

BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA ECONOMIA CIRCULAR NAS ETES BRASILEIRAS DE LODOS ATIVADOS

Bruno Eduardo dos Santos Silva ⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com período sanduíche pela Universidade de Melbourne (UoM). Engenheiro Sanitarista da Rotária do Brasil.

Carolina Bayer Gomes Cabral

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEA/UFSC). Doutoranda em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlin (TU Berlin). Sócia da Rotária do Brasil.

Christoph Julius Platzer

Engenheiro Civil pela Universidade Técnica de Munique (TUM). Doutor em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlin (TU Berlin). Sócio-diretor da Rotária do Brasil.

Endereço ⁽¹⁾: Rua Teodoro Manoel Dias, 421 – Santo Antônio de Lisboa - Florianópolis - SC - CEP: 88050-540 - Brasil - Tel.: (48) 3234-3164 - e-mail: bruno.silva@rotaria.net

RESUMO

A economia circular, diferentemente da economia linear tradicional, visa maximizar o valor dos recursos ao reutilizá-los e reciclá-los ao longo de seus ciclos de vida. No contexto das ETES brasileiras com tecnologia de lodos ativados, essa abordagem oferece múltiplos benefícios, como a transformação de nutrientes em biossólidos para uso agrícola, a produção de energia a partir do biogás e o reúso de efluentes tratados para diversas aplicações. Este artigo apresenta um panorama dos benefícios e desafios associados à implementação de práticas de economia circular nas ETES, fundamentado em experiências nacionais e internacionais, além de examinar o *framework* brasileiro de projetos, publicações e legislações. São destacados desafios econômicos, tecnológicos e regulatórios que incluem a viabilidade econômica de novas tecnologias, a necessidade de adaptações regulatórias e as dificuldades técnicas na gestão de resíduos. O estudo conclui que, embora existam obstáculos, a economia circular possui um grande potencial para promover a sustentabilidade ambiental e a eficiência operacional das ETES brasileiras, desde que os desafios identificados sejam adequadamente enfrentados.

PALAVRAS-CHAVE: Economia Circular, Estações de Tratamento de Esgoto, Sustentabilidade Ambiental.

INTRODUÇÃO

As Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) com tecnologia de lodos ativados no Brasil transcendem sua função básica de tratamento de águas residuais, posicionando-se como pilares essenciais para uma gestão urbana sustentável. Tradicionalmente, essas instalações se concentravam em atender os padrões de qualidade do efluente a um custo mínimo, muitas vezes negligenciando o valor potencial dos subprodutos gerados. Contudo, a adoção de uma abordagem de economia circular transforma essa visão linear, destacando a eficiência dos recursos e integrando as ETES no ciclo contínuo de uso e reutilização de materiais, alinhando-se assim com a preservação dos ciclos biogeoquímicos do planeta (RICHARDSON *et al.*, 2023).

A economia circular desafia o modelo predominante de "economia linear", que é caracterizado pela extração de recursos naturais, transformação em produtos e subsequente descarte como resíduos. Este novo paradigma foca na minimização da extração de recursos e na maximização da reutilização e reciclagem, contribuindo para a redução de impactos ambientais e promovendo inovação e novas oportunidades econômicas. Estratégias chave incluem a recuperação e reutilização de nutrientes do lodo (N e P), convertendo-os em valiosos biossólidos para aplicação no solo, e a produção de biogás para energia, reforçando a sustentabilidade dessas instalações (BRASIL, 2016). Em particular, enfatiza-se a importância do ciclo de nitrogênio e fósforo, cuja gestão eficaz é vital devido às suas alterações significativas impulsionadas pela atividade humana, como a produção de fertilizantes via o processo Haber-Bosch que, apesar de sua eficiência, impõe questionamentos sobre sua sustentabilidade ambiental devido à alta emissão de carbono (GHAVAM *et al.*, 2021).

Neste contexto, a economia circular em ETES não somente reduz os custos operacionais e os impactos socioambientais, mas também promove a recuperação de nutrientes e a geração de biogás, criando oportunidades

de receita. As possibilidades de ciclagem de nutrientes, particularmente nitrogênio e fósforo, são especialmente promissoras. A recuperação desses elementos do lodo e do efluente tratado pode substituir a necessidade de fertilizantes sintéticos, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e minimizando a emissão de gases de efeito estufa. Além disso, a reintegração desses nutrientes no solo pode melhorar a saúde do solo e aumentar a eficiência agrícola (BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2019).

Refletindo a importância destas estratégias, este artigo explora o potencial e os desafios da economia circular nas ETEs de lodos ativados no Brasil, amplamente implementadas ao lado de reatores UASB e lagoas de estabilização (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA, 2020). O artigo discute o papel transformador das práticas de economia circular para melhorar a sustentabilidade ambiental e a viabilidade econômica das instalações. Destacam-se os principais resultados obtidos, que incluem levantamentos de práticas brasileiras e internacionais, identificação dos principais benefícios das práticas de economia circular para ETEs de lodo ativado e os desafios regulatórios e lacunas legais no contexto brasileiro.

OBJETIVO

O objetivo deste artigo é explorar o potencial e os desafios associados à implementação de práticas de economia circular em ETEs com tecnologia de lodos ativados no Brasil. Com isso, propõe-se discutir como essas práticas podem transformar ETEs convencionais em instalações mais sustentáveis, que não apenas tratam efluentes, mas também recuperam recursos, geram energia e contribuem para a gestão ambiental urbana de forma eficaz.

METODOLOGIA UTILIZADA

Este estudo teve como foco a exploração do potencial e dos desafios da implementação de práticas de economia circular em ETEs de lodos ativados no Brasil. A metodologia empregada envolveu uma revisão das principais publicações brasileiras, *frameworks* internacionais de saneamento e experiências práticas locais. A legislação sobre economia circular foi analisada para avaliar o quadro legal de utilização de subprodutos em ETEs.

Para a realização deste estudo, foram selecionadas as experiências e publicações mais relevantes que fundamentam as conclusões apresentadas. Embora este artigo apresente referências essenciais para embasar as discussões, as demais fontes utilizadas estão documentadas e podem ser disponibilizadas aos interessados mediante solicitação aos autores do estudo original. Baseado nessas experiências, avaliou-se os benefícios específicos das práticas de economia circular para as ETEs brasileiras de lodos ativados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação do potencial para implementação de práticas de economia circular nas ETEs com tecnologia de lodos ativados no Brasil revelou perspectivas promissoras, destacando significativas oportunidades para a utilização de biogás, recuperação de nutrientes e reúso de efluente. As publicações chave, como os "Cadernos Técnicos em Engenharia Sanitária e Ambiental" (ABES, 2024) e os "Guias Técnicos sobre aproveitamento energético de biogás" (BRASIL, 2015), ofereceram uma base sólida para a compreensão do gerenciamento de biogás e da valoração de subprodutos no tratamento de esgotos. Internacionalmente, países como a Alemanha e a Holanda têm estabelecido padrões exemplares em recuperação de nutrientes e geração de energia, demonstrando *frameworks* robustos que orientam as iniciativas de economia circular no setor de saneamento. Destacam-se práticas inovadoras, como a legislação alemã "*Kreislaufwirtschaftsgesetz*" e as iniciativas holandesas na recuperação de biopolímeros a partir de lodo granular aeróbio.

Os benefícios potenciais dessas práticas para as ETEs incluem não apenas a redução de custos operacionais, mas também a melhoria da sustentabilidade ambiental e da eficiência de recursos. Essas abordagens ajudam a melhorar a pegada ecológica das instalações, alinhando as operações com padrões ambientais globais rigorosos e contribuindo para o desenvolvimento urbano sustentável. Contudo, a implementação dessas práticas enfrenta desafios tecnológicos, regulatórios e financeiros significativos. É necessário adaptar as instalações existentes para incorporar sistemas circulares, sempre considerando a realidade local e a viabilidade econômica. Para que tais inovações sejam reconhecidas e incentivadas, é crucial que os *frameworks* regulatórios evoluam, enquanto investimentos substanciais são necessários para facilitar essa transição.

FRAMEWORK BRASILEIRO: POTENCIAL DE APLICAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR NO SANEAMENTO BÁSICO

As ETEs no Brasil enfrentam desafios significativos devido a problemas operacionais frequentemente associados a deficiências em projetos e construções. Essas dificuldades resultam em elevação dos custos de tratamento, redução da eficiência operacional e falhas frequentes no cumprimento das normativas ambientais. Adicionalmente, as práticas comuns de destinação de subprodutos sólidos e gasosos, como o lodo e biogás, para aterros sanitários ou incineração, não são ideais devido aos seus impactos ambientais significativos. Este cenário ressalta a necessidade urgente de revisão e melhoria, proporcionando uma oportunidade para integrar práticas de economia circular que podem transformar radicalmente a gestão de subprodutos em ETEs.

Os desafios operacionais são corroborados pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que impõe metas progressivas para restringir cada vez mais o recebimento de resíduos de natureza orgânica em aterros. As práticas de destinação atual, embora comuns, representam uma rota negativamente destacada devido aos custos elevados de transporte e disposição do lodo, bem como pelas emissões de gases de efeito estufa associadas a estas atividades.

Neste contexto, instituições como o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto (INCT ETEs Sustentáveis) e o Projeto de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS) têm desempenhado um papel crucial no avanço da economia circular no setor. Essas organizações colaboram estreitamente com empresas de saneamento e instituições de pesquisa, tanto nacionais quanto internacionais, promovendo pesquisas e desenvolvendo práticas inovadoras que realçam a valorização dos subprodutos.

O envolvimento também da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES) tem sido fundamental nas discussões técnicas, especialmente na revisão da normativa nacional para utilização de lodo de ETEs no solo, encapsulada na atual Resolução CONAMA 498/2020. Essa normativa desempenha um papel vital ao estabelecer diretrizes claras para a aplicação segura de biossólidos, incentivando práticas que anteriormente eram limitadas devido a preocupações ambientais e de saúde pública.

O Brasil agora conta com um conjunto de publicações e normativas que suportam a implementação de soluções baseadas na economia circular. Destacam-se entre as principais publicações os "Cadernos Técnicos em Engenharia Sanitária e Ambiental" (ABES, 2024) e o "Guia Técnico sobre aproveitamento energético de biogás" (BRASIL, 2015), que fornecem orientações detalhadas sobre a valoração e o gerenciamento de subprodutos do tratamento de esgotos. Estas publicações abordam avanços nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás, higienização e uso de lodo no solo, e aspectos legais e práticos do reúso de água não potável, contribuindo para a formação de um *framework* de conhecimento essencial para o avanço das práticas de economia circular nas ETEs.

EXPERIÊNCIAS CONSOLIDADAS E SEU IMPACTO NO DESENVOLVIMENTO DE PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR

Exemplos práticos internacionais

As práticas de economia circular nas ETEs têm ganhado impulso significativo através de experiências tanto nacionais quanto internacionais. A transferência e adaptação tecnológica considerando as particularidades de cada região são fundamentais para o sucesso dessas iniciativas. Internacionalmente, diversos países têm estabelecido benchmarks para a recuperação de subprodutos e a geração de energia, contribuindo substancialmente para o desenvolvimento sustentável:

- **Holanda:** Líder na recuperação de subprodutos em ETEs, particularmente notável pelo uso do processo de lodo granular aeróbio para recuperação de biopolímeros. Estes materiais são utilizados para uma ampla gama de finalidades, desde aplicações agrícolas como retentores de umidade até usos industriais como retardantes de chamas (BAHGAT *et al.*, 2023). A Holanda também se destaca na inovação para recuperação de celulose nas etapas preliminares do tratamento, usando peneiras finas para maximizar o aproveitamento de recursos (RUIKEN *et al.*, 2013).
- **Alemanha:** Regulamentada pela lei *Kreislaufwirtschaftsgesetz*, as ETEs alemãs focam intensamente no máximo aproveitamento de subprodutos. A legislação impulsiona práticas como a lavagem de areia para

menos de 5% de matéria orgânica, facilitando sua reutilização (DWA, 2004). Além disso, mais de metade das ETEs alemãs geram energia a partir do biogás produzido no tratamento de esgoto (DWA, 2020). A codigestão e a recuperação de fósforo do lodo são práticas comuns, com a legislação exigindo a recuperação de fósforo em todas as estações tratando mais de 100.000 habitantes até 2029 (ALEMANHA, 2017).

- **Inglaterra:** Uma grande proporção do lodo produzido é destinada a solos agrícolas, após higienização adequada (>65% segundo informações de consórcios locais). O Reino Unido também utiliza a hidrólise térmica para otimizar a digestão anaeróbia do lodo, o que reduz significativamente o tempo e o espaço necessário para o tratamento e aumenta a produção de biogás.
- **Estados Unidos:** Cerca de 43% dos biossólidos produzidos no país são aplicados em solos (USEPA, 2021), principalmente para uso agrícola e recuperação de áreas degradadas. Este uso ampliado de biossólidos demonstra um compromisso significativo com práticas de economia circular.
- **México:** A ETE Atotonilco destaca-se pela sua capacidade de tratar grandes volumes de esgoto e pela utilização integrada do biogás para produção de energia elétrica e calor, beneficiando diretamente a agricultura local no Vale do Mesquital, onde mais de 300 mil agricultores são beneficiados pelo efluente tratado e desinfetado utilizado em suas lavouras.
- **Portugal, Austrália e Chile:** Estes países demonstram usos inovadores de subprodutos das ETEs. Portugal, por exemplo, gera hidrogênio verde a partir de água reutilizada, enquanto o Chile implementa o conceito de biofábricas que produzem água para reúso, biossólidos para uso agrícola e energia elétrica. Na Austrália, a prática de uso agrícola de biossólidos é comum, com uma grande proporção de biossólidos sendo aplicada em solos (AUSTRALIAN E NEW ZEALAND BIOSOLIDS PARTNERSHIP, 2020).

Embora as práticas de economia circular tenham demonstrado sucesso em várias partes do mundo, a aplicação dessas experiências no Brasil requer considerações cuidadosas devido às diferenças significativas nos contextos ambiental, tecnológico e operacional. As ETEs no Brasil enfrentam desafios únicos que podem limitar a viabilidade de algumas das estratégias de recuperação de recursos adotadas internacionalmente.

Um dos principais obstáculos é a grande variação das vazões afluentes, muitas vezes exacerbadas pela entrada indevida de águas pluviais. Esta situação é especialmente problemática para os reatores UASB, que são amplamente utilizados no Brasil para tratamento primário de esgotos. As águas pluviais diluem a carga orgânica do esgoto, resultando em uma redução significativa na produção de biogás, o que pode comprometer a sustentabilidade energética das instalações (CABRAL, 2016; CHERNICHARO *et al.*, 2018; POSSETTI *et al.*, 2018). Essa variação pode também impactar diretamente o desempenho dos processos de tratamento e a eficiência das tecnologias de recuperação de recursos, exigindo uma gestão operacional mais complexa e adaptativa.

Além disso, o conteúdo excessivo de resíduos sólidos no esgoto bruto, como plásticos, cotonetes, cabelos, fios dentais e óleos, desafia significativamente os processos de tratamento. Quando não removidos eficazmente nas etapas preliminares, esses resíduos entram nos reatores e se integram ao lodo e à espuma, dificultando não apenas o processo de tratamento, mas também a recuperação subsequente e a valorização dos subprodutos gerados. Esses materiais podem alterar as características físicas e químicas do lodo, complicando seu processamento e reutilização.

É importante ressaltar que muitos desses desafios não se originam nas ETEs, mas sim no sistema de coleta e transporte de esgoto, incluindo as ligações prediais. Portanto, a implementação efetiva de práticas de economia circular nas ETEs brasileiras não depende apenas de tecnologias ou processos inovadores nas próprias estações, mas também de uma abordagem integrada que envolva melhorias em toda a infraestrutura de saneamento. Isso inclui ações voltadas para a redução de entradas indevidas de água pluvial e a sensibilização dos usuários para evitar o descarte inadequado de detritos no sistema de esgoto. A cooperação entre os vários *stakeholders*, incluindo governos, comunidades e empresas de saneamento, é essencial para criar um sistema robusto que suporte a transição para práticas de economia circular mais sustentáveis e eficientes.

Exemplos práticos nacionais

Com base nos *insights* internacionais, algumas experiências nacionais têm adaptado casos internacionais considerando os desafios e necessidades locais. Estas adaptações refletem um esforço para alinhar as práticas internacionais de economia circular às particularidades brasileiras, especialmente no que tange ao tratamento e valorização de subprodutos das ETEs.

Entre as experiências brasileiras, destaca-se o histórico de aproveitamento do lodo para fins agrícolas, com ênfase nos estados do Paraná e de São Paulo, além do Distrito Federal. Essas iniciativas são complementadas por pesquisas desenvolvidas no âmbito do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), que ajudaram a compreender a dinâmica dos compostos presentes no lodo sob condições tropicais, além de apoiar o desenvolvimento de um arcabouço legal robusto para disciplinar o uso adequado e seguro deste subproduto. Isso inclui a disposição final de um resíduo do tratamento de esgoto via Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) ou a utilização do lodo como matéria-prima para produção de fertilizantes ou condicionadores de solo via Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

O Paraná foi um dos pioneiros no uso de biossólidos em cultivos agrícolas, com a SANEPAR liderando projetos desde a década de 1990. Entre 2007 e 2017, aplicou-se 285 mil toneladas de biossólidos em mais de 15 mil hectares de terras agrícolas (BITTENCOURT, 2018). No Distrito Federal, o biossólido tem sido utilizado para recuperar áreas degradadas por atividades de construção civil, com mais de 125 hectares recuperados em áreas como a Rede Ferroviária Federal e a cascalheira Rajadinha (CHAMHUM-SILVA, 2022).

Em São Paulo, o uso de biossólidos é evidente nos municípios de Botucatu, Matão e Jundiá. Em 2018, a ETE Lageado, em Botucatu, obteve registros de estabelecimento produtor de insumo agrícola e de produto fertilizante orgânico composto Classe D, denominado Sabesfértil, a partir de tratamento de lodo em um sistema de secagem e compostagem. Na ETE São Lourenço, em Matão, obteve-se registro pelo MAPA de estabelecimento produtor de insumo agrícola, produzindo o fertilizante orgânico composto Classe D, Ferticlean (BITTENCOURT *et al.*, 2022). Jundiá destaca-se pelo processo de compostagem de lodo da ETE Jundiá e pela operação da Usina Verde de Compostagem. Em 2019, foi inaugurada a usina de compostagem de lodo na ETE Quilombo em Nova Odessa, que produz fertilizante orgânico a partir do lodo da ETE e de material de podas de árvores, gerando economia significativa ao evitar o transporte do lodo para aterro sanitário (SIGRH - SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2022).

Adicionalmente, o aproveitamento energético do biogás em ETEs tem se destacado no Brasil. A ETE Franca, em São Paulo, utiliza biogás para produzir biometano que abastece 38 veículos leves da frota local da SABESP. A ETE Ouro Verde, em Foz do Iguaçu, e a ETE Arrudas, em Sabará, desenvolveram sistemas para geração distribuída de energia elétrica, utilizando microturbinas e promovendo autossuficiência energética. Notavelmente, a ETE Arrudas fez um investimento de R\$ 37 milhões com um retorno de 8 anos, destacando-se pela economia energética que reduziu o custo de energia elétrica de 40% para 16% do OPEX (COPASA, 2015; GS INIMA BRASIL, 2018).

A ETE Ribeirão Preto, em São Paulo, instalou dois motogeradores com uma potência combinada de 1,5 MW, investindo R\$ 5 milhões em 2012. O biogás gerado é utilizado tanto para a geração de energia elétrica quanto para o aquecimento do lodo, cobrindo cerca de metade da demanda energética da ETE. Esta iniciativa reduziu significativamente os custos com energia elétrica, que anteriormente representavam 40% das despesas operacionais da planta, passando a apenas 16% (GS INIMA BRASIL, 2018).

No Paraná, a Usina Sanepar de Bioenergia (USBIO) em São José dos Pinhais é um modelo de inovação no tratamento e valorização de resíduos. Funcionando 24 horas por dia desde 2019, a usina utiliza uma abordagem de codigestão que combina lodo da ETE Belém com resíduos orgânicos principalmente da Central de Abastecimento de Curitiba, que somaram 9.100.681 kg em 2023. Além disso, foram processados 293.412 kg de lodo. Resíduos complementares da indústria pesqueira alcançaram 585.301 litros e outros materiais como soro de leite e massas diversas totalizaram 157.988 kg no mesmo ano (SANEPAR, 2024). A instalação conta com dois motogeradores ciclo Otto, com uma capacidade total de 2,8 MW, dos quais apenas 0,6 MW são utilizados pela própria usina, permitindo a venda do excedente para a rede elétrica. Este arranjo sublinha o caráter sustentável e lucrativo do empreendimento, com um investimento inicial de € 20 milhões em 2017 (SCHEUER *et al.*, 2019).

A ETE Ibitaré, em Minas Gerais, também exemplifica o uso eficiente de recursos, utilizando biogás e lodo seco para secar mais lodo e gerar eletricidade, com uma potência instalada de 604 kW, demonstrando como as ETES podem efetivamente contribuir para a autossustentabilidade energética (BRASIL, 2017).

VANTAGENS E BENEFÍCIOS IDENTIFICADOS PARA AS ETES DE LODOS ATIVADOS BRASILEIRAS

O modelo de economia circular transcende a mera conformidade com normas ambientais e oferece uma série de vantagens que incluem a redução de custos operacionais, a minimização dos impactos socioambientais, e a criação de novas fontes de receita. Essas vantagens se manifestam de várias maneiras nas ETES brasileiras de lodos ativados.

Inicialmente, há o aproveitamento dos nutrientes presentes no esgoto e no lodo, que podem ser transformados em biossólidos para uso benéfico em solos ou para a produção de insumos agrícolas. Esta prática não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também se alinha com os objetivos da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da ONU, como a busca pela fome zero e a promoção de boa saúde e bem-estar.

A produção de energia através do biogás, que inclui biometano, eletricidade e calor, reduz a dependência de fontes de energia tradicionais e suas flutuações de mercado, enquanto melhora a eficiência do processo de tratamento de esgoto como um todo. Isso traz ganhos significativos para a recuperação e valorização dos subprodutos, e ao mesmo tempo, minimiza a geração de resíduos e os custos associados com transporte e disposição final, como no caso do lodo e da areia.

Adicionalmente, o reúso do efluente tratado para aplicações urbanas, industriais e agrícolas diminui a exploração de mananciais e reduz a demanda de água bruta. Isso não só melhora a logística operacional e otimiza o transporte de subprodutos, mas também aumenta as possibilidades de ingresso de receita pela venda desses subprodutos beneficiados.

Além disso, a estratégia contribui para a sustentabilidade ambiental e demonstra compromisso com a abordagem Nexus, que interliga água, energia e segurança alimentar, fortalecendo a relação entre os setores de água, energia e alimentos que estão intrinsecamente ligados.

Com base neste panorama geral de benefícios, elencaram-se os seguintes como os mais promissores para ETES brasileiras de lodos ativados em processo de *retrofitting*:

- **Areia:** O aproveitamento da areia removida nos desarenadores das ETES representa uma oportunidade substancial tanto econômica quanto ambientalmente. Uma vez devidamente lavada e preparada para manuseio, a areia oferece diversas possibilidades de reutilização. Estas incluem sua aplicação em subleitos de vias, assentamento de tubulações, ou até mesmo como material não estrutural na construção civil e em leitos de secagem.

Estudos realizados no Brasil, como o da ETE Onça em Belo Horizonte, MG, demonstram a viabilidade econômica dessa prática. A pesquisa conduzida (SILVA *et al.*, 2018) mostrou que o investimento inicial para o reaproveitamento da areia pode ser recuperado em apenas 20 meses. Além disso, estudos semelhantes em ETES de Barueri e São Carlos, SP, confirmam o potencial de uso dessa areia na indústria da construção civil.

O retorno econômico proveniente da comercialização da areia recuperada é acompanhado de benefícios ambientais significativos. A reutilização da areia contribui diretamente para a redução da extração de areia de leitos de rios, um problema ambiental crítico que enfrenta várias regiões do mundo. Na Europa, por exemplo, a venda de areia proveniente de ETES já é uma realidade consolidada, conforme documentado pela DWA em 2004.

- **Reaproveitamento de efluente tratado:** O reaproveitamento de efluente tratado representa uma alternativa valiosa e sustentável para substituir o uso de água potável, especialmente em aplicações industriais e agrícolas. No contexto brasileiro, notadamente rico em recursos hídricos, a crescente demanda por água tem levado a desafios significativos de sustentabilidade e gestão hídrica. Um exemplo marcante foi a crise hídrica enfrentada pela região metropolitana de São Paulo em 2014, que resultou em uma escassez aguda de água e déficits recordes no sistema Cantareira, essencial para o abastecimento da capital e arredores. Esse evento

sublinhou a fragilidade dos recursos hídricos mesmo em regiões anteriormente consideradas seguras em termos de abastecimento de água.

Em resposta a esses desafios, a ANA emitiu um alerta em 2021 sobre a situação crítica de escassez hídrica na Região Hidrográfica do Paraná, que abrange partes dos estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo. O reúso de efluente tratado oferece uma solução promissora para mitigar tais problemas, servindo como uma fonte alternativa valiosa nas matrizes hídricas regionais e beneficiando cenários de escassez.

O reúso de água em ETEs varia conforme o nível de tratamento aplicado, permitindo diferentes usos conforme a qualidade alcançada. Projetos de renome, como o Aquapolo da SABESP, exemplificam o sucesso dessa abordagem. O Aquapolo é um dos maiores projetos de produção de água de reúso para fins industriais na América Latina, evidenciando a viabilidade e os benefícios econômicos do reúso. Além disso, a Estação de Produção de Água de Reúso de Capivari II (EPAR Capivari II) em Campinas, SP, também destaca-se por tratar esgotos domésticos e não domésticos e vender a água de reúso produzida, com uma capacidade de 364 litros por segundo, gerando receita significativa para a operadora (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB, 2018).

- **Eficiência energética:** A eficiência energética é um pilar fundamental para as ETEs não só como medida de redução de custos, mas também como estratégia de sustentabilidade ambiental. Em um cenário ideal, a energia mais barata é aquela que não é consumida. Portanto, as iniciativas para otimizar a eficiência energética nas ETEs são diretamente traduzidas em economia operacional e menor impacto ambiental.

Entre as diversas medidas implementadas para melhorar a eficiência energética, o ajuste dos sistemas de bombeamento para operar mais próximo de suas eficiências ótimas é crucial. A correção de perdas hidráulicas também é vital, pois perdas excessivas podem aumentar significativamente o consumo de energia.

A aeração, um dos maiores consumidores de energia em ETEs, é outro foco de otimização. Utilizar sistemas de controle avançado que incluem sondas de oxigênio dissolvido (OD) e sólidos suspensos totais (SST) permite ajustar a aeração ao mínimo necessário para o tratamento eficaz. Isto evita o excesso de aeração e reduz o consumo energético. A adição de sistemas de aeração ajustáveis facilita uma mistura eficiente e economia de energia.

A eficiência energética se estende também aos processos de desidratação do lodo, onde métodos eficientes podem maximizar a remoção de água, reduzindo o volume e, conseqüentemente, os custos de transporte e disposição. Além disso, o controle preciso do retorno do lodo aos reatores, utilizando bombas com inversores de frequência, otimiza o processo e reduz o consumo de energia.

- **Aproveitamento do biogás produzido pelo tratamento de lodo:** O biogás, predominantemente composto por metano, é um subproduto valioso da digestão anaeróbia do lodo em estações de tratamento de esgoto. Quando capturado e convertido em energia, o biogás proporciona uma redução significativa nos custos de energia das ETEs e, simultaneamente, contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A utilização do biogás reduz as emissões de metano (CH₄), um potente GEE, e evita as emissões associadas à produção de energia e outros bens e serviços necessários para a operação das ETEs, compensando, assim, as emissões fugitivas e suprimindo demandas externas.

Nas ETEs brasileiras de lodos ativados, existe um grande potencial para a otimização do uso do biogás. A otimização da digestão anaeróbia, por exemplo, pode ser alcançada através de medidas como a calefação e o isolamento térmico dos digestores. Essas práticas aumentam a eficiência do processo de digestão, resultando em uma maior produção de biogás. Adicionalmente, a codigestão de diferentes tipos de resíduos orgânicos, como resíduos alimentares, pode incrementar significativamente a produção de biogás. Esta abordagem não só aumenta a geração de energia, mas também proporciona receitas adicionais pela cobrança de recepção desses resíduos.

Outra medida que pode potencializar os benefícios do biogás é a utilização da hidrólise como pré-tratamento do lodo. A hidrólise melhora o aproveitamento da capacidade volumétrica dos digestores, aumenta a

produção de biogás e a destruição de sólidos voláteis, e facilita a desidratação do lodo. Estas vantagens culminam em um balanço térmico favorável na cogeração, permitindo a secagem térmica completa de toda a produção de lodo, o que reduz ainda mais os custos operacionais e as emissões associadas (MIKI, 2018).

- **Utilização do lodo:** O processamento e a disposição final do lodo podem representar até 60% dos custos operacionais de uma ETE, especialmente quando se considera o transporte e a disposição final em aterros sanitários. Os custos de desaguamento para uma grande operadora de serviços de saneamento, por exemplo, podem chegar a R\$ 170,00/tonelada de lodo, enquanto o transporte e disposição podem chegar a R\$ 200,00 e R\$ 230,00 por tonelada de lodo desaguado, respectivamente (Chamamento Público SABESP 00780/22).

Apesar de o lodo gerado nas ETEs concentrar boa parte dos poluentes e contaminantes presentes no esgoto bruto, sua composição também apresenta compostos de elevado valor agregado que podem ser recuperados e reutilizados. A transformação do lodo de esgoto em um biossólido para uso seguro em solos tem se tornado uma alternativa de grande interesse técnico e econômico em todo o mundo. Esta prática constitui um dos principais pilares do tratamento sustentável do esgoto, pois proporciona, ao mesmo tempo, a reciclagem de nutrientes essenciais às plantas e a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, devido ao alto teor de matéria orgânica presente no lodo. Complementarmente, pode ainda possibilitar ganhos econômicos, ambientais e sociais.

Diversos estudos apontam para a viabilidade do lodo como insumo agrícola e fertilizante. Este material contém macronutrientes, como nitrogênio e fósforo, e micronutrientes, incluindo ferro, cobre, zinco, magnésio e cobalto, destacando-se como uma fonte benéfica para o solo (GUEDES, 2000). Em diversos países, a utilização do lodo na agricultura é amplamente adotada, chegando a representar mais de 60% de seu destino. Na área florestal, o biossólido pode ser aproveitado de diversas maneiras, desde servir como substrato para a produção de mudas florestais até atuar como condicionador de solo para a recuperação de áreas degradadas. Além disso, pode ser utilizado como fertilizante em plantações comerciais, na restauração florestal e no plantio de árvores em áreas urbanas (SANTOS *et al.*, 2014; TRAZZI *et al.*, 2014; BONINI *et al.*, 2015; ABREU *et al.*, 2019). O uso agrícola do biossólido é considerado uma forma benéfica de reciclagem de nutrientes e matéria orgânica, possibilitando a redução do uso de fertilizantes minerais.

A dosagem de biossólido deve ser pautada tanto pela necessidade nutricional das plantas quanto pela capacidade do sistema solo-planta em assimilar as substâncias químicas aportadas via biossólido. A Resolução CONAMA nº 498/2020 define os padrões de qualidade do biossólido e do solo submetido à aplicação desse subproduto, considerando a possibilidade de aplicações recorrentes, assegurando que a quantidade aportada de forma pontual (determinada aplicação) e acumulada (ao longo de aplicações sucessivas) não causará impactos negativos.

Na perspectiva de recuperação de áreas degradadas, o aspecto de maior interesse associado ao uso de biossólido consiste na elevação do teor de matéria orgânica no solo. O biossólido atua como agente condicionante de solos, promovendo melhorias principalmente nas propriedades físicas do solo (porosidade, formação e estabilidade de agregados, retenção de água etc.) e fornecendo condições favoráveis à recomposição vegetal. Ademais, a parcela de macro e micronutrientes aportada juntamente com a matéria orgânica, liberada gradualmente, contribui para o desenvolvimento de plantas na área degradada (ABES, 2021).

Outras opções de aproveitamento do lodo que não envolvem diretamente solos incluem processos térmicos (p. ex.: incineração, pirólise) e usos na indústria da construção civil (p. ex.: produção de cimento e uso como agregado). De forma geral, essas opções são mais complexas e demandam maiores investimentos de implantação e operação, comparativamente com o uso em solos, embora sejam extremamente compactas – aspecto importante em locais com reduzida disponibilidade de área (ABES, 2021).

De maneira geral, com a utilização do lodo para um fim diferente da destinação em aterro sanitário, é possível obter diversos benefícios, como:

- **Redução dos custos de transporte:** Os custos de transporte para a disposição do lodo em aterros estão em constante aumento devido às crescentes distâncias a serem percorridas e à indisponibilidade de recepção do lodo em aterros sanitários. Quando se trata da disposição do

lodo em áreas degradadas ou em zonas agrícolas, é possível otimizar a logística de transporte, minimizando custos e emissões. Portanto, a redução das distâncias percorridas não apenas diminui os custos operacionais, mas também desempenha um papel crucial na redução das emissões de carbono associadas ao transporte do lodo.

- **Minimização dos gastos com a disposição e possível geração de receita:** As tarifas para a disposição do lodo em aterros sanitários variam consideravelmente, oscilando entre 80 e 330 reais por tonelada (podendo ser maior, dependendo da região). A escolha criteriosa da estratégia de disposição e a consideração desses custos são aspectos fundamentais na gestão eficiente do lodo. Estratégias alternativas, como a aplicação em áreas da agricultura, têm o potencial de diminuir esses custos significativamente. Isso se deve ao fato de que essas abordagens podem agregar valor ao lodo e possibilitar a geração de receita adicional, após sua transformação e eventual comercialização como bio-sólido (atendendo às diretrizes da Res. CONAMA 498/2020) ou insumo agrícola (atendendo às diretrizes do MAPA).
- **Geração de energia térmica e receita pela venda do fósforo:** O lodo pode ser queimado, utilizando o calor na ETE e extraíndo o fósforo das cinzas residuais. Caso a extração do fósforo não se demonstre viável atualmente, pode-se considerar a alternativa de estocar as cinzas em um mono-aterro para possibilitar a sua extração posteriormente.

Além dos benefícios mais palpáveis e já com experiência consolidada no Brasil, existem diversas outras possibilidades que podem ser desenvolvidas, como por exemplo:

- **Geração de energia térmica pelo calor do efluente:** É possível utilizar a energia térmica do esgoto para sistemas de resfriamento ou calefação, podendo ser usada como parte do calor necessário para os digestores ou para a secagem do lodo, e eventualmente para indústrias próximas, gerando como benefício uma nova fonte de receita. O uso do calor do esgoto já é praticado em vários sistemas na Europa (NAGPAL *et al.*, 2021).
- **Geração de energia a partir do desnível hidráulico disponível:** Aproveitamento do desnível hidráulico para gerar energia para uso na própria ETE. A ocorrência de um desnível significativo entre a saída da ETE e o corpo receptor permite inferir que existe potencial de gerar energia e, portanto, retorno econômico para a ETE. Esta solução é praticada em várias ETES na Europa (MITROVIC *et al.*, 2021).
- **Geração de energia através do hidrogênio verde a partir do centrado do desaguamento do lodo:** Existem estudos iniciais e exemplos em escala piloto para utilizar o conteúdo de nitrogênio amoniacal no centrado do desaguamento do lodo como fonte de energia através do hidrogênio (SYNREFORM, 2023).
- **Geração de hidrogênio verde e aproveitamento do subproduto de oxigênio:** Através da eletrólise do efluente líquido, é possível produzir hidrogênio verde que pode ser vendido, e o subproduto oxigênio pode ser utilizado no tratamento, reduzindo a necessidade de comprar oxigênio puro ou o consumo energético com suprimento de ar.

DESAFIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR

A implementação da economia circular no saneamento enfrenta diversos desafios tecnológicos, econômicos e regulatórios.

Desafios tecnológicos

- **Variabilidade das características da matéria-prima:** A variabilidade nas características da matéria-prima pode interferir nos mecanismos bioquímicos da digestão anaeróbia, levando à instabilidade do processo. A carga aumentada de nitrogênio, por exemplo, pode inibir o processo (excesso de amônia livre) e aumentar a concentração de nitrogênio na fase líquida. Além disso, a elevação da taxa de produção de biogás e a variação da concentração de metano podem impactar o volume de substrato e o nível d'água no reator.
- **Logística adicional para co-substratos:** A logística adicional para o fornecimento de co-substratos exige instalações específicas para recebimento, descarga e estocagem, além de equipamentos para mistura e

alimentação do biodigestor. Antes de decidir pela codigestão, é necessário avaliar a viabilidade do procedimento considerando a proporção entre substratos, necessidade de pré-tratamento, custos de transporte, densidade e teor de água dos substratos, e os custos relativos à utilização de equipamentos de mistura.

- **Limitações na instrumentação:** Embora o custo de energia no Brasil seja mais baixo comparado a países europeus, limitando a adoção de práticas de eficiência energética, é crucial projetar as estações para permitir a integração futura de tecnologias de medição e otimização, como a medição de O₂ no tratamento secundário aeróbio, bem como outros parâmetros como SST e redox, usando sondas UV-VIS.

Desafios econômicos

- **Rotas tecnológicas e viabilidade econômica:** Algumas rotas tecnológicas que atualmente não satisfazem critérios de viabilidade econômica podem se tornar viáveis com mudanças na legislação ou no mercado futuro. Exemplos incluem a incineração de lodo seguida da extração de fósforo das cinzas e a recuperação de nitrogênio a partir do centrado da desidratação de lodo. Embora essas tecnologias não sejam viáveis atualmente, elas podem se tornar economicamente atraentes conforme o valor dos recursos aumenta.
- **Custos operacionais elevados:** O processamento e a disposição final do lodo podem corresponder a até 60% dos custos operacionais de uma ETE, especialmente considerando o transporte e a disposição final em aterros sanitários. Alternativas como a transformação do lodo em biossólido para uso em solos podem reduzir esses custos, proporcionando benefícios econômicos significativos, além de ganhos ambientais e sociais.
- **Investimentos em infraestrutura:** A implementação de tecnologias de economia circular pode exigir investimentos substanciais em infraestrutura e equipamentos, além de custos recorrentes de manutenção. Exemplos incluem o pré-tratamento do lodo para otimização da digestão anaeróbia e a instalação de sistemas de recuperação de nutrientes e produção de energia. A avaliação da viabilidade financeira dessas tecnologias deve considerar tanto os custos iniciais quanto os benefícios econômicos a longo prazo.

Desafios regulatórios

A literatura aponta diversas lacunas legais no contexto do saneamento básico no Brasil, com poucas leis regulamentando práticas de circularidade no setor (ANÍCIO *et al.*, 2022) (Tabela 1). As principais leis e suas fragilidades são descritas no quadro abaixo, destacando a necessidade de uma regulamentação mais abrangente e específica para promover práticas de economia circular.

Tabela 1 - Desafios Regulatórios e Lacunas Legais nas Práticas de Economia Circular para o Saneamento no Brasil

Recurso	Legislação	Descrição	Lacunas
Lodo	498/2020 (CONAMA)	Define critérios para produção e aplicação de biossólidos em solos.	Legislação permite disposição em aterros, competindo com usos de maior valor.
Biogás	685/2017 (ANP)	Regras para controle de qualidade e especificações do biometano.	Abrange apenas o biometano, não cobrindo outros usos do biogás.
Biogás	482/2012 (ANEEL)	Condições para micro e minigeração distribuída de energia elétrica.	Inaplicável à energia gerada a partir do biogás.
Eluente Secundário	54/2005 (CNRH)	Diretrizes para reúso direto de água não potável.	Falta de padrões detalhados de qualidade e tratamento.
Eluente Secundário	121/2010 (CNRH)	Critérios para reúso de água não potável na agricultura e silvicultura.	Falta de padrões detalhados de qualidade e tratamento.

Fonte: adaptado de Anício *et al.*, 2022.

Outros desafios específicos

Além dos desafios mais amplos, a prática de economia circular enfrenta obstáculos específicos que incluem transversalmente aspectos legais, tecnológicos e econômicos:

- **Reúso de Água:** Apesar do enorme potencial, há poucas experiências referentes à prática de reúso de água em escala plena. A ausência de uma legislação nacional mais abrangente e específica para reúso configura-se como um dos maiores empecilhos para sua disseminação.
- **Codigestão de Lodo:** A implementação de processos para a codigestão de lodo em ETEs também possui obstáculos relacionados à infraestrutura física das instalações e aos procedimentos operacionais e de manutenção. A variabilidade de características da matéria-prima, o aumento da carga de nitrogênio e a elevação da taxa de produção de biogás são alguns dos desafios técnicos. Além disso, o fornecimento de co-substratos exige uma logística adicional, com necessidade de instalações para recebimento, descarga e estocagem do material, bem como equipamentos para mistura e alimentação do biodigestor.
- **Avaliação da Viabilidade da Codigestão:** A avaliação da viabilidade da codigestão deve considerar a proporção entre substratos, necessidade de pré-tratamento, custos de transporte, densidade e teor de água dos substratos, e custos relativos à utilização de equipamentos de mistura. Também é necessário verificar a possibilidade de aplicação do lodo digerido como biossólido, cumprindo os requisitos da Resolução do CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020 (BRASIL, 2020).

CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma avaliação abrangente dos potenciais e desafios associados à implementação de práticas de economia circular em ETEs de lodos ativados no Brasil. A economia circular oferece uma gama de vantagens significativas que vão além da conformidade com normas ambientais, incluindo a redução de custos operacionais, a minimização de impactos socioambientais e a criação de novas fontes de receita.

Os principais benefícios identificados incluem o aproveitamento de nutrientes presentes no esgoto e no lodo para transformação em biossólido, a produção de energia a partir do biogás e o reúso do efluente tratado para aplicações urbanas, industriais e agrícolas. Além disso, a minimização da geração de resíduos, a melhoria na logística operacional e a otimização do transporte de subprodutos foram destacados como fatores cruciais para aumentar a sustentabilidade econômica das ETEs. A eficiência do processo de tratamento de esgoto, bem como a eliminação ou mitigação de poluição, também foram ressaltados como benefícios significativos.

No entanto, a implementação de práticas de economia circular enfrenta desafios tecnológicos, econômicos e regulatórios. Entre os desafios tecnológicos, destacaram-se a variabilidade das características da matéria-prima e a necessidade de infraestrutura adicional. Os desafios econômicos incluem a viabilidade financeira de novas tecnologias e os altos custos operacionais. Os desafios regulatórios envolvem lacunas legais que dificultam a adoção de práticas de circularidade no setor de saneamento básico.

Para superar esses desafios, é necessário adotar uma abordagem integrada e colaborativa, que envolva diferentes setores e stakeholders. A inovação tecnológica, a adaptação regulatória e o compromisso com a viabilidade econômica e socioambiental a longo prazo são fundamentais para promover a sustentabilidade no saneamento básico. Além disso, a experiência internacional pode servir como um guia para adaptar soluções às condições locais, considerando as particularidades do contexto brasileiro.

A integração de práticas de economia circular nas ETEs brasileiras não só promoverá a sustentabilidade e eficiência no saneamento básico, mas também contribuirá para o desenvolvimento de um modelo econômico mais resiliente e sustentável. Alinhada aos objetivos da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da ONU, essa abordagem pode gerar benefícios significativos para o meio ambiente, a economia e a sociedade como um todo, proporcionando um caminho promissor para o futuro do tratamento de esgoto no Brasil. A implementação bem-sucedida requer monitoramento contínuo e análises detalhadas para garantir que essas práticas sejam integradas de forma otimizada, resultando em ganhos ecológicos e econômicos substanciais a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABES. *Coletânea de Notas Técnicas 2: Valoração e gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo. Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2021. Disponível em: < https://abes-dn.org.br/pdf/cadernos/RESA_NT_v2n1_compressed.pdf >.
2. ABES. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2024. ISBN 2764-5576. Disponível em: < <https://abes-dn.org.br/cadernos-tecnicos-revista-esa-ict/> >.
3. ABREU, A. H. M. D., ALONSO, J. M., MELO, L. A. D., LELES, P. S. D. S., SANTOS, G. R. D. *Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de <i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi*. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 24, 2019. ISSN 1413-4152.
4. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. *Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil*. Brasília: 44 p. 2020.
5. ALEMANHA. *Portaria sobre o aproveitamento de lodo de esgoto, mistura de lodo de esgoto e composto de lodo de esgoto*: Ministério Federal da Justiça. 2017.
6. ANÍCIO, S. D. O., CÓNDROR SALAZAR, B. F., FERRAZ, J. A., SILVEIRA, L. D., DICTORO, V. P., MALHEIROS, T. F. *Economia circular em estações de tratamento de esgotos: mapeamento na literatura científica, investigação no contexto das bacias PCJ e ferramenta de tomada de decisão*. v. 13, n. 4, p. 83-102, 2022. ISSN 2179-3565. Disponível em: < <https://doi.org/10.23925/2179-3565.2022v13i4p83-102> >.
7. AUSTRALIAN E NEW ZEALAND BIOSOLIDS PARTNERSHIP. *Australian Biosolids Statistics*. 2020. Disponível em: < <https://www.biosolids.com.au/guidelines/australian-biosolids-statistics> >.
8. BAHGAT, N. T., WILFERT, P., KORVING, L., VAN LOOSDRECHT, M. *Integrated resource recovery from aerobic granular sludge plants*. Water Research, v. 234, p. 119819, 2023/05/01/ 2023. ISSN 0043-1354. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135423002543> >.
9. BITTENCOURT, S. *Agricultural Use of Sewage Sludge in Paraná State, Brazil: A Decade of National Regulation*. v. 3, n. 4, p. 53, 2018. ISSN 2313-4321. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2313-4321/3/4/53> >.
10. BITTENCOURT, S., MATOS, A. T. D., SILVA, B. S. D., OLIVEIRA, F. C., CHAMHUM-SILVA, L. D. A., MIKI, M. K., BICO, A. K. *Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo Nota Técnica 6 – Uso agrícola de biossólido*. v. 2, n. 1, p. 75-87, 2022. ISSN 2313-4321. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2313-4321/3/4/53> >.
11. BONINI, C. S. B., ALVES, M. C., MONTANARI, R. *Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, 2015. ISSN 1415-4366.
12. BRASIL. *Probiogas. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto*. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2015. 183 ISBN 978-85-7958-041-3.
13. BRASIL. *Probiogas. Resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios*. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2016. 50 ISBN 978-85-7958-070-3.
14. BRASIL. *Exemplos de usinas de aproveitamento de biogás*. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2017. Disponível em: < <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/FolhetoprotetosdereferenciaPROBIOGAS.pdf> >.
15. BRESSANI-RIBEIRO, T., MOTA FILHO, C. R., MELO, V. R. D., BIANCHETTI, F. J., CHERNICHARO, C. A. D. L. *Planning for achieving low carbon and integrated resources recovery from*

- sewage treatment plants in Minas Gerais, Brazil*. Journal of Environmental Management, v. 242, p. 465-473, 2019/07/15/ 2019. ISSN 0301-4797. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719305705> >.
16. CABRAL, C. B. G. *Avaliação da Produção de Biogás para Fins Energéticos em Reatores Anaeróbios Tratando Esgoto Sanitário*. 2016. Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
 17. CHAMHUM-SILVA, L. A. *Coletânea de Notas Técnicas 2: Valoração e gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento de esgoto - Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto*. v. 2, n. 1, p. 89-101, 2022. ISSN 2313-4321. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2313-4321/3/4/53> >.
 18. CHERNICHARO, C. A. D. L., RIBEIRO, T. B., PEGORINI, E. S., POSSETTI, G. R. C., MIKI, M. K., SOUZA, S. N. D. *Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 1: Tópicos de Interesse*. Revista DAE, v. 66, p. 5-16, 2018.
 19. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. *Folder EPAR II*. 2018. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/33/2018/08/Folder-EPAR-Capivari-II.pdf> >.
 20. COPASA. *ETE Sustentável*. 2015. Disponível em: < <https://docplayer.com.br/35228671-Ete-sustentavel-copasa-mg.html> >.
 21. DWA. *DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: Bericht der Arbeitsgruppe Sandfänge - Sandfanggutaufbereitung*. Abwasser und Abfall, v. 51, p. 534-536, 2004.
 22. DWA. *Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen*. DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL 2020. Disponível em: < https://www.dwa-bw.de/files/_media/content/PDFs/LV_Baden-Wuerttemberg/Homepage/BW-Dokumente/Homepage%202013/Nachbarschaften/Bundesleistungsnachweis_2020_final.pdf >.
 23. GHAVAM, S., VAHDATI, M., WILSON, I. A. G., STYRING, P. *Sustainable Ammonia Production Processes*. v. 9, 2021-March-29 2021. ISSN 2296-598X. Disponível em: < <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.580808> >.
 24. GS INIMA BRASIL. *Biogás de ETE para geração de energia elétrica - Case da ETE Ribeirão Preto*. 2018. Disponível em: < <https://abconsindcon.com.br/wp-content/uploads/2018/06/6%C2%BA-ENA-Biog%C3%A1s-de-ETE-para-gera%C3%A7%C3%A3o-de-energia-el%C3%A9trica-Case-da-ETE-Ribeir%C3%A3o-Preto.pdf> >.
 25. GUEDES, M. C. *Efeito do lodo de esgoto (bissólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto*. 2000. (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo
 26. MIKI, M. *HIDRÓLISE DO LODO EM DIGESTORES ANAERÓBIOS MESOFÍLICOS: OTIMIZAÇÃO GLOBAL NA RECUPERAÇÃO DE RECURSOS*. 29A. ed. São Paulo: Encontro Técnico AESABESP, 2018.
 27. MITROVIC, D., CHACÓN, M. C., GARCÍA, A. M., MORILLO, J. G., DIAZ, J. A. R., RAMOS, H. M., ADEYEYE, K., CARRAVETTA, A., MCNABOLA, A. *Multi-Country Scale Assessment of Available Energy Recovery Potential Using Micro-Hydropower in Drinking, Pressurised Irrigation and Wastewater Networks, Covering Part of the EU*. v. 13, n. 7, p. 899, 2021. ISSN 2073-4441. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/7/899> >.
 28. NAGPAL, H., SPRIET, J., MURALI, M. K., MCNABOLA, A. *Heat Recovery from Wastewater—A Review of Available Resource*. v. 13, n. 9, p. 1274, 2021. ISSN 2073-4441. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/9/1274> >.

29. POSSETTI, G., RIETOW, J., COSTA, F., WAGNER, L., LOBATO, L., BRESSANI RIBEIRO, T., MELO, D., REIS, J., CHERNICHARO, C. *Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano*. Revista DAE, v. 66, p. 73-89, 11/01 2018.
30. RICHARDSON, K., STEFFEN, W., LUCHT, W., BENDTSEN, J., CORNELL, S. E., DONGES, J. F., DRÜKE, M., FETZER, I., BALA, G., VON BLOH, W., FEULNER, G., FIEDLER, S., GERTEN, D., GLEESON, T., HOFMANN, M., HUISKAMP, W., KUMMU, M., MOHAN, C., NOGUÉS-BRAVO, D., PETRI, S., PORKKA, M., RAHMSTORF, S., SCHAPHOFF, S., THONICKE, K., TOBIAN, A., VIRKKI, V., WANG-ERLANDSSON, L., WEBER, L., ROCKSTRÖM, J. *Earth beyond six of nine planetary boundaries*. v. 9, n. 37, 2023. Disponível em: < <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.adh2458> >.
31. RUIKEN, C. J., BREUER, G., KLAVERSMA, E., SANTIAGO, T., VAN LOOSDRECHT, M. C. M. *Sieving wastewater – Cellulose recovery, economic and energy evaluation*. Water Research, v. 47, n. 1, p. 43-48, 2013/01/01/ 2013. ISSN 0043-1354. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135412006112> >.
32. SANEPAR. *Dados obtidos diretamente com a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR)*. 2024.
33. SANTOS, F. E. V., KUNZ, S. H., CALDEIRA, M. V. W., AZEVEDO, C. H. S., RANGEL, O. J. P. *Características químicas de substratos formulados com lodo de esgoto para produção de mudas florestais*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, 2014. ISSN 1415-4366.
34. SCHEUER, A., SALATA, C. H. K., RODRIGUES, M., COSTA, B. J. *Geração de energia elétrica a partir de biogás produzido em estações de tratamento de esgoto*. (Especialização em Energias Renováveis). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
35. SGRH - SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Deliberação CRH n° 266 de 28 de abril de 2022 (Publicada no DOE em 04/05/2022, página 67) Estabelece diretrizes para o reúso direto não potável de água proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário (ETEs) de sistemas públicos para fins urbanos*. 2022.
36. SILVA, W. R., POAGUE, K. I. H. M., NUNES, J. C. S. *ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO COMERCIAL DE AREIA RETIDA NO TRATAMENTO PRELIMINAR DA ETE ONÇA –MG*. Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 4, n. 4, p. 445-449, 2018.
37. SYNREFORM. *Hydrogen Production*. 2023. Disponível em: < <https://www.synreform.com/en/achievements/hydrogen-production> >.
38. TRAZZI, P. A., CALDEIRA, M. V. W., REIS, E. F. D., SILVA, A. G. D. *Produção de mudas de Tectona grandis em substratos formulados com biossólido*. CERNE, v. 20, 2014. ISSN 0104-7760.
39. USEPA. *Basic Information about Biosolids*. 2021. Disponível em: < <https://www.epa.gov/biosolids/basic-information-about-biosolids> >.