

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PATRINI DANIELLE GALIANI

APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES PARA A PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE E MITIGAÇÃO DE
EMISSIONES NO BRASIL

CURITIBA

2025

PATRINI DANIELLE GALIANI

APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES PARA A PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE E MITIGAÇÃO DE
EMISSIONES NO BRASIL

Artigo apresentado à disciplina do Trabalho Final de Curso como requisito parcial à conclusão do Curso de MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias (PECCA), Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Nicolas Berhorst

Curitiba
2025

Aproveitamento do biogás de Estação de Tratamento de Efluentes para a produção de eletricidade e mitigação de emissões no Brasil

Patrini Danielle Galiani

RESUMO

Este estudo mede o impacto do aproveitamento progressivo do biogás gerado nos reatores anaeróbios e na digestão de lodo em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), com foco na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e no atendimento à demanda elétrica dessas unidades. Para isso, foram realizadas projeções de consumo energético e emissões de GEE no período de 2025 a 2050, considerando diferentes cenários de utilização do biogás como fonte estratégica de energia para a sustentabilidade do setor de saneamento no Brasil. Os resultados apontam que a adoção de medidas de baixo carbono no saneamento, como o aproveitamento energético do biogás para atender à demanda elétricas das ETEs, se constituiria em importante fonte de receitas para a viabilização de empreendimentos. Além de reduzir custos operacionais das estações com a aquisição de eletricidade, poderiam ser obtidas receitas adicionais com a venda de excedente elétrico ao Sistema Interligado Nacional. Em relação às emissões de GEE, o aproveitamento do biogás gerado apresenta elevado potencial para que o subsetor de saneamento contribua de maneira significativa para o cumprimento das metas de redução previstas no Plano Setorial de Resíduos Sólidos, vinculado ao Plano Clima. Portanto, o setor de saneamento tem relevante papel para a estratégia nacional de mitigação das mudanças climáticas. Contudo, embora a produção de energia a partir de efluentes contribua para a redução das emissões, essa medida, isoladamente, não resolve os desafios enfrentados pelos empreendimentos voltados à universalização do saneamento básico.

Palavras-chave: biogás; estações de tratamento de esgotos; reatores anaeróbios; projeções de consumo energético; redução de gases de efeito estufa.

ABSTRACT

This study measures the impact of the progressive use of biogas generated in anaerobic reactors and sludge digestion in Sewage Treatment Plants (STPs), focusing on reducing greenhouse gas (GHG) emissions and meeting the electrical demand of these units. To this end, projections of energy consumption and GHG emissions were made for the period from 2025 to 2050, considering different scenarios for the use of biogas as a strategic energy source for the sustainability of the sanitation sector in Brazil. The results indicate that the adoption of low-carbon measures in sanitation, such as the use of biogas energy to meet the electricity demand of STPs, would constitute an important source of revenue for the viability of projects. In addition to reducing the stations' operating

costs with the purchase of electricity, additional revenue could be obtained from the sale of surplus to the electricity grid. In relation to GHG emissions, the use of biogas generated has high potential for the sanitation subsector to contribute significantly to meeting the reduction targets set out in the Solid Waste Sector Plan, linked to the Climate Plan. Therefore, the sanitation sector plays an important role in the National Strategy for Climate Change Mitigation. However, although energy production from effluents contributes to reducing emissions, this measure alone does not solve the challenges faced by projects aimed at universalizing basic sanitation.

Keywords: biogas; sewage treatment plants; anaerobic reactors; energy consumption projections; mitigation of greenhouse gases.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	7
3 MATERIAIS E MÉTODOS	12
4 RESULTADOS.....	18
5 CONCLUSÃO.....	22
REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos, com respectivos consumos de energia e emissões de gases de efeito estufa (GEE), apresentam interações significativas com outras atividades econômicas. A produção de resíduos se dá, principalmente, nos setores agropecuário, industrial e residencial. O esgoto doméstico e os efluentes, em particular dos segmentos industriais de alimentos e bebidas e papel/celulose, detêm grande potencial de emissões de CH_4 justamente por se configurarem em efluentes de alto grau de conteúdo orgânico. Os esgotos domésticos são fontes também de emissões de N_2O em função do conteúdo de nitrogênio na alimentação humana.

No Brasil, o setor de saneamento ainda carece de significativos avanços, sobretudo no que diz respeito ao potencial aproveitamento energético associado ao tratamento de esgotos sanitários. A maior parte das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), quando recupera o biogás, simplesmente realiza a queima antes de lançá-lo para a atmosfera, desperdiçando o seu potencial energético e seus eventuais benefícios econômicos, sociais e ambientais. Ou seja, além do aproveitamento de biogás de ETE para geração de eletricidade, podem ser destacados outros cobenefícios do biogás, como: geração de emprego e renda associados à implementação e gestão da atividade; segurança e diversificação da matriz energética; aumento das receitas condicionado à venda do excedente elétrico; benefícios ao meio ambiente (redução de emissões de metano) e à saúde humana em virtude do tratamento dos efluentes (MCTIC, 2017).

Em um contexto que o Brasil se compromete a cumprir metas crescentes de redução de emissões nos diferentes setores da economia, tendo em vista os compromissos assumidos pela Contribuição Nacionalmente Determinada ao Acordo de Paris (NDC), o setor Saneamento (MCTI, 2024) de subsetor de Tratamento e Despejo de Águas Residuárias, terá um papel a ser cumprido. Mais do que isso, o segmento ainda é marcado, sobretudo em médias e pequenas cidades, pela presença do setor público na gestão das ETEs. Sabidamente, a gestão municipal enfrenta crescente deterioração para o cumprimento das metas fiscais, o que inclusive tem suscitado um processo de privatização do saneamento, sobretudo em grandes cidades.

Este trabalho tem como objetivo, mensurar o impacto do aproveitamento gradual do biogás coletado nos reatores anaeróbios e na digestão de lodo em ETEs, com vistas a atender a demanda elétrica e mitigar emissões de GEE. Para tanto, são realizadas projeções de demanda elétrica e emissões de GEE em ETEs de 2025 a 2050, segundo diferentes cenários de adoção do aproveitamento do biogás como insumo energético estratégico para a viabilidade do setor Saneamento no Brasil. Para elaborar o estudo, é empregada a técnica de cenarização, o que envolve a construção de um cenário de linha de base, ou seja, sem a adoção do aproveitamento energético, assim como cenários de baixo carbono que consideram diferentes patamares de recuperação energética do biogás gerado nas ETEs do país.

O tratamento de efluentes domésticos e industriais lida com uma problemática complexa que conjuga elementos energéticos, ambientais e financeiros. A eletricidade demandada geralmente se traduz em um custo para o saneamento, assim como ocorre a emissão de GEE devido à carga orgânica presente nas águas residuárias a serem manejadas. Nesse contexto, o estudo visa subsidiar o setor Saneamento com estimativas do potencial de aproveitamento do biogás nas ETEs, o que lhe permitiria lidar com o passivo ambiental associado à carga orgânica dos efluentes, bem como evitar gastos com a aquisição de eletricidade junto ao *grid*.

Para tanto, a segunda seção deste estudo apresenta-se inicialmente a revisão da literatura, na qual são discutidos os principais conceitos teóricos de estudos que fundamentam a temática abordada, permitindo a contextualização do problema. Na sequência, são listados os procedimentos metodológicos adotados para a coleta e análise dos dados, bem como o delineamento da pesquisa e os critérios utilizados.

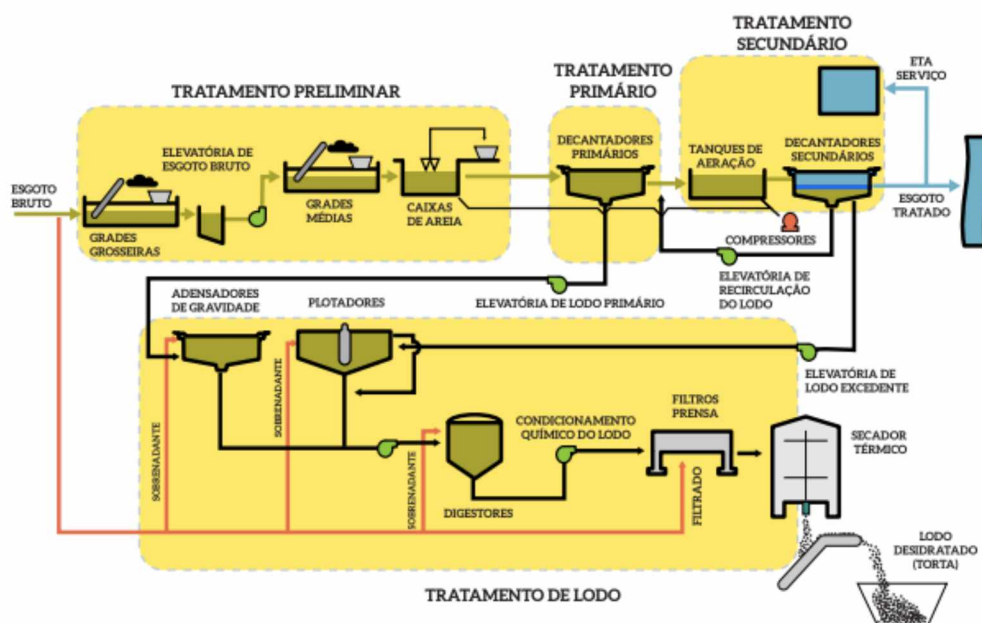
2 REVISÃO DA LITERATURA

De acordo com a Resolução Conama 430/2011 (BRASIL, 2011), “efluente” é a denominação dada às águas residuárias do setor industrial, já previamente tratadas na própria indústria até o ponto em que possam ser misturadas com o esgoto (águas residuárias residenciais e do segmento comércio/serviços).

Somente quando os patamares de contaminantes forem atendidos, o líquido passa a se chamar “efluente” e a indústria pode despejar na rede de coleta de águas residuárias da cidade. Ainda segundo a Resolução, “esgotos sanitários” é a denominação genérica para despejos líquidos residenciais, comerciais, águas de infiltração na rede coletora, os quais podem conter parcela de efluentes industriais e efluentes não domésticos. A composição do esgoto sanitário depende de vários fatores que, por sua vez, oscilam regionalmente ou em função da classe social de um determinado estrato da população (Von Sperling, 1996).

A escolha dos métodos de tratamento de esgoto mais indicados para cada caso deve levar em consideração três aspectos fundamentais: os limites para poluentes estabelecidos na legislação ambiental, a capacidade de autodepuração do curso de água receptor e as características do esgoto bruto a ser tratado. As estações de tratamento de esgoto no Brasil tipicamente se dividem nos módulos representados na Figura 1 (MCTIC, 2017).

FIGURA 1 – ESQUEMA USUAL DE UMA ETEs.



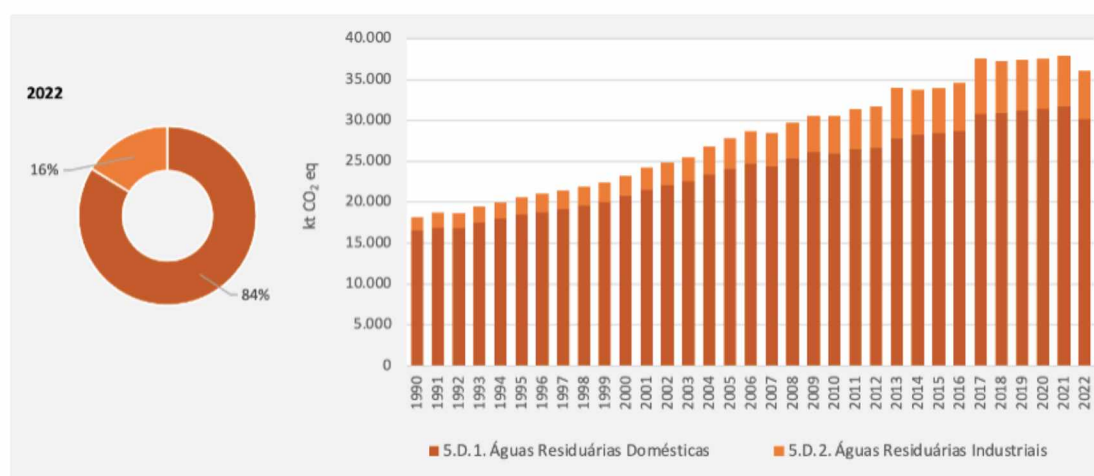
FONTE: MELLO, 2007.

Os efluentes líquidos residenciais podem ser tratados nas ETEs por métodos aeróbios (geralmente produzem muito pouco ou nenhum metano) ou anaeróbios (produzem metano). Como subproduto do tratamento de esgoto urbano, surge o lodo, que também exige beneficiamento (MCTIC, 2017). No estudo realizado por Borges e colaboradores (Borges *et al.*, 2009), concluiu-se

que o sistema simplificado empregado, de tratamento de esgotos e para o tratamento de lodos excedentes, composto por reator UASB + reservatório de biogás + reator térmico, apresenta-se como uma promissora alternativa para o emprego do biogás gerado em sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos e para o tratamento de lodos excedentes, mostrando-se de potencial relevância para o Brasil e para países em desenvolvimento.

Segundo o Relatório do Inventário Nacional - 1990-2022 (MCTI, 2024), o Subsetor Tratamento e Despejo de Águas Residuárias contabiliza as emissões de CH₄ e N₂O. O metano é emitido em ambientes anaeróbios e as emissões estão relacionadas com a quantidade de material orgânico degradável presente no efluente, bem como a temperatura do local e o tipo de tratamento utilizado. Por sua vez, as emissões de N₂O estão associadas com a degradação do nitrogênio presente no efluente, por meio do processo de nitrificação e desnitrificação (Shukuru *et al.*, 2025). No relatório, a categoria de emissões foi subdividida em Águas Residuárias Domésticas (5.D.1) e Águas Residuárias Industriais (5.D.2). As emissões pelo Tratamento e Despejo de Águas Residuárias foram estimadas em 36.056 kt CO₂ eq em 2022, com redução de 4% se comparado com 2020. A categoria Águas Residuárias Domésticas foi a mais representativa, com emissão de 30.210 kt CO₂ eq, ou 84% das emissões do subsetor (Figura 2). Para a categoria Águas Residuárias Industriais, as emissões em 2022 foram estimadas em 5.846 kt CO₂ eq (16% do subsetor), também com redução de 4% se comparadas com 2020.

FIGURA 2 – EMISSÕES DO TRATAMENTO E DESPEJO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS, EM kt CO₂ eq POR CATEGORIA, DE 1990 A 2022.



FONTE: MCTI, 2024.

Assim como acontece com o efluente doméstico, as emissões dos efluentes industriais são provenientes da degradação anaeróbia. A matéria orgânica presente nesses efluentes é expressa em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO), e a fração orgânica presente nesses efluentes varia de acordo com os produtos e processos envolvidos. Uma mesma instalação inclui vários e diferentes tipos de efluentes que demandam diferentes tipos de tratamento (MCTI, 2024).

O emprego de um tratamento anaeróbio propicia um excelente balanço energético, pois, além de não demandar energia com agitação ou aeração, os processos anaeróbios têm como subproduto o biogás, que pode ser utilizado para a oferta de energia (MCTIC, 2017). Assim, o biogás se configura como a forma mais importante de aproveitamento energético e, conseqüentemente, como vetor de mitigação de GEE no setor (MCTIC, 2017). As três etapas da digestão anaeróbia são:

1. hidrólise de compostos orgânicos complexos - nessa fase, o material particulado é convertido em compostos solúveis que podem ser hidrolisados em monômeros simples, que são utilizados pelas bactérias que realizam a fermentação;
2. produção de ácidos (acidogênese e acetogênese) – no processo de fermentação, aminoácidos, açúcares e alguns ácidos graxos são degradados. Os principais produtos da fermentação são acetato, hidrogênio, CO₂, propionato e butirato. O propionato e o butirato são fermentados posteriormente para também produzir hidrogênio, CO₂ e acetato.
3. produção de metano (metanogênese) – nessa fase, dois grupos de organismos metanogênicos (*Archaea*) estão envolvidos na produção de metano.

O biogás é uma mistura gasosa produzida a partir da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, composta primariamente de metano e dióxido de carbono, com pequenas quantidades de ácido sulfídrico e amônia. Traços de hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono, carboidratos saturados ou halogenados e oxigênio estão ocasionalmente presentes no biogás (Zanette, 2009).

A composição e o conteúdo energético do biogás podem variar em decorrência do material orgânico e do processo pelo qual é produzido. Em

função do material orgânico que origina o biogás, este pode ser denominado de gás de aterro, gás de lixo, gás de esgoto, gás de lodo, gás de dejetos, dentre outros (MCTIC, 2017). O aproveitamento do biogás, um subproduto da digestão anaeróbia de matéria orgânica presente no esgoto, como fonte de energia, surge como uma alternativa promissora para o setor. O biogás pode ser utilizado para gerar eletricidade e calor, reduzindo a necessidade de energia externa e, consequentemente, as emissões de GEE.

Uma das principais vantagens da produção de energia em ETE relaciona-se ao fato de que toda a eletricidade gerada pode ser consumida no próprio local, sem a interferência de uma rede de distribuição. Adicionalmente, a digestão anaeróbia do lodo de esgoto doméstico pode, em muitos casos, produzir biogás suficiente para atender à demanda de energia necessária para a operação da planta (Barbosa, 2019; Kovalev *et al.*, 2020; Wongarmat *et al.*, 2025; Ingrassia *et al.*, 2024; Islam, 2023).

Para Salomon *et al.* (2009), as principais vantagens da produção de energia elétrica pelo uso do biogás são:

1. geração descentralizada de energia, próximo da fonte consumidora;
2. possibilidade de lucro adicional devido à produção e à comercialização de energia, de acordo com as regras do sistema regulador do mercado de energia elétrica;
3. redução no consumo de eletricidade suprida externamente;
4. potencial de uso em processos para a cogeração de eletricidade e calor;
5. redução das emissões de metano, que é um gás de efeito estufa.

O biogás, por ser um combustível gasoso e renovável, apresenta como uma das suas principais características a flexibilidade em seu uso final. No entanto, essa flexibilidade é maior quanto mais especificado é o biogás. Ou seja, se o biogás for purificado para atingir as especificações do biometano, a flexibilidade será idêntica à do gás natural, enquanto, com a especificação do biogás sem a purificação, essa flexibilidade é mais limitada (MCTIC, 2017).

A despeito da caracterização dos principais conjuntos tecnológicos para aproveitamento energético de resíduos, deve-se destacar que não foram esgotadas todas as possibilidades de abatimento de emissões de GEE pelo setor. Sobretudo em um horizonte de longo prazo, alternativas não consideradas

podem apresentar papel importante para a mitigação, a depender do desenvolvimento do setor de resíduos (MCTIC, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo utiliza a metodologia de cenarização para avaliar o impacto sobre a geração de energia e a redução de emissões, decorrente do aproveitamento do biogás de ETEs. Cenários representam a concepção de um futuro possível, delineado por meio de projeções de variáveis quantitativas, sendo necessário conceber as premissas e condições para que este futuro ocorra (MCTIC, 2017; Rochedo *et al.*, 2018).

Ao nível das premissas gerais é considerado o horizonte de projeção de 2025 a 2050, sendo 2022 o ano-base para a realização das projeções no modelo IPCC Waste Model (IPCC, 2006), tendo como escopo o nível nacional. Adicionalmente, são desenvolvidos dois grupos de cenários de emissões de GEE e de geração elétrica em ETEs:

- i) cenário de linha de base (BAS), em que não ocorre o aproveitamento energético do biogás;
- ii) cenário de baixo carbono (BC), os quais consideram diferentes níveis de aproveitamento de biogás nas estações existentes no Brasil.

O estudo considera diferentes níveis de recuperação ou aproveitamento do biogás para geração elétrica, tendo em vista a heterogeneidade das ETEs nacionais, quais sejam de 25% (BC25), 50% (BC50), 75% (BC75) e 100% (BC100), avaliando estes potenciais de geração elétrica e mitigação de emissões de GEE relativamente ao cenário BAS. Ou seja, dada a incipiência da implantação da medida de baixo carbono no setor, presumiu-se diferentes níveis de implantação do aproveitamento a partir de 2025, podendo atingir estes diferentes patamares (25%, 50%, 75% e 100%) de aproveitamento do biogás produzido nas ETEs para geração elétrica.

Ainda no que se refere às premissas gerais, são utilizados dados do Relatório do Inventário Nacional das Emissões Antrópicas por Fontes e das Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa do Brasil (MCTI, 2024) para calibração do ano-base relativo às emissões do Tratamento e Despejo de

Águas Residuárias no setor Resíduos, assim como para equalização dos fatores de emissão do guia metodológico do IPCC (IPCC, 2006). São consideradas as emissões de CO_2 , CH_4 e N_2O ao tratamento e despejo dos efluentes, com vistas a avaliar o impacto da introdução da medida de recuperação energética do biogás no próprio setor. Ademais, é utilizada a métrica *Global Warming Potential* 100 Anos (GWP-100), contida no quinto relatório de avaliação (AR5) do IPCC, para converter as emissões dos GEE em dióxido de carbono equivalente (IPCC, 2014). Finalmente, utilizam-se projeções de crescimento populacional do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025) para projetar a quantidade de efluentes gerados.

No particular do cálculo das emissões de CH_4 e N_2O , relativamente ao cenário BAS, foram utilizadas as equações 1 a 8, expostas na Tabela 1 (MCTI, 2024). A aplicação das equações segue os seguintes passos:

- Obtenção da proporção do efluente doméstico que é coletado e tratado;
- Obtenção das frações dos tipos de sistemas de tratamento de efluentes domésticos;
- Quantificação do efluente doméstico;
- Quantificação das emissões de CH_4 e N_2O do efluente doméstico;
- Obtenção das produções industriais que contabilizam as emissões a partir do tratamento e despejo de efluentes industriais;
- Obtenção da fração dos tipos de sistemas de tratamento de efluente por tipo de atividade industrial;
- Quantificação do efluente industrial;
- Quantificação das emissões de CH_4 do efluente industrial.

TABELA 1 – EQUAÇÕES PARA ESTIMAR AS EMISSÕES DO SUBSETOR TRATAMENTO E DESPEJO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS.

Equações	GEE	Equação central	Referência
Equação 1	CH ₄	$\text{CH}_4 \text{ emitido efluente doméstico}_T = \left[\sum_{ij} (U_i * T_{ij} * EF_j) \right] * (\text{TOW} - S) - R$	Equação 6.1 (IPCC, 2006, v. 5, cap. 6)
Equação 2	CH ₄ e N ₂ O	EF _j efluente doméstico = B ₀ * MCF _j	Equação 6.2 (IPCC, 2006, v. 5, cap. 6)
Equação 3	CH ₄	TOW doméstico = P * DBO * 0,001 * I * 365	Equação 6.3 (IPCC, 2006, v. 5, cap. 6)
Equação 4	CH ₄	$\text{CH}_4 \text{ emitido efluente industrial}_T = \sum_{ij} (\text{TOW}_k - S_k) * EF_k - R_k$	Equação 6.4 (IPCC, 2006, v. 5, cap. 6)
Equação 5	CH ₄	EF _j efluente industrial = B ₀ * MCF _j	Equação 6.5 (IPCC, 2006, v. 5, cap. 6)
Equação 6	CH ₄	TOW industrial = P _k * W _k * DQO _k	Equação 6.6 (IPCC, 2006, v. 5, cap. 6)
Equação 7	N ₂ O	N ₂ O emitido _T = N _{Efluente} * EF _{Efluente} * $\frac{44}{28}$	Equação 6.7 (IPCC, 2006, v. 5, cap. 6)
Equação 8	N ₂ O	$N_{\text{Efluente}} = (P * \text{Proteína} * F_{\text{NPR}} * F_{\text{NON-CON}} * F_{\text{IND-COM}}) - N_{\text{lodo}}$	Equação 6.8 (IPCC, 2006, v. 5, cap. 6)

FONTE: ELABORADO A PARTIR DE MCTI, 2024.

Onde:

DBO = demanda bioquímica de oxigênio;

EF = fator de emissão;

CH₄ emitido_T = quantidade de CH₄ emitido em efluentes domésticos no ano T (Gg CH₄.ano⁻¹);TOW = massa total de material orgânico na água residuária doméstica/industrial no ano inventariado (kg DBO.ano⁻¹);S = componente orgânico removido na forma de lodo no ano inventariado (kg DBO.ano⁻¹);U_i = população no grupo de renda i no ano inventariado (fração);T_{ij} = grau de utilização do sistema de tratamento/sistema ou caminho de despejo j, por cada fração de grupo de renda i no ano inventariado (fração);

i = grupo de renda, rural ou urbano (fração);

j = tipo de tratamento/sistema ou caminho de despejo (fração);

EF_j = fator de emissão do efluente (kgCH₄kg⁻¹DBO);R = massa de CH₄ recuperado no ano T (kgCH₄.ano⁻¹);

P = população (habitantes);

DBO = DBO *per capita* específica do país (gDBO.hab⁻¹.dia⁻¹);

0.001 = conversão de g para kg de DBO;

I = fator de correção para despejo adicional de DBO industrial na rede de esgoto;

B₀ = capacidade máxima de produção de CH₄ (kgCH₄kg⁻¹DBO);

MCF_j = fator de correção do CH_4 ;

k = setor industrial;

S_k = componente orgânico removido do lodo no ano inventariado ($kgDQOano^{-1}$);

EF_k = fator de emissão da indústria k para cada tratamento/sistema utilizado no ano inventariado ($kgCH_4kg^{-1}DQO$);

P_k = produção industrial total para a indústria do setor i ($Mg.ano^{-1}$);

W_k = efluente gerado ($m^3.Mg$ produto);

DQO_k = demanda química de oxigênio ($kgDQOm^{-3}$);

N_2O emitido T = quantidade de N_2O emitido a partir do tratamento do efluente doméstico no ano T ($Gg N_2O.ano^{-1}$);

$N_{Efluente}$ = nitrogênio do efluente despejado no ambiente aquático ($kg N . ano^{-1}$);

$EF_{Efluente}$ = fator de emissão de N_2O da água residuária despejada ($kgN_2O.kg^{-1} N$);

44/28 = fator de conversão de $kg N_2O-N$ em $kg N_2O$;

P = população (habitantes);

Proteína = consumo anual de proteína *per capita* ($kg.hab^{-1}.ano^{-1}$);

F_{NPR} = fração de nitrogênio na proteína, padrão = 0,16 ($kgN.kg^{-1}$ proteína);

$F_{NON-CON}$ = fator para proteína não consumida adicionada à água residuária;

$F_{IND-CON}$ = fator para proteína comercial e industrial co-dispostos no sistema de coleta; e

N_{Lodo} = nitrogênio removido via lodo ($kgN.ano^{-1}$).

A partir dos dados apresentados no estudo (MCTI, 2024), parâmetros-chave foram estimados para projetar as emissões oriundas do tratamento e despejo de águas residuárias. As Tabelas 2 e 3 foram elaboradas com os dados obtidos pelo Simulador Nacional de Políticas Setoriais e Emissões (SINAPSE) (MCTI, 2025) e IPCC (2006). A Tabela 2 contempla os dados quinquenais relativos ao material orgânico (DBO) per capita do país, assim como a carga orgânica total, tratada e descartada dos efluentes e a Tabela 3 apresenta a matriz de tratamento de efluentes.

TABELA 2 – DADOS QUINQUENAIS DE MATERIAL ORGÂNICO (DBO) PER CAPITA DO PAÍS, ASSIM COMO A CARGA ORGÂNICA TOTAL, TRATADA E DESCARTADA DOS EFLUENTES.

Parâmetros/Anos	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
DBO (gramas/habitante dia)	50,6	51,5	53,1	54,8	56,5	58,2	60
Carga Orgânica (mil t)	3.752	3.895	4.123	4.331	4.518	4.682	4.822
Carga Orgânica tratada (mil m ³)	1.714	1.749	1.851	1.944	2.028	2.102	2.165
Carga Orgânica descartada (mil m ³)	2.037	2.147	2.272	2.387	2.490	2.581	2.658

FONTE: ELABORADO A PARTIR DE MCTI (2025).

TABELA 3 – MATRIZ QUINQUENAL DE TRATAMENTO DE EFLUENTES POR TECNOLOGIAS E MÉTODOS.

Tecnologias e métodos de tratamento (participação) / Anos	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Lodo ativado	3,8%	3,7%	3,7%	3,7%	3,7%	3,7%	3,7%
Reator anaeróbio	11,3%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%
Lagoa anaeróbia	8,6%	8,4%	8,4%	8,4%	8,4%	8,4%	8,4%
Lagoa facultativa	13,4%	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%
Lagoa mista	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%
Lagoa de maturação	4,8%	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%
<i>Wetland</i> / aplicação no solo	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
Fossa séptica de sistema condominial	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%
Sem tratamento	54,3%	55,1%	55,1%	55,1%	55,1%	55,1%	55,1%

FONTE: ELABORADO A PARTIR DE MCTI (2025).

Segundo orientação do IPCC, o fator de correção de metano (MCF) varia de acordo com o tipo de destinação. A metodologia de IPCC (2006) apresenta um valor típico de emissão de metano de 0,6 kg por kg de DBO (EF), porém cada tipo de tratamento apresenta um fator de correção de metano.

As emissões de metano do DBO tratado, são estimadas a partir do produto desta carga orgânica, fatores de correção do gás metano e composição do metano no biogás (Tabela 4), que é gerado na decomposição anaeróbia do esgoto nas ETEs e apresenta elevado potencial energético, devido a elevada porcentagem de metano em sua composição (cerca de 60%).

TABELA 4 – FATORES DE CORREÇÃO DO METANO.

Fatores de correção de metano por tecnologias e métodos de tratamento (MCF)	
Lodo ativado	0,8
Reator anaeróbio	0,8
Lagoa anaeróbia	0,8
Lagoa facultativa	0,2
Lagoa mista	0,2
Lagoa de maturação	0,2
Wetland / aplicação no solo	0,1
Fossa séptica de sistema condominial	0,7
Sem tratamento	0,1

FONTE: ELABORADO A PARTIR DE IPCC (2006).

Para estimar o potencial de produção de eletricidade a partir do biogás, primeiramente é estimada a quantidade de metano produzida pelas tecnologias de lodo ativado e reator anaeróbio, que é obtida pelo produto entre emissões e densidade do metano ($0,65\text{kg/m}^3$). Em seguida, os valores resultantes são multiplicados pelo poder calorífico inferior do metano ($35,9\text{ MJ/Nm}^3$) e uma eficiência de conversão elétrica média igual a 33% (Rosa *et al.*, 2016; Campello *et al.*, 2020). A equação 9 resume a metodologia adotada para estimar o potencial energético do biogás das ETEs do Brasil:

$$\text{Potencial energético do biogás} = Q_{\text{biogás}} * C_{\text{CH}_4} * E_{\text{CH}_4} \quad (\text{Equação 9})$$

Em que:

$Q_{\text{biogás}}$ = produção medida de biogás ($\text{Nm}^3\text{ d}^{-1}$);

C_{CH_4} = concentração de metano do biogás (%);

E_{CH_4} = poder calorífico inferior da combustão do metano.

Nota-se, que os cenários BC consideram a mitigação das emissões de GEE do gás metano que é recuperado por meio do aproveitamento do biogás, tendo em vista que sem a implantação do sistema o gás seria liberado para a atmosfera.

Em última análise, são estimadas as emissões evitadas por patamar de adoção das medidas de aproveitamento do biogás para suprir a demanda de energia das ETEs. Neste caso, é multiplicado o percentual de aproveitamento (25%, 50%, 75% e 100%) pelas emissões de metano nas tecnologias de lodo ativado e reator anaeróbio, e por fim, subtraída as emissões evitadas em cada nível para obter as emissões resultantes nos cenários de baixo carbono.

4 RESULTADOS

Em face ao crescimento populacional previsto pelo IBGE (2025), assim como diante das metas de ampliação dos serviços de coleta e tratamento de esgotos no Brasil do Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab (MCidades, 2025), prevê-se um crescimento das emissões associadas ao setor Saneamento no Inventário Nacional de Emissões de GEE (MCTI, 2024). Conforme MCidades (2015), com o aumento do rigor das legislações ambientais, o setor tende a sofrer, cada vez mais, pressão para aumentar a eficiência dos seus processos de tratamento, tendo como advento ETEs mais mecanizadas e intensivas em energia.

O consumo de energia elétrica representa o segundo maior custo operacional para as prestadoras de serviço de água e esgoto, atrás, apenas, dos gastos com mão de obra (MCTI, 2024), sendo que, em alguns casos, esse consumo já é a maior despesa operacional. A gestão do lodo residual pode representar, em alguns casos, até 60% dos custos operacionais em uma ETE (Andreoli *et al.*, 2001). Diante disso, é imperativa adoção de medidas de aproveitamento energético do biogás para lidar com a mitigação de emissões de GEE e a viabilidade financeira das ETEs.

Para lidar com esta problemática, foram construídos cenários para avaliação dos impactos sobre a geração de energia e a redução de emissões, decorrentes do aproveitamento do biogás nas estações. Mediante a aplicação das equações 1 a 9 e dados das tabelas 1 a 3, foram estimadas em IPCC (2006) e com auxílio de MCTI (2025) inicialmente, as emissões de CH₄ e N₂O e em dióxido de carbono equivalente no cenário sem a adoção de política de aproveitamento energético do biogás (cenário BAS).

A Tabela 5 apresenta estas emissões em 2022 e quinquenalmente de 2025 a 2050. Observa-se que as emissões totais, sem a adoção de práticas de baixo carbono em ETEs, cresceriam 24,5% no período de 2022 a 2050, o que decorre, sobretudo, do crescimento populacional e ampliação das metas dos serviços de coleta e tratamento de águas residuárias domésticas e industriais.

TABELA 5 – EMISSÕES DO SETOR DE TRATAMENTO DE ESGOTO ATÉ 2050 NO CENÁRIO BAS.

Emissões por gases e CO ₂ eq (kt)	Anos						
	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CH ₄	670	688	728	765	798	827	852
N ₂ O	16	17	17	18	18	18	18
CO ₂ eq (GWP-100 AR5)	23.000	23.769	24.889	26.190	27.114	27.926	28.626
Taxa de crescimento das emissões (2022 a 2050)	24,5%						

FONTE: ELABORADO PELA AUTORA.

Conforme argumentado nas seções anteriores deste estudo, o aproveitamento energético do biogás de ETEs se constitui em uma medida viável sob o ponto de vista técnico, a qual permitiria mitigar emissões de GEE e reduzir gastos com a aquisição de eletricidade. Compreende-se, contudo, que a adoção da medida deve considerar diferentes patamares de adoção de aproveitamento energético, tendo em vista diferentes níveis de maturidade e acesso tecnológicos em face à pluralidade de porte e, consequentemente, financeira, da gestão de efluentes nos municípios brasileiros. Por este motivo, foram modelados diferentes níveis de aproveitamento, quais sejam 25%, 50%, 75% e 100%, em face às tecnologias de lodo ativado e reator anaeróbio.

A Tabela 6 e a Figura 3 apresentam as emissões resultantes do aproveitamento do biogás, segundo os cenários BC25, BC50, BC75 e BC100, comparativamente ao cenário BAS. Observa-se que o aproveitamento energético do biogás proveniente de ETEs possui potencial de redução de emissões na faixa de 8,4% a 33,5% nos cenários BC25 e BC100, relativamente ao cenário BAS, em 2050.

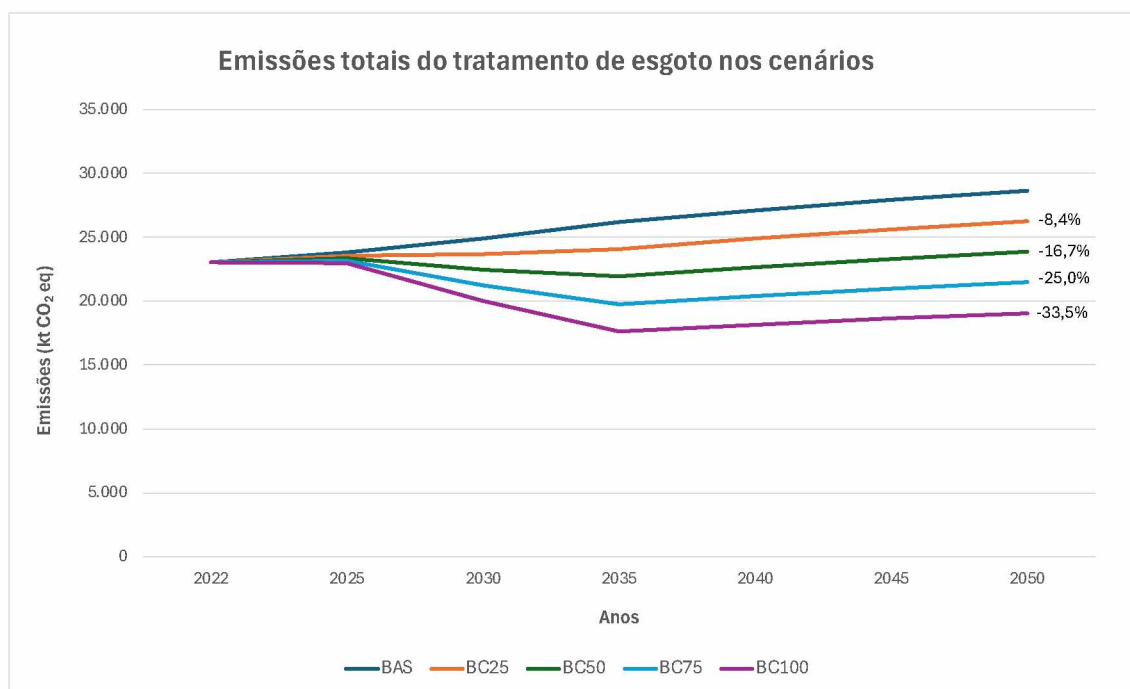
TABELA 6 – EMISSÕES DO SETOR DE TRATAMENTO DE ESGOTO ATÉ 2050 NOS CENÁRIOS BAS, BC25, BC50, BC75 E BC100.

Emissões por gases e CO ₂ eq (kt)	Anos						
	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cenário BAS							
CH ₄	670	688	728	765	798	827	852
N ₂ O	16	17	17	18	18	18	18
CO ₂ eq (GWP-100 AR5)	23.000	23.769	24.889	26.190	27.114	27.926	28.626
Cenário BC25							
CH ₄	670	681	684	688	718	744	766
N ₂ O	16	17	17	18	18	18	18
CO ₂ eq (GWP-100 AR5)	23.000	23.573	23.657	24.034	24.874	25.602	26.218
Cenário BC50							
CH ₄	670	674	641	612	638	661	681
N ₂ O	16	17	17	18	18	18	18
CO ₂ eq (GWP-100 AR5)	23.000	23.377	22.453	21.906	22.634	23.278	23.838
Cenário BC75							
CH ₄	670	667	597	535	558	578	596
N ₂ O	16	17	17	18	18	18	18
CO ₂ eq (GWP-100 AR5)	23.000	23.181	21.221	19.750	20.394	20.954	21.458
Cenário BC100							
CH ₄	670	660	553	458	478	495	510
N ₂ O	16	17	17	18	18	18	18
CO ₂ eq (GWP-100 AR5)	23.000	22.985	19.989	17.594	18.154	18.630	19.050

FONTE: ELABORADO PELA AUTORA.

Interessante notar que em 2035, uma vez adotado os cenários BC25 ou cenário BC100, o potencial de redução de emissões em relação ao cenário BAS seria de 2,2 e 8,6 kt CO₂eq, respectivamente, contribuindo assim entre 31% e 66% da meta de redução de emissões do setor Resíduos proposta na Estratégia Nacional de Mitigação do Brasil (MMA, 2025).

FIGURA 3 – EMISSÕES E POTENCIAL DE MITIGAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS BAS, BC25, BC50, BC75 E BC100 EM 2050.



FONTE: ELABORADO PELA AUTORA.

Por fim, observa-se na Tabela 7 os valores de produção de eletricidade que seriam obtidos mediante o aproveitamento energético do biogás. Considerando o preço médio pago pelo setor pela eletricidade contratada no mercado livre em dezembro/2022 (ano-base adotado pelo estudo), que foi de R\$ 135/MWh (ABRACEEL, 2023), e considerando este valor constante, portanto, subestimando o valor ao longo do tempo, o gasto evitado com eletricidade poderia totalizar R\$ 18,4 milhões em 2025 (BC100) e de R\$ 233 milhões para as ETEs nacionais em 2050.

TABELA 7 – GERAÇÃO DE ENERGIA DECORRENTE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS NOS CENÁRIOS BC25, BC50, BC75 E BC100.

Eletricidade gerada (GWh)	Anos					
	2025	2030	2035	2040	2045	2050
BC25	34,9	221,6	388,1	404,8	419,5	432,1
BC50	69,8	443,3	776,1	809,7	839,1	864,2
BC75	104,7	664,9	1.164,2	1.214,5	1.258,6	1.296,2
BC100	139,6	886,5	1.552,3	1.619,3	1.678,1	1.728,3

FONTE: ELABORADO PELA AUTORA.

5 CONCLUSÃO

O novo marco regulatório do saneamento, introduzido pela Lei 14.026/2020 (BRASIL, 2020), permite a integral privatização e/ou a formação de parcerias público-privadas para a provisão do acesso universal de serviços de água e esgotos no país. A partir disso, observa-se um crescimento na participação de grupos privados na provisão de serviços de saneamento, que atinge 30% dos municípios brasileiros no final de 2024, ou 1.648 cidades ante 291 em 2019 (Oliveira *et al.*, 2025).

Contudo, transcorridos cinco anos da introdução do instrumento, 1.959 municípios do Brasil, sobretudo pequenas cidades, apresentam índices inferiores a 30% de acesso da população a serviço de coleta e tratamento de águas residuárias domésticas e industriais (Oliveira *et al.*, 2025). O principal vetor da falta de cobertura de saneamento, sobretudo, em municípios de pequeno porte, ou mesmo universalidade de atingimento em cidades de grande porte, é a falta de viabilidade econômica da realização dos investimentos em comunidades remotas e carentes.

Neste particular, o presente estudo aponta que a adoção de medidas de baixo carbono no saneamento, como o aproveitamento energético do biogás para atender à demanda elétricas das ETEs, se constituiria em importante fonte de receitas para a viabilização de empreendimentos. Além de reduzir custos operacionais das estações com a aquisição de eletricidade, poderiam ser obtidas receitas adicionais com a venda de excedente elétrico ao Sistema Interligado Nacional (SIN) elétrico, o qual está presente em 98% dos municípios brasileiros (ONS, 2025).

No que se refere às emissões de GEE, o biogás produzido nas estações permitiria ao subsetor, isoladamente, contribuir com significativa parcela das metas de redução de emissões do Plano Setorial de Resíduos do Plano Clima, consequentemente contribuindo para o atingimento da NDC brasileira. Além da reputação ambiental associada à adoção da medida de baixo carbono, a geração de créditos de carbono, uma vez cumpridas as cotas de redução de emissão do setor, permitiria que o setor participasse dos mercados de carbono nacional e internacional, quais sejam o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), recentemente instituído pela Lei 15.042/2024 (BRASIL, 2024), bem

como o mercado de ITMOs (Internationally Transferred Mitigation Outcomes) (UNFCCC, 2025). Nos dois casos, o setor poderia vender os créditos de carbono, obtendo receitas adicionais passíveis de serem revertidas em novos investimentos visando a ampliação do serviço de saneamento.

Portanto, é necessário pensar o setor de saneamento integrado à agenda de mitigação da mudança do clima. Isso não significa dizer que a geração de energia a partir de efluentes, com o cobenefício da redução de emissões, seja suficiente para solucionar o problema de viabilidade dos empreendimentos visando a universalização do saneamento. Aspectos que não foram avaliados neste estudo, como o acesso a biodigestores e a capacitação de mão-de-obra para a produção de biogás e injeção da eletricidade na rede interna e externa de energia, podem ser constituir em entraves para o aproveitamento do biogás para a produção de eletricidade e mitigação de GEE em ETEs.

REFERÊNCIAS

ABRACEEL (2023). Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia. **Empresas de saneamento básico buscam mercado livre de energia para reduzir custos e aumentar eficiência**. Disponível em: <https://abraceel.com.br/press-releases/2023/03/empresas-de-saneamento-basico-buscam-mercado-livre-de-energia-para-reduzir-custos-e-aumentar-eficiencia/>. Acesso em: 21/07/2025.

ANDREOLI, C. V., *et al.* **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001.

BARBOSA, Taísa Andrade. **Produção de energia renovável a partir do biogás em empreendimentos habitacionais: análise técnica, econômica e ambiental visando o desenvolvimento urbano sustentável**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão - SE, 2019.

BORGES, E.S.M. *et al.* **Tratamento térmico de lodo anaeróbio com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo**. *Eng Sanit Ambient*, v.14 n.3, p. 337-346, 2009.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 24/08/2025.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L15042.htm. Acesso em: 24/08/2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Relatório do inventário nacional das emissões antrópicas por fontes e das remoções por sumidouros de gases de efeito estufa do Brasil. Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o>

mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/Relatorio_delInventario_NacionalNIR_2024_PORT.pdf. Acesso em: 14/06/2025.

BRASIL. Ministério das Cidades (MCidades). **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em Estações de Tratamento de Esgoto**, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338580569_Guia_tecnico_de_aproveitamento_energetico_de_biogas_em_estacoes_de_tratamento_de_esgoto. Acesso em: 12/03/2025.

BRASIL. Ministério das Cidades (MCidades). **Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), 2025**. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/plano-nacional-de-saneamento-basico-plansab/arquivos/Versao_Consehos_Resoluo_Alta_Capa_Atualizada.pdf. Acesso em: 27/07/2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Estratégia Nacional de Mitigação. Metas Setoriais de Mitigação: Tabela 12**. Consulta pública, 2025. Disponível em: <https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/1353>. Acesso em: 28/07/2025.

CAMPELLO, L.D., *et al.* **Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy**. *Environ Dev Sustain* 23, 2614–2629, 2021.

INGRASSIA, E.B., *et al.* **When the use of derived wastes and effluents treatment is part of a responsible industrial production: A review**. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 201, 109826, 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Projeções da população: 2000-2070**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html>. Acesso em: 27/07/2025.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Relatório de Síntese (SYR) do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5). IPCC, 2014**. Disponível em: www.ipcc.ch/report/ar5/syr. Acesso em: 18/06/2025.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In: EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**, v. 5, Waste. Japan: IGES, 2006. IPCC, 2006. Disponível em: <https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. Acesso em: 31/05/2025.

ISLAM, A.K. **Domestic and industrial wastewater generation and its energy recovery potential in Bangladesh**. *Cleaner Energy Systems*, v. 6, 100092, 2023.

KOVALEV, A.A., *et al.* **Biohydrogen production in the two-stage process of anaerobic bioconversion of organic matter of liquid organic waste with recirculation of digester effluent**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, p. 26831-26839, 2020.

MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de gestão de resíduos** / organizador Régis Rathmann. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 278 p., 2017.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Relatório do inventário nacional das emissões antrópicas por fontes e das remoções por sumidouros de gases de efeito estufa do Brasil, 2024**. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/Relatorio_delInventario_NacionalNIR_2024_PORT.pdf. Acesso em: 14/06/2025.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Simulador Nacional de Políticas Setoriais e Emissões, 2025**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/simulador-nacional-de-politicas-setoriais-e-emissoes-sinapse>. Acesso em 30/06/2025.

MELLO, E. J. R. **Tratamento de esgoto sanitário: Avaliação da estação de tratamento de esgoto do bairro Novo Horizonte, na cidade de Araguari – MG**. Monografia. União Educacional Minas Gerais – UNIMINAS, Uberlândia - MG, 2007.

OLIVEIRA, G., *et al.* **Ranking do Saneamento no Brasil**. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2025/07/Versao-Final-de-Estudo-da-GO-Associados-Ranking-do-Saneamento-de-2025_Rio-Corrigido-V4.pdf. Acesso em: 23/08/2025.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Sobre o SIN: O SIN em números. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 25/08/2025.

ROCHEDO, P.R.R., *et al.* **The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil**. *Nature Clim Change*, v. 8, 695–698, 2018.

ROSA, A. P., *et al.* **Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira)**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, 315-328, 2016.

SALOMON, K.R., *et al.* **Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil**. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, p. 1101-1107, 2009.

SHUKURU, B.N., *et al.* **Mitigating CH₄ and N₂O emissions from domestic and industrial wastewater**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 210, p. 115-203, 2025.

UNFCCC. United Nations Climate Change. Article 6.2: **Internationally Transferred Mitigation Outcomes (ITMOs)**. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/article-6/article-62>. Acesso em: 26/08/2025.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 3. ed., v. 1, 452 p., 2005.

WONGARMAT, W., *et al.* **Co-digestion of filter cake, biogas effluent, and anaerobic sludge for hydrogen and methane production: Optimizing energy recovery through two-stage anaerobic digestion**. *Carbon Resources Conversion*, v. 8, p. 1-12, 2025.

ZANETTE, André Luiz. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. Dissertação (mestrado). Programa de Planejamento Energético - Universidade Federal do Rio de Janeiro– UFRJ/ COPPE. Rio de Janeiro- RJ, 2009.