase em Serviços Regulados UFF/ABAR
Gilson Brito Alves Lima [(2)]
Engenheiro Civil. Doutor em Engenharia de Produção COPPE/UFRJ. Professor Titular do Departamento de Engenharia de Produção da UFF.
Marco Antônio Vilela de Oliveira [(3)]
Engenheiro eletricista. Mestre em Sistemas Computacionais COPPE/UFRJ. Gerente da Câmara Técnica de Energia (CAENE) da AGENERSA. Professor convidado no Mestrado Profissional em Sistemas de Gestão com ênfase em Serviços Regulados UFF/ABAR.

Endereço[(1)]**:** Av. Presidente Wilson, nº 231 Edifício: Palácio Austregésilo de Athayde / 10º e 11º andares - Centro - Rio de Janeiro - RJ - CEP 20030-021 Tels.:(21) 2332-6469 - e-mail: lmelo@agenersa.rj.gov.br.

RESUMO

Este artigo analisa as barreiras técnicas, operacionais, econômicas e regulatórias à implementação de biodigestores em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. A metodologia baseia-se em análise de conteúdo quali-quantitativa, estruturada a partir de revisão bibliográfica e documental de marcos normativos e dados setoriais. Os resultados indicam que as macro-ETEs metropolitanas apresentam elevado potencial de recuperação energética associado ao fator escala. Entretanto, a valorização do biogás enfrenta um paradoxo operacional: de um lado, o alto custo do transporte de lodo para aterros; de outro, os riscos de inibição por poliacrilamida (PAM), que pode gerar uma perda de desempenho de até 91,6% na biodigestão anaeróbia, além de restrições associadas ao teor de zinco para enquadramento do biossólido como Classe A. Adicionalmente, assimetrias no mercado elétrico e o elevado prêmio de risco organizacional desestimulam investimentos privados. Conclui-se que a conversão dessas infraestruturas em biorrefinarias requer a articulação entre os incentivos previstos nas Leis Federais nº 14.993/2024 e nº 15.269/2025 e a regulação estadual da AGENERSA, de modo a consolidar bases jurídicas e técnicas para a descarbonização do setor.

PALAVRAS-CHAVE: Biodigestão anaeróbia; ETEs; Regulação energética.

INTRODUÇÃO

A transição energética e o enfrentamento das mudanças climáticas globais impõem uma revisão profunda no papel das infraestruturas de saneamento básico. Nesse novo panorama, sistemas tradicionalmente caracterizados pelo elevado consumo de insumos e eletricidade passam a ser analisados como unidades descentralizadas de geração de energia renovável e de recuperação de materiais (BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023; LUKOŠEVIČIUS; RIMKEVIČIUS; PABARČIUS, 2025; SONG et al., 2025). As Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) são infraestruturas intensivas em energia, respondendo por uma parcela estimada entre 1% e 3% da produção global de eletricidade (HVALA et al., 2025; PFLUGER et al., 2019; SHEN et al., 2015). A busca por eficiência e pela conversão dessas instalações em biorrefinarias decorre diretamente de seus impactos sobre os custos operacionais, uma vez que a energia elétrica pode representar entre 25% e 45% das despesas totais de uma planta de tratamento (BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023; SONG et al., 2025). Paralelamente, a descarbonização do setor mostra-se urgente, visto que as emissões indiretas associadas ao consumo de energia da rede se somam às emissões diretas de gases de efeito estufa (GEE) geradas em tanques abertos — como o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), os quais podem corresponder a até 7% e 10% das emissões antropogênicas globais desses gases, respectivamente (LUKOŠEVIČIUS; RIMKEVIČIUS; PABARČIUS, 2025; SONG et al., 2025).

No Estado do Rio de Janeiro, a eficiência energética assume relevância estratégica em virtude das recentes transformações estruturais do setor. A reorganização do saneamento na Região Metropolitana, consolidada a partir do leilão dos blocos da Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE), concentrou ativos operacionais de grande porte sob a gestão da iniciativa privada, destacando-se a atuação da concessionária Águas do Rio (ÁGUAS DO RIO, 2022). Essa infraestrutura reúne plantas com elevadas vazões de projeto: a ETE Alegria opera atualmente com capacidade de 2.500 l/s, com expansão prevista para 3.600 l/s em 2026 e 5.000 l/s até 2032; as ETEs Sarapuí e Pavuna possuem capacidade nominal de 1.500 l/s cada, sendo a capacidade final de projeto da ETE Sarapuí estimada em 3.000 l/s (ÁGUAS DO RIO, 2022; GOV/RJ, 2022; PREFEITURA DE DUQUE DE CAXIAS, 2017). Como essas macrounidades utilizam majoritariamente o processo de lodos ativados, uma rota aeróbia que exige intensa injeção de oxigênio na etapa de aeração, o consumo de eletricidade é expressivo (BRASIL, 2019; HVALA et al., 2025; PFLUGER et al., 2019). Em termos econômicos, estima-se que as tarifas cobradas pelas distribuidoras Light e Enel representem entre 25% e 45% do custo operacional total (*Operational Expenditure* - OPEX) dessas concessões (FIRJAN, 2026; SCHMITKE; LEME, 2020).

A elevada participação da energia elétrica na matriz de custos, associada à escala de vazão dessas macro-ETEs, reforça a viabilidade da biodigestão anaeróbia como alternativa para redução de despesas e mitigação da dependência da rede externa (FIRJAN, 2026; SCHMITKE; LEME, 2020). O esgoto afluente carrega consigo uma quantidade expressiva de energia química armazenada em suas ligações orgânicas. Estima-se que essa carga orgânica, mensurada pela Demanda Química de Oxigênio (DQO), concentre de cinco a dez vezes mais energia do que o montante requerido para o seu próprio tratamento convencional (SHEN et al., 2015; SONG et al., 2025). Sob a lógica da economia circular, a biodigestão anaeróbia promove a degradação dessa matéria orgânica em ambiente hermético através das etapas sucessivas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (DEL RÍO-GAMERO et al., 2020; JATURONGKACHOCK; NOOPHAN; SINBUATHONG, 2025; SONG et al., 2025). Quando integrada a sistemas de cogeração de calor e energia (*Combined Heat and Power* - CHP), essa rota tecnológica permite a produção simultânea de eletricidade para autoconsumo e de energia térmica para a manutenção estável dos reatores (SONG et al., 2025). Adicionalmente, o processo reduz expressivamente a massa final do lodo e possibilita o aproveitamento do digestato como fertilizante agrícola, desde que atendidos os critérios restritivos da Resolução CONAMA nº 498/2020 para o enquadramento do resíduo como biossólido Classe A (BARROS FILHO et al., 2026; BRASIL, 2020; KLEYBÖCKER et al., 2024).

Apesar deste cenário promissor, a recuperação energética no território fluminense ainda se depara com graves limitações operacionais. As principais unidades da Região Metropolitana mantêm suas operações focadas na remoção aeróbia tradicional de carga orgânica, seguida apenas por etapas de adensamento, desidratação mecânica e transporte rodoviário do lodo para disposição final em aterros sanitários, como o Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) Santa Rosa, localizado em Seropédica (BARROS FILHO et al., 2026). Esse modelo linear agrava o balanço de emissões operacionais decorrentes do transporte rodoviário e descarta um recurso biogênico de alto valor, cujo poder calorífico relevante é estimado entre 10 e 19 MJ/kg (BARROS FILHO et al., 2026; SONG et al., 2025).

Diante desse manifesto descompasso entre o potencial técnico-energético e a prática operacional vigente, e considerando a necessidade premente de mecanismos regulatórios e de governança capazes de induzir a autossuficiência do setor (SONG et al., 2025), delineia-se o problema central desta pesquisa: quais fatores técnicos, ambientais, econômicos e institucionais limitam ou viabilizam a transição energética dessas infraestruturas de saneamento na Região Metropolitana do Rio de Janeiro? Para responder a essa questão, este artigo tem como objetivo examinar o panorama regulatório, técnico e operacional das macro-ETEs metropolitanas sob a perspectiva da valorização de subprodutos, identificando as barreiras críticas e as oportunidades associadas ao novo arcabouço legal para a consolidação da bioeconomia circular no estado.

METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa exploratória e descritiva de abordagem mista (quali-quantitativa), fundamentada em procedimentos de revisão da literatura e pesquisa documental. A opção pela abordagem mista justifica-se pela necessidade de alinhar a interpretação do cenário regulatório e institucional à parametrização de indicadores operacionais numéricos e coeficientes estatísticos secundários extraídos da literatura científica recente.

O levantamento de dados bibliográficos foi realizado por meio da busca por artigos científicos indexados nas bases de dados Scopus, *Web of Science* e Google Acadêmico, compreendendo um recorte temporal abrangente entre os anos de 2015 e 2026. Para a seleção desse material, aplicou-se um protocolo adaptado da metodologia de Tricco et al. (2018), baseada nas diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Complementarmente, o *corpus* documental foi constituído por relatórios institucionais das concessionárias de saneamento, relatórios técnicos setoriais e o arcabouço normativo vigente nos âmbitos federal e estadual (leis, decretos e resoluções de agências reguladoras).

O material selecionado foi submetido à Análise de Conteúdo, estruturada a partir de um processo de categorização teórica e empírica. Para dar conta da dimensão quali-quantitativa da investigação, os dados foram organizados e analisados sob a ótica de quatro categorias analíticas fundamentais:

- **Potencial energético e escala operacional das estações**

Foco na correlação entre as vazões de projeto das macrounidades e a capacidade teórica de produção e aproveitamento de biogás.

- **Benefícios ambientais e economia circular**

Investigação dos fluxos de reaproveitamento do digestato, mitigação de gases de efeito estufa e restrições regulatórias à valorização agrícola do biossólido.

- **Barreiras técnicas, econômicas e regulatórias**

Mapeamento dos custos de capital (CAPEX), despesas operacionais (OPEX), estrutura tarifária da rede de distribuição e restrições cinéticas do processo de digestão anaeróbia.

- **Fatores humanos e gestão de segurança de processo**

Avaliação dos riscos industriais e operacionais, cultura de manutenção preditiva e o impacto da confiabilidade humana na sustentabilidade financeira dos ativos energéticos.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Potencial energético e escala operacional das macro-ETEs fluminenses

O potencial energético das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) metropolitanas decorre do conteúdo de energia química, térmica e potencial presente no lodo residual, estimado entre cinco e dez vezes superior ao montante elétrico requerido para o tratamento convencional (SONG et al., 2025). Aproximadamente 80% desse potencial é térmico, 20% é químico, associado à oxidação da Demanda Química de Oxigênio (DQO), e menos de 1% decorre do potencial hidráulico do efluente (SONG et al., 2025). Com poder calorífico inferior estimado entre 10 e 19 MJ/kg, o lodo seco pode ser utilizado como combustível biogênico em processos de secagem térmica e incineração (BARROS FILHO et al., 2026). A principal rota de recuperação dessa energia é a biodigestão anaeróbia, processo baseado na decomposição biológica da matéria orgânica em ambiente sem oxigênio (JATURONGKACHOCK; NOOPHAN; SINBUATHONG, 2025). Esse processo compreende quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, nas quais compostos orgânicos complexos são convertidos, sucessivamente, em moléculas simples, ácidos graxos voláteis, precursores do metano e, por fim, metano (CH_4) (SONG et al., 2025).

A digestão anaeróbia opera, em geral, nas faixas mesofílica (30–37 °C) e termofílica (50–55 °C). A primeira é mais utilizada em larga escala, enquanto a segunda apresenta maiores taxas de carregamento e de destruição de patógenos, embora requeira maior demanda de aquecimento e apresente maior sensibilidade a inibidores (BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023; DEL RÍO-GAMERO et al., 2020). O processo gera dois produtos principais: biogás e digestato. O biogás contém predominantemente metano (50-70%) e dióxido de carbono (30-50%), além de contaminantes como sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3) e umidade. O teor de metano determina seu poder calorífico, que varia entre 16 e 27 MJ/m³, conforme a pureza do gás (SZELĄG-SIKORA et al., 2025). A recuperação energética por meio de sistemas de cogeração de calor e energia (CHP) permite a produção simultânea de eletricidade e calor, enquanto o refino em biometano viabiliza seu uso como combustível veicular ou sua injeção na rede de gás natural (ABOURIDA et al., 2025; PFLUGER et al., 2019). O digestato, por sua vez, corresponde ao resíduo estabilizado e rico em nutrientes que, após condicionamento e desidratação, pode ser convertido em biossólido para substituição parcial de fertilizantes químicos. No Brasil, a classificação como Classe A exige o atendimento a critérios de inativação de patógenos e teor mínimo de 70% de sólidos totais (BARROS FILHO et al., 2026; BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023). Entre os efeitos associados a essa rota destacam-se a redução da massa de lodo destinada à disposição final, a mitigação de

emissões em aterros e a diminuição da pegada de carbono operacional das ETEs (BARROS FILHO et al., 2026; BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023; SHEN et al., 2015).

No Estado do Rio de Janeiro, a viabilidade técnica e o balanço energético dessa conversão são favorecidos pelo fator escala. A infraestrutura da Região Metropolitana, atualmente operada pela concessionária Águas do Rio após o leilão da Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE), concentra plantas de grande porte, como as ETEs Alegria, Sarapuí e Pavuna (ÁGUAS DO RIO, 2022; GOV/RJ, 2022; PREFEITURA DE DUQUE DE CAXIAS, 2017), cujos horizontes de vazões atuais e de projeto estão detalhados na Tabela 1. A elevada concentração de carga orgânica associada a essas vazões aumenta a taxa potencial de produção de metano e reduz o consumo energético unitário por quilograma de poluente removido (SONG et al., 2025). Quando integrados a sistemas CHP, os biodigestores podem fornecer eletricidade e calor para a própria planta; no contexto nacional, o uso combinado de biogás e lodo seco em secadores térmicos mostrou capacidade de suprir até 97% da demanda térmica operacional (BARROS FILHO et al., 2026; SONG et al., 2025; SZELĄG-SIKORA et al., 2025). Além do biogás, o potencial energético metropolitano pode ser ampliado por tecnologias complementares, como microturbinas hidráulicas no fluxo do efluente e recuperação de calor do esgoto bruto por bombas de calor (DEL RÍO-GAMERO et al., 2020; SONG et al., 2025).

Tabela 1 – Horizonte de vazões das macro-ETEs da Região Metropolitana do Rio de Janeiro

Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)	Vazão Atual / Nominal	Vazão de Projeto / Expansão	Fonte dos Dados
ETE Alegria	2.500 l/s	3.600 l/s (2026) / 5.000 l/s (2032)	Águas do Rio (2022); GOV/RJ (2022)
ETE Sarapuí	1.500 l/s	3.000 l/s (Vazão final)	Águas do Rio (2022); GOV/RJ (2022)
ETE Pavuna	1.500 l/s	1.500 l/s (Capacidade nominal)	Águas do Rio (2022); GOV/RJ (2022)

Fonte: elaboração própria com base em dados bibliográficos.

Estudos internacionais relatam resultados consistentes com o modelo de biorrefinaria em escala. Na Dinamarca, a integração do biogás com outras fontes renováveis permitiu a operação de plantas com balanço energético positivo superior a 150%, com exportação de excedentes à rede (MARAMI et al., 2022). Nos Estados Unidos, a unidade da EBMUD, em Oakland, alcançou 126% de sua demanda elétrica e obteve receita anual com venda de excedentes e serviços de co-digestão, enquanto a ETE Blue Plains, em Washington, registrou redução expressiva da pegada de carbono após a adoção de hidrólise térmica (SHEN et al., 2015). Na Alemanha, a ETE de Brunswick elevou a produção de metano em 18% e ampliou a recuperação de fósforo e nitrogênio com a configuração de digestão associada à hidrólise térmica sob pressão (KLEYBÖCKER et al., 2024). Na Espanha, simulações na ETE de Jinamar indicaram que a combinação de biogás, energia eólica, fotovoltaica e microturbinas hidráulicas pode superar o consumo anual da planta e reduzir emissões de gases de efeito estufa (DEL RÍO-GAMERO et al., 2020). Entre as estratégias complementares, destaca-se a co-digestão do lodo com resíduos sólidos urbanos, restos de alimentos e óleos e gorduras, que pode melhorar a relação carbono/nitrogênio, elevar a produção de metano e reduzir déficits energéticos do sistema (BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023; MARAMI et al., 2022; SHEN et al., 2015).

Apesar do potencial das ETEs metropolitanas, a transição para modelos de maior eficiência energética encontra limitações técnicas e operacionais que exigem governança adequada. A instabilidade operacional pode decorrer da baixa biodegradabilidade de determinados lodos ou de variações bruscas na carga de alimentação, com consequente acidificação do sistema por acúmulo de AGVs. Além disso, o processo é sensível à presença de metais pesados e a altas concentrações de amônia (SHEN et al., 2015). Estudos recentes também apontam os efeitos da poliacrilamida (PAM), polímero sintético amplamente utilizado no adensamento e na desidratação do lodo (JATURONGKACHOCK; NOOPHAN; SINBUATHONG, 2025). Em concentrações superiores a 1,35 g/kg de lodo seco, a PAM inibe a atividade microbiana, acidifica o sistema e reduz o rendimento de metano; sua degradação pode ainda liberar acrilamida, substância neurotóxica e potencialmente carcinogênica (JATURONGKACHOCK; NOOPHAN; SINBUATHONG, 2025). No campo da segurança, as instalações de biogás operam com gases inflamáveis e tóxicos sob pressão, o que envolve riscos de vazamentos, incêndios, explosões e intoxicações por H_2S. Evidências indicam que entre 70% e 80% dos incidentes industriais no setor estão associados a fatores humanos e organizacionais (HOFs), como falhas

de manutenção preventiva, treinamento insuficiente e fragilidades de liderança, o que reforça a necessidade de um Sistema de Gestão de Segurança de Processo (PSMS) robusto (ABOURIDA et al., 2025).

Do ponto de vista do investimento, a ausência de manutenção preditiva reduz a efetividade dos aportes em capital fixo (CAPEX) e eleva o prêmio de risco dos projetos. No contexto fluminense, esse fator adquire maior relevância em razão da localização das macro-ETEs Alegria, Sarapuí e Pavuna em áreas densamente povoadas da Zona Norte do Rio de Janeiro e da Baixada Fluminense. Nesses casos, eventos de perda de contenção ou explosão podem extrapolar a escala operacional e produzir impactos socioambientais significativos. As implicações financeiras, jurídicas e reputacionais associadas a esse cenário reforçam a necessidade de transição de uma cultura de manutenção reativa para uma gestão preditiva, com efeitos diretos sobre a governança e a regulação do setor.

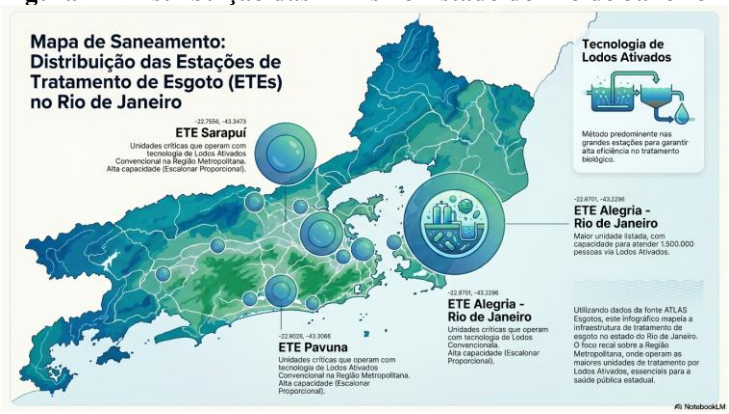
Benefícios Ambientais e Economia Circular

Os benefícios ambientais da biodigestão anaeróbia decorrem da integração entre eficiência energética, mitigação de emissões e recuperação de recursos. No setor de saneamento, a conversão das ETEs em biorrefinarias permite reduzir a dependência da eletricidade da rede, substituir combustíveis fósseis por biogás em sistemas de cogeração e valorizar subprodutos como nutrientes e água de reuso (BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023; DEL RÍO-GAMERO et al., 2020; LUKOŠEVIČIUS; RIMKEVIČIUS; PABARČIUS, 2025; SONG et al., 2025). No contexto fluminense, essa transição é particularmente relevante porque as emissões indiretas associadas ao consumo de energia elétrica representam parcela expressiva da pegada de carbono das ETEs, ao mesmo tempo em que os custos energéticos pressionam fortemente o OPEX operacional.

Nesse sentido, a recuperação de recursos assume papel estratégico. Além da geração de eletricidade e calor para autoconsumo, a digestão anaeróbia estabiliza o lodo e favorece a reciclagem de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, reduzindo a necessidade de fertilizantes sintéticos e as emissões associadas à sua produção industrial. Assim, a economia circular deixa de ser apenas um princípio conceitual e passa a operar como mecanismo concreto de descarbonização, redução de custos e valorização material dos resíduos do esgotamento sanitário (BARROS FILHO et al., 2026; KLEYBÖCKER et al., 2024).

O saneamento no Brasil apresenta intensidade energética média inferior à observada em países europeus, com cerca de 0,24 kWh/m³, em comparação com 1,18 kWh/m³ na União Europeia e 1,35 kWh/m³ na Dinamarca (SONG et al., 2025). Essa diferença decorre, em parte, de padrões de lançamento de efluentes menos restritivos. Contudo, a tendência é de aumento do consumo de eletricidade à medida que novas etapas de tratamento e remoção de nutrientes sejam exigidas para o cumprimento de metas de qualidade ambiental (BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023). No plano regulatório, a economia circular no setor encontra respaldo na Resolução CONAMA nº 498/2020, que estabelece critérios de tempo, temperatura e eliminação de patógenos para a transformação do lodo em biossólidos Classe A aptos para aplicação agrícola irrestrita (BARROS FILHO et al., 2026; BRASIL, 2020).

Figura 1 – Distribuição das ETEs no Estado do Rio de Janeiro



Fonte: elaboração própria com apoio do *NotebookLM* (GOOGLE, 2026), a partir de dados do Atlas da ANA (BRASIL, 2019).

No Estado do Rio de Janeiro, o potencial de recuperação de recursos é ampliado pela concentração de grandes infraestruturas na Região Metropolitana. Unidades como Alegria, Sarapuí e Pavuna apresentam escala compatível com sistemas integrados de biodigestão e cogeração (Figura 1). Em plantas de maior porte, o consumo energético unitário por carga orgânica removida tende a ser menor, o que favorece o aproveitamento econômico do biogás (SONG et al., 2025). A implantação da biodigestão pode reduzir emissões operacionais ao promover a queima controlada e o refino do metano em sistemas CHP ou em rotas de biometano, diminuindo emissões fugitivas e substituindo parte da energia adquirida da rede (BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023). Sob a perspectiva logística, a digestão anaeróbia pode reduzir substancialmente a massa do lodo desidratado, com efeitos sobre custos de transporte e destinação final. O digestato estabilizado também pode atuar como insumo para a bioeconomia, em razão do teor de nutrientes como nitrogênio, fósforo, enxofre, cálcio e magnésio (BARROS FILHO et al., 2026; KLEYBÖCKER et al., 2024).

Apesar desse potencial, a adoção da recuperação energética no Rio de Janeiro ainda é limitada, e as principais plantas permanecem voltadas à remoção de carga orgânica por processos convencionais (BRASIL, 2019), o que caracteriza o chamado "Paradoxo Fluminense". Embora o esgoto concentre energia aproveitável, a prática predominante consiste no adensamento e transporte do lodo para disposição final no Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) Santa Rosa, em Seropédica. Esse modelo linear reduz o aproveitamento de um recurso com poder calorífico entre 10 e 19 MJ/kg e amplia a pegada de carbono associada ao transporte (BARROS FILHO et al., 2026; SONG et al., 2025). Entre os fatores explicativos estão os custos de capital para implantação de biodigestores e sistemas de purificação de biogás, estimados entre 0,09 e 0,16 €/kg de lodo, que frequentemente comprometem a atratividade econômica dos projetos na ausência de subsídios ou mecanismos específicos de financiamento (BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023; PFLUGER et al., 2019; SHEN et al., 2015).

A essas limitações somam-se barreiras regulatórias e institucionais, como a ausência de modelos tarifários suficientemente atrativos para a comercialização do excedente energético e a escassez de mão de obra especializada para operar sistemas de biodigestão (PFLUGER et al., 2019; SHEN et al., 2015). Em termos econômicos, o desafio consiste em alcançar um Custo Nivelado de Energia (LCOE) competitivo em relação à rede e ao Mercado Livre. O biogás também enfrenta assimetrias concorrenciais em relação a fontes eólica e solar, historicamente beneficiadas por descontos nas tarifas de uso da rede (TUSD/TUST). Embora a Lei Federal nº 9.427/1996, atualizada pela Lei nº 15.269/2025 (BRASIL, 2025), amplie as competências regulatórias da ANEEL sobre sistemas de armazenamento de energia conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), o biogás de saneamento ainda carece de incentivos capazes de reduzir seus encargos de produção. Além disso, falhas de gestão organizacional elevam o prêmio de risco para investidores (ABOURIDA et al., 2025; CASTRO et al., 2022). O arcabouço normativo recente, entretanto, tende a reduzir parte dessa incerteza: a Lei nº 14.993/2024 (BRASIL, 2024) instituiu o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano e criou o Certificado de Garantia de Origem de Biometano (CGOB); no plano estadual, a Lei nº 6.361/2012 (RIO DE JANEIRO, 2012) estabelece a Política Estadual de Gás Natural Renovável (GNR), com incentivos ao aproveitamento do biogás oriundo da biodigestão de resíduos orgânicos.

No plano operacional, destacam-se limitações técnicas que afetam o desempenho dos sistemas. O uso extensivo de poliacrilamida (PAM) na desidratação mecânica do lodo pode inibir a atividade microbiológica na etapa anaeróbia, reduzir a produção de metano e acidificar o sistema digestor (JATURONGKACHOCK; NOOPHAN; SINBUATHONG, 2025). Outro fator relevante é a contaminação do esgoto por metais pesados, com destaque para o zinco (Zn). A presença de cargas industriais irregulares nas bacias de Sarapuí e Pavuna, associada ao uso de insumos químicos contaminados, pode elevar os teores desse metal acima do limite de 2,8 g/kg de lodo seco estabelecido pela Resolução CONAMA nº 498/2020, rebaixando o resíduo para a Classe B e restringindo seu reuso agrícola (BARROS FILHO et al., 2026). Além disso, a adoção de sensores industriais e sistemas de inteligência artificial para controle dinâmico depende da confiabilidade da infraestrutura física, uma vez que o ambiente operacional das ETEs é corrosivo e úmido, o que compromete o desempenho dos dispositivos (ABOURIDA et al., 2025). Assim, a conversão das ETEs fluminenses em biorrefinarias requer o fortalecimento da governança local e a consolidação de mecanismos regulatórios que ampliem a segurança jurídica e operacional da transição energética.

Barreiras Técnicas, Econômicas e Regulatórias

Embora o potencial energético das ETEs metropolitanas seja elevado, sua materialização depende da superação de entraves técnicos, econômicos e institucionais que ainda limitam a adoção de sistemas de recuperação energética no Rio de Janeiro. No cenário atual, predomina um modelo operacional linear, no qual o lodo é adensado, desidratado e transportado para disposição final, em vez de ser aproveitado como insumo para geração de biogás e valorização de coprodutos. Esse descompasso entre potencial e prática sintetiza o chamado "Paradoxo Fluminense" e evidencia que a transição para biorrefinarias requer condições operacionais estáveis, segurança regulatória e arranjos econômicos viáveis.

Do ponto de vista biotecnológico, uma restrição crítica decorre do uso de poliacrilamida (PAM) no adensamento e na desidratação mecânica do lodo. Concentrações residuais elevadas desse polímero podem inibir de forma significativa a atividade microbiológica das arqueias metanogênicas e reduzir o rendimento da digestão anaeróbia (JATURONGKACHOCK; NOOPHAN; SINBUATHONG, 2025). Enquanto o rendimento teórico esperado é de 350 L/kg de DQO, sistemas com presença de PAM podem registrar valores em torno de 29,45 L/kg de DQO, o que compromete o desempenho de futuros biodigestores no cenário metropolitano.

Outro condicionante técnico e regulatório refere-se ao teor de metais pesados no digestato. O recebimento de cargas industriais irregulares nas bacias de Sarapuí e Pavuna, somado ao uso de insumos químicos de baixa pureza no tratamento físico-químico, pode elevar os teores de zinco (Zn) acima do limite de 2,8 g/kg de lodo seco estabelecido pela Resolução CONAMA nº 498/2020, inviabilizando a classificação do resíduo como biossólido Classe A (BARROS FILHO et al., 2026; BRASIL, 2020). Embora sensores industriais e sistemas de inteligência artificial possam contribuir para o monitoramento e o controle operacional, esses dispositivos apresentam menor confiabilidade em ambientes corrosivos e úmidos de ETEs, o que exige estabilização prévia da infraestrutura física e de dados (ABOURIDA et al., 2025).

No âmbito da gestão, avaliações baseadas em Fatores Humanos e Organizacionais (HOFs) indicam assimetria entre os investimentos em ativos de engenharia e a eficiência de sua operação (ABOURIDA et al., 2025). Evidências qualitativas mostram que parte relevante das plantas opera sob cultura de segurança predominantemente reativa, atuando apenas após a ocorrência de falhas mecânicas ou incidentes operacionais. A insuficiência dos regimes de manutenção e limitações de liderança organizacional reduzem a efetividade das salvaguardas técnicas instaladas; a ausência de manutenção preditiva, em particular, está fortemente associada a vazamentos de gás e incidentes operacionais críticos (r = 0,857) (ABOURIDA et al., 2025). Esse quadro eleva a probabilidade de paradas não planejadas e de emissões fugitivas, com efeitos sobre o prêmio de risco exigido pelo mercado.

- **Custos de capital (CAPEX):** O investimento financeiro para implementar infraestrutura de biodigestão e purificação de biogás é extremamente elevado, variando entre 0,09 e 0,16 €/kg de lodo. Sem mecanismos de subsídio ou financiamento de longo prazo, o Valor Presente Líquido (VPL) desses projetos torna-se desencorajador para os novos operadores privados (BLANCO; MARTÍN; VEJA, 2023).
- **Barreiras regulatórias e institucionais:** A ausência de incentivos tarifários que viabilizem uma modelagem de autoprodução vantajosa frente às tarifas da Light e da Enel desestimula a destinação do biogás para autoconsumo nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). O principal desafio econômico reside em alcançar um Custo Nivelado de Energia (LCOE) competitivo com o suprimento da rede e atrativo frente à liquidez do Mercado Livre. No cenário macroeconômico nacional, o biogás enfrenta uma assimetria competitiva severa: os investimentos em autoprodução têm migrado majoritariamente para projetos eólicos e solares que, por meio de arranjos societários criativos e descontos nas tarifas de uso da rede (TUSD/TUST), reduzem drasticamente seus encargos. Como essa sofisticação regulatória e o risco de crédito diferenciado são restritos a grandes players, o biogás

de saneamento, onerado pela falta de políticas setoriais integradas e por uma estrutura de encargos que encarece a produção nacional, perde espaço na atração de capital. Ademais, essa complexidade do arranjo concorrencial, somada à gestão organizacional reativa observada em plantas de biogás, na qual falhas de liderança comprometem salvaguardas técnicas, eleva significativamente o *risk premium* para investidores no Rio de Janeiro (Abourida et al., 2025; Castro et al., 2022).

- **Incerteza no mercado de bioprodutos:** Bioprodutos de valor agregado, como a proteína microbiana obtida do efluente, enfrentam forte assimetria competitiva frente a commodities de baixo custo, exigindo incentivos governamentais para que a bioeconomia circular fluminense se torne viável frente ao mercado tradicional (BLANCO; MARTÍN; VEJA, 2023).
- **Dificuldades operacionais:** O uso extensivo de poliacrilamida (PAM) para facilitar a desidratação do lodo nas ETEs metropolitanas constitui um obstáculo químico relevante. Estudos recentes indicam que a PAM pode provocar um gap de performance de 91,6% na produção de metano, inibindo a atividade microbiológica e acidificando o sistema (JATURONGKACHOCK; NOOPHAN; SINBUATHONG, 2025).

A viabilidade financeira dos projetos está diretamente relacionada ao arranjo comercial e ao modelo tecnológico adotado. Conforme sintetizado no comparativo da Tabela 2, alternativas orientadas ao autoconsumo e à gestão inteligente da demanda interna tendem a apresentar amortização mais rápida, enquanto soluções de maior complexidade tecnológica, como o armazenamento em hidrogênio, permanecem economicamente desfavoráveis no cenário atual (DEL RÍO-GAMERO et al., 2020).

Tabela 2 – Comparativo de tempo de amortização (*payback*)

Modelo de Investimento	Prazo Estimado de Retorno	Observações Técnicas
Otimização e Controle Dinâmico	Menos de 2 anos	Focado na gestão inteligente para equilibrar a geração interna com a demanda da planta, reduzindo drasticamente a compra de energia da rede.
Integração de Renováveis (Mix)	6 a 7 anos	Sistemas complexos que integram biogás, energia solar fotovoltaica e eólica para buscar a autossuficiência energética operacional.
Venda de Excedente para a Rede	8 a 9 anos	Cenários que envolvem a infraestrutura necessária para reinjeção e comercialização da sobra de energia no mercado elétrico.
Armazenamento em Hidrogênio	Inviável (> 25 anos)	Atualmente não é amortizado dentro da vida útil da planta (25 anos) devido aos altíssimos custos de capital (CAPEX) em eletrolisadores e células a combustível.

Fonte: elaboração própria com base em dados bibliográficos (DEL RÍO-GAMERO et al., 2020; HVALA et al., 2025).

Além dos horizontes de retorno financeiro, a consolidação dessas rotas tecnológicas no Rio de Janeiro depende da superação de vulnerabilidades estruturais específicas da operação regional. A Tabela 3 apresenta a síntese dos principais fatores facilitadores, condicionantes e inibidores identificados nesta análise.

A implementação de projetos de biogás em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) no Rio de Janeiro apresenta um cenário de contrastes, onde o principal motor de Viabilidade Alta é o forte potencial de escala. Grandes unidades como as ETEs Alegria, Sarapuí e Pavuna oferecem alta vazão e concentração de carga orgânica, atuando como facilitadoras para a recuperação energética. Contudo, para que esse potencial seja aproveitado, é preciso superar condicionantes de Viabilidade Moderada, que incluem a necessidade de estabilizar a infraestrutura de dados para sensores e monitoramento por IA — vulneráveis ao ambiente corrosivo das estações — e o controle rigoroso de contaminantes, visto que níveis de zinco acima de 2,8 g/kg inviabilizam o uso agrícola do biossólido.

Os maiores desafios, contudo, concentram-se nos inibidores críticos classificados com Viabilidade Baixa, que ameaçam a sustentabilidade dos projetos. No campo operacional e de gestão, cerca de 48% das administrações operam sob uma cultura reativa, onde falhas de liderança anulam salvaguardas técnicas, agravadas pela falta de manutenção preditiva adequada, que possui forte correlação (r = 0,857) com vazamentos e incidentes graves. Além disso, a barreira financeira do elevado custo de capital inicial (CAPEX) para a transição rumo a biorrefinarias consolida a dependência de incentivos governamentais para viabilizar as obras no estado.

Em suma, a superação do "Paradoxo Fluminense" e a expansão da biodigestão anaeróbia nas ETEs metropolitanas dependem da convergência entre soluções para os entraves biotecnológicos e químicos do lodo, a modernização da governança operacional e o aproveitamento dos incentivos previstos na legislação federal e estadual vigente.

Tabela 3 – Síntese dos principais fatores críticos para a implementação de biogás em ETEs no Estado do Rio de Janeiro

Fator Analisado	Síntese da Evidência	Classificação	Fonte de Apoio
Potencial de Escala (RJ)	As ETEs Alegria, Sarapuí e Pavuna atuam como facilitadores para a implementação de recuperação energética devido à alta vazão e concentração de carga orgânica disponível.	Viabilidade Alta	Atlas da ANA (BRASIL, 2019) e Del Río-Gamero*et al.*, 2020
Sensores e Monitoramento IA	Atuam como habilitadores tecnológicos fundamentais, porém apresentam baixa confiabilidade em ambientes corrosivos e úmidos de ETEs, exigindo estabilização prévia da infraestrutura de dados.	Viabilidade Moderada	Abourida et al., 2025
Controle de Contaminantes (Zinco)	A presença de níveis de zinco (Zn) acima de 2,8 g/kg restringe severamente o uso agrícola do biossólido produzido.	Viabilidade Moderada	Barros Filho et al., 2026
Liderança e Governança	Aproximadamente 48% das gestões operam sob cultura reativa, onde falhas de liderança e de disciplina organizacional anulam as salvaguardas técnicas existentes.	Viabilidade Baixa	Abourida et al., 2025
Manutenção Preditiva	A ausência ou inadequação de manutenção é o principal fator associado a vazamentos (correlação r = 0,857) e a incidentes operacionais críticos.	Viabilidade Baixa	Abourida et al., 2025
Custos de Capital (CAPEX)	Identificado como a barreira financeira primária para implementação de infraestrutura e projetos de biorrefinaria, frequentemente exigindo incentivos governamentais.	Viabilidade Baixa	Shen et al., 2015

Legenda: Viabilidade Alta = fatores facilitadores; Viabilidade Moderada = condicionantes técnicos; Viabilidade Baixa = inibidores críticos.
Fonte: elaboração própria com apoio do *NotebookLM* (Google, 2026), a partir de dados bibliográficos.

Viabilidade Econômica, Incentivos Regulatórios e Valoração de Subprodutos

Embora a gestão do setor ainda apresente traços reativos, o ambiente regulatório para a comercialização de bioprodutos foi ampliado por legislações recentes, com efeitos sobre a previsibilidade do mercado. Em âmbito federal, a Lei nº 14.993/2024 instituiu o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano, estabelecendo metas de inserção de gás renovável na rede de

distribuição canalizada e criando o Certificado de Garantia de Origem de Biometano (CGOB). Emitido e fiscalizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o CGOB confere rastreabilidade e lastro comercial ao gás gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). No âmbito estadual, a Lei nº 6.361/2012 dispõe sobre a Política Estadual de Gás Natural Renovável (GNR) no Rio de Janeiro e, com regulamentações atualizadas pelo Decreto Estadual nº 49.715/2025, autoriza a AGENERSA a homologar o repasse tarifário dos custos de aquisição compulsória do GNR pelas distribuidoras locais, contribuindo para a formação de um mercado mais previsível para o produtor fluminense.

Essa combinação entre CGOB federal e incentivos estaduais de GNR amplia a segurança jurídica e melhora a atratividade econômica dos projetos, ao reduzir a incerteza comercial em torno do biometano e de outros bioprodutos. Ainda assim, a conversão de ETEs convencionais em biorrefinarias não depende apenas do ambiente normativo: sua viabilidade permanece condicionada à superação de gargalos operacionais, de segurança de processo e de governança já identificados ao longo da análise (ABOURIDA et al., 2025; BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023).

Além disso, a atualização da Lei Federal nº 9.427/1996 pela Lei nº 15.269/2025 amplia as competências regulatórias da ANEEL sobre o armazenamento de energia elétrica, criando precedentes favoráveis para sistemas híbridos em ETEs. Com isso, a energia gerada continuamente pelo biogás, eventualmente associada a baterias, pode ser despachada de forma mais estratégica nos horários de pico do Sistema Interligado Nacional (SIN), o que tende a melhorar a receita da autoprodução e a reduzir parte das barreiras associadas à TUSD/TUST.

Esse conjunto de instrumentos regulatórios permite identificar benefícios econômicos e operacionais associados à conversão de ETEs convencionais em unidades de valorização de recursos. Dada a elevada participação da energia elétrica no custo operacional do saneamento no Estado do Rio de Janeiro, a produção descentralizada de biogás pode reduzir a exposição à volatilidade tarifária. Os resultados indicam que sistemas de cogeração de calor e eletricidade (*Combined Heat and Power* - CHP) tendem a reduzir custos sistêmicos, uma vez que a energia adquirida da rede pode ser substancialmente mais onerosa do que o Custo Nivelado de Energia (LCOE) gerado localmente na própria infraestrutura da ETE (FIRJAN, 2026; SCHMITKE; LEME, 2020).

A recuperação energética também afeta o balanço térmico do processo, pois a queima controlada do biogás em caldeiras ou secadores térmicos pode suprir parcela expressiva da demanda de calor necessária à operação dos biodigestores e à desidratação do lodo residual (BARROS FILHO et al., 2026). Essa integração reduz a necessidade de combustíveis externos e pode diminuir a massa total do resíduo, com repercussões sobre custos logísticos de transporte e disposição final. Sob a perspectiva da diversificação de receitas, o arcabouço normativo recente favorece a valorização econômica de atributos ambientais. A articulação entre o CGOB e as diretrizes de descarbonização da matriz de transportes contribui para ampliar a previsibilidade econômica dos investimentos em sistemas de purificação e refino de biogás nas ETEs metropolitanas.

Adicionalmente, a regulação do setor elétrico amplia as possibilidades de modelagem de negócios voltadas à comercialização do excedente energético. As análises de amortização indicam que arranjos orientados ao autoconsumo interno apresentam retorno mais rápido, ao passo que a venda de excedentes à rede envolve horizonte de retorno mais longo (DEL RÍO-GAMERO et al., 2020). Ainda assim, as atualizações promovidas pela Lei Federal nº 15.269/2025 oferecem suporte regulatório a sistemas híbridos com armazenamento, o que pode melhorar o despacho da energia gerada e reduzir parte das assimetrias concorrenciais associadas à TUSD/TUST.

No encerramento do ciclo produtivo, a estabilização biológica promovida pela digestão anaeróbia pode viabilizar o atendimento à Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020). O cumprimento dos requisitos de tempo, temperatura e higienização permite a transformação do lodo digerido em biossólido Classe A, com potencial de uso como fertilizante orgânico (BARROS FILHO et al., 2026). Essa mudança tende a produzir efeitos positivos sobre estratégias de governança ambiental, social e corporativa (ESG), na medida em que a retenção e a queima controlada do metano (CH_4) reduzem emissões fugitivas de gases de efeito estufa (BLANCO; MARTÍN; VEGA, 2023). Ao mesmo tempo, a gestão do biogás exige sistemas robustos de segurança de processo (PSMS), com foco em prevenção, manutenção preditiva e mitigação de riscos operacionais (ABOURIDA et al., 2025).

Em síntese, as evidências técnicas e regulatórias indicam que a internalização do biogás e de seus coprodutos pode alterar o perfil econômico-financeiro do setor de saneamento no Rio de Janeiro, ao reduzir custos operacionais, ampliar possibilidades de receita e favorecer estratégias de descarbonização em infraestruturas de grande porte.

CONCLUSÕES

A análise integrada realizada neste estudo indica que a transição energética e a consolidação da economia circular nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) da Região Metropolitana do Rio de Janeiro dependem da superação simultânea de barreiras técnicas, econômicas, regulatórias e organizacionais. Em resposta ao problema de pesquisa, verificou-se que a permanência do chamado "Paradoxo Fluminense" não decorre da ausência de potencial energético, mas da dificuldade de converter esse potencial em desempenho operacional e valor econômico. Entre os principais entraves destacam-se o uso de poliacrilamida (PAM) na desidratação do lodo, o risco de contaminação por zinco acima do limite regulatório e a necessidade de maior confiabilidade operacional para a adoção de sistemas de monitoramento avançado (BARROS FILHO et al., 2026; JATURONGKACHOCK; NOOPHAN; SINBUATHONG, 2025; ABOURIDA et al., 2025).

No plano econômico, o CAPEX inicial permanece como a principal barreira à implantação de biodigestores e sistemas de purificação de biogás, especialmente em um contexto de risco organizacional elevado e manutenção ainda predominantemente reativa. Os resultados indicam, contudo, que arranjos voltados ao autoconsumo térmico e elétrico podem apresentar retorno mais favorável, sobretudo diante do peso das tarifas de energia sobre o OPEX das plantas de lodos ativados. No plano institucional, o fortalecimento recente do arcabouço legal, com destaque para os instrumentos de incentivo ao biometano e para os avanços regulatórios relacionados ao armazenamento de energia, amplia a previsibilidade do mercado e melhora o ambiente de investimento.

Nesse contexto, a combinação entre o Certificado de Garantia de Origem de Biometano (CGOB), os instrumentos estaduais de incentivo ao Gás Natural Renovável (GNR) e as atualizações regulatórias sobre armazenamento de energia cria condições mais favoráveis para a adoção de sistemas híbridos em ETEs e para a valorização econômica do biogás no estado.

Em síntese, as evidências indicam que as macro-ETEs fluminenses, especialmente Alegria, Sarapuí e Pavuna, apresentam escala compatível com estratégias de transição energética baseadas na valorização do biogás e de seus coprodutos. Para pesquisas futuras, recomenda-se o desenvolvimento de estudos de caso voltados ao monitoramento em tempo real de polímeros residuais nos reatores e à modelagem de contratos de concessão que incorporem mecanismos de compartilhamento dos ganhos de eficiência energética entre usuários e operadores privados, com vistas à modicidade tarifária e à descarbonização do saneamento no estado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABOURIDA, M. *et al.* Managing process-safety risks in wastewater-based biogas: human–organisational drivers and PSMS implications for waste management operations in the UK. **Waste Management Bulletin**, [*s. l.*], v. 3, n. 4, p. 100267, 2025.

2. ÁGUAS DO RIO. **Reformas focam na ampliação da capacidade operacional da ETE Alegria**. [*s. l.*], 2022. Disponível em: https://aguasdorio.com.br/reformas-focam-na-ampliacao-da-capacidade-operacional-da-ete-alegria/. Acesso em: 24 maio 2026.

3. BARROS FILHO, M. A. C. D. *et al.*Integrated energy recovery from biogas and dried sewage sludge in a full-scale thermal dryer. **Biomass and Bioenergy**, [*s. l.*], v. 212, 2026. Disponível em: https://www.scopus.com/pages/publications/105034842774?origin=resultslist. Acesso em: 24 maio 2026.

4. BLANCO, E.; MARTÍN, M.; VEGA, P. Achieving energy self-sufficiency in wastewater treatment plants by integrating municipal solid waste treatment: a process design study in Spain. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [*s. l.*], v. 11, n. 5, 2023.

5. BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/1d8cea87-3d7b-49ff-86b8-966d96c9eb01. Acesso em: 7 maio 2025.

6. BRASIL. **Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024**. Institui o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano. Brasília, DF, 2024.

7. BRASIL. **Lei nº 15.269, de 24 de novembro de 2025**. Altera a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, para ampliar competências regulatórias sobre armazenamento de energia elétrica. Brasília, DF, 2025.

8. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020**. 2020. Disponível em: https://jurishand.com/resolucao-conama-498-de-19-agosto-2020#artigo-2.inciso-9. Acesso em: 24 maio 2026.

9. CASTRO, N. de *et al.***Análise da contratação de autoprodução por equiparação: tendências e perspectivas - TDSE 108**. Rio de Janeiro, RJ: GESEL/UFRJ, 2022. (Textos de discussão do setor elétrico, n. 108).

10. DEL RÍO-GAMERO, B. *et al.* Water-Energy Nexus: a pathway of reaching the zero net carbon in wastewater treatment plants. **Sustainability**, [*s. l.*], v. 12, n. 22, 2020.

11. FIRJAN. **Reajustes tarifários da Light e Enel RJ**. [*s. l.*], 2026. Disponível em: https://www.firjan.com.br/noticias/reajustes-tarifarios-da-light-e-enel-rj_marco-2026-8AE4828D9B95331B019CE8B0BFF64832-00.htm. Acesso em: 23 maio 2026.

12. GOOGLE. **NotebookLM**. versão web. Mountain View: Google, 2026. Disponível em: https://notebooklm.google/. Acesso em: 20 maio 2026.

13. GOV/RJ. **Governo do Estado comemora um ano de operação da concessionária Águas do Rio**. [*s. l.*], 1 nov. 2022. Disponível em: https://www.rj.gov.br/noticias/governo-do-estado-comemora-um-ano-de-operacao-da-concessionaria-aguas-do-rio3953. Acesso em: 2 jun. 2026.

14. RIO DE JANEIRO (Estado). **Lei nº 6.361, de 18 de dezembro de 2012**. Institui a Política Estadual de Gás Natural Renovável. Rio de Janeiro, 2012.

15. HVALA, N. *et al.* Energy cost optimisation in a wastewater treatment plant by balancing on-site electricity generation with plant demand. **Water**, [*s. l.*], v. 17, n. 8, 2025.

16. JATURONGKACHOCK, T.; NOOPHAN, P. L.; SINBUATHONG, N. Biogas production from municipal wastewater sludge containing polyacrylamide. **International Journal of Hydrogen Energy**, [*s. l.*], v. 163, 2025. Disponível em: https://www.scopus.com/pages/publications/105012576514?origin=resultslist. Acesso em: 24 maio 2026.

17. KLEYBÖCKER, A. *et al.* Toward carbon neutrality and circular economy: an innovative combination of enhanced biogas production and nutrient recovery from sludge dewatering liquor at a municipal wastewater treatment plant in Germany. **Water Science and Technology**, [*s. l.*], v. 90, n. 3, p. 680–695, 2024.

18. LUKOŠEVIČIUS, R.; RIMKEVIČIUS, S.; PABARČIUS, R. Presumptions for the integration of green hydrogen and biomethane production in wastewater treatment plants. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 15, n. 13, p. 7417, 2025.

19. MARAMI, H. *et al.* Going beyond conventional wastewater treatment plants within circular bioeconomy concept: a sustainability assessment study. **Water Science and Technology**, [*s. l.*], v. 85, n. 6, p. 1878–1903, 2022.

20. PFLUGER, A. *et al.* Anaerobic digestion and biogas beneficial use at municipal wastewater treatment facilities in Colorado: a case study examining barriers to widespread implementation. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 206, p. 97–107, 2019.

21. PREFEITURA DE DUQUE DE CAXIAS. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Duque de Caxias**. Duque de Caxias, RJ, 2017.

22. SCHMITKE, Y.; LEME, F. **Mais saneamento com a valorização energética do lodo de esgoto**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/50_schmitke_2020_07_23.pdf. Acesso em: 23 maio 2026.

23. SHEN, Y. *et al.* An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l.*], v. 50, p. 346–362, 2015.

24. SONG, X. *et al.* Realization approaches for constructing energy self-sufficient wastewater treatment plants: a review. **Carbon Neutrality**, [*s. l.*], v. 4, n. 1, p. 21, 2025.

25. SZELĄG-SIKORA, A. *et al.* Energy properties of sewage sludge in biogas production—technical and economic aspects. **Energies**, [*s. l.*], v. 18, n. 21, 2025. Disponível em: https://www.scopus.com/pages/publications/105021610246?origin=resultslist. Acesso em: 24 maio 2026.

26. TRICCO, A. C. *et al.* PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation. **Annals of Internal Medicine**, [*s. l.*], v. 169, n. 7, p. 467–473, 2018.