

1145 - POTENCIAIS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS EM ETES NO BRASIL

Sebastian Rosenfeldt ⁽¹⁾

Engenheiro Químico formado na Universidade de Ciências Aplicadas FHTW Berlim. Doutor em engenharia sanitária pela Universidade Técnica de Berlim. Co-Gerente de Consultoria e Projetos Especiais na Rotária do Brasil Ltda.

Christoph Julius Platzer

Engenheiro Civil pela Universidade Técnica de Munique, doutor em engenharia sanitária pela Universidade Técnica de Berlim, especialista em tratamento de efluentes, autor de mais de 50 publicações em saneamento, sócio-diretor da empresa Rotária do Brasil Ltda., consultor internacional em diversos países da América Latina e África.

Matthias Barjenbruch

Engenheiro Civil pela Universidade de Hannover. Doutor em Engenharia Sanitária pela Universidade de Hannover. Professor titular na Universidade Técnica de Berlim (TU Berlin). Chefe do departamento de Engenharia Sanitária na TU Berlin. Membro do conselho diretivo da DWA. Especialista em tratamento avançado para remoção de micropásticos e fósforo; Tecnologias anaeróbias. Redução de odores e corrosão em sistemas de esgoto; Eficiência energética; Sistemas descentralizado, Reuso; Gestão de águas pluviais.

Endereço⁽¹⁾: Rua Teodoro Manuel Dias, 421 - Bairro Santo Antônio de Lisboa - Florianópolis – Santa Catarina - CEP: 88050-540 - Brasil - Tel: +55 (48) 3234-3164 - Fax: +55 (48) 3234-3164 - e-mail: sebastian@rotaria.net

RESUMO

O presente trabalho estima o potencial de benefícios econômicos e ambientais decorrentes da instalação de motogeradores em estações de tratamento de esgoto (ETEs), consideradas economicamente viáveis com base no estudo de Rosenfeldt (2024), em um cenário pré-pandêmico, no início de 2020. Após a atualização do inventário das ETEs brasileiras, identificou-se, em dois cenários distintos, que o aproveitamento energético poderia ser implementado em 40 a 52 estações, atendendo uma população entre 24,3 milhões e 25,9 milhões de habitantes. O investimento necessário para essa medida varia de R\$ 488,2 milhões a R\$ 575,6 milhões, com valores presentes líquidos (VPL) estimados entre R\$ 1,47 bilhão e R\$ 1,67 bilhão. Embora a taxa interna de retorno (TIR) individual das instalações varie entre 11,7% e 41,7%, dependendo da potência instalada (entre 191 kW e 2.000 kW), o conjunto das 40 e 52 ETEs analisadas apresentou uma TIR global entre 36,3% e 37,1%. O potencial de geração de energia elétrica situa-se entre 416 e 479 GWh/ano, a depender do cenário, correspondendo a uma fração entre 29% e 34% do consumo de energia elétrica do setor de esgotamento sanitário. Já o potencial de redução nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) varia de 32.745 a 37.736 t_{CO₂-eq}/ano, sendo relativamente modesto, representando cerca de 0,11% das emissões totais do setor.

PALAVRAS-CHAVE: Aproveitamento de Biogás, Eficiência energética, Viabilidade econômica, Co-geração, reator UASB

INTRODUÇÃO

Em 2019, o setor de esgotamento sanitário no Brasil consumiu 1,42 TWh de energia elétrica, o que corresponde a 0,3% do consumo total do país. O custo associado a esse consumo alcançou R\$ 7,1 bilhões, representando 15,4% das despesas operacionais do setor, o segundo maior custo, superado apenas pelos gastos com pessoal (Brasil, 2020; EPE, 2020).

Paralelamente, o setor foi responsável pela emissão de 30,46 $M_{\text{tCO}_2\text{-eq}}$ de GEE, considerando apenas as emissões diretas das atividades de tratamento de esgoto, sem incluir o transporte e o consumo de energia elétrica. Esse valor corresponde a 1,77% das emissões totais do país, levando em conta as emissões oriundas de mudanças no uso da terra e florestas e a redução de áreas de preservação (SEEG, 2021).

Neste contexto, a implantação de sistemas de aproveitamento energético de biogás em ETEs configura-se como uma solução promissora para reduzir tanto os custos operacionais quanto as emissões de GEE, ao substituir parcialmente a energia elétrica proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil. Além disso, tais sistemas podem contribuir para assegurar o fornecimento de energia de emergência, ampliar a oferta de energia e o número de fornecedores, promover a diversificação da matriz elétrica, fortalecer a segurança e a sustentabilidade do abastecimento, reduzir as perdas na distribuição e diminuir a necessidade de investimentos para atender aos picos de demanda do setor energético (Barbosa Filho & de Azevedo, 2013; INEE, 2001; Synwoldt, 2016; Rosenfeldt, 2024).

Uma das alternativas tecnológicas para o aproveitamento do biogás é a utilização de motogeradores para a cogeração de energia elétrica e térmica.

A experiência internacional comprova o potencial do aproveitamento energético do biogás. Na Alemanha, segundo Grägel (2010), a viabilidade econômica da utilização de biogás é alcançada em estações com cerca de 20.000 habitantes, o que impulsionou a ampla adoção dessa tecnologia. Atualmente, 82% do biogás gerado em estações alemãs é convertido em energia elétrica, com um crescimento contínuo da geração, passando de 633 GWh em 1998 para 1.515 GWh em 2019 (Destatis, 2020).

No Brasil, embora o tratamento anaeróbio de esgotos esteja amplamente difundido, o aproveitamento energético do biogás ainda é incipiente. Conforme Chernicharo et al. (2018), o potencial estimado de geração de energia elétrica nas ETEs analisadas é de 108,1 GWh/ano, baseado na premissa de um rendimento elétrico de 30% e uma disponibilidade técnica de 90%. Em outra estimativa, D'Aquino et al. (2021) avaliaram o potencial de produção de biogás e consequente geração de energia, porém sem considerar aspectos de viabilidade técnica e econômica, chegando a um valor superior de 1.180 GWh/ano. Portanto, acredita-se que o potencial real do Brasil situe-se entre as projeções de Chernicharo et al. (2018) e D'Aquino et al. (2021).

Embora o número de instalações ainda seja limitado, já existem aplicações práticas no país. D'Aquino et al. (2021) identificaram 10 ETEs que utilizam biogás para geração de energia, sendo quatro com biogás proveniente da digestão anaeróbia de lodo e seis de reatores UASB.

No contexto brasileiro, Rosenfeldt (2024) determinou para o Brasil um limite inferior de viabilidade econômica para o aproveitamento energético do biogás de estações com digestão anaeróbia de lodo a partir de 66.300 habitantes, e para reatores UASB, dependendo do cenário, entre 104.569 e 156.853 habitantes, considerando o valor mediano da tarifa de energia elétrica em 2020, de R\$ 0,56/kWh.

Diante desse cenário, torna-se relevante reavaliar o potencial de produção e aproveitamento energético do biogás em ETEs no Brasil. Para isso, é necessário demonstrar os possíveis benefícios econômicos e ambientais que podem ser alcançados com a instalação desses sistemas em condições de viabilidade econômica.

OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é apresentar o potencial de benefícios econômicos e ecológicos proporcionado pela instalação de um sistema de aproveitamento energético de biogás através de motogeradores em ETEs com processos anaeróbios no Brasil, considerando exclusivamente a geração de energia elétrica.

METODOLOGIA UTILIZADA

Para demonstrar o potencial econômico e ambiental da implementação do aproveitamento energético do biogás por meio da geração de energia elétrica, foi inicialmente analisado o inventário de estações de tratamento de esgoto (ETEs) no Brasil, apresentado no "Atlas Esgotos" (ANA, 2017).

Considerando que esse inventário se baseia em dados brutos de 2013 e que a atualização de 2019 deixou de fornecer informações sobre a carga orgânica afluyente, essencial para avaliar o potencial de produção de biogás, foi necessário identificar as ETEs passíveis de implantação de sistemas de aproveitamento energético, bem como atualizar suas características operacionais.

A atualização dos dados iniciou-se pela identificação das ETEs que, conforme o "Atlas Esgotos" de 2013, possuíam reatores UASB ou digestores anaeróbios. Como critério adicional, consideraram-se apenas as estações cuja carga orgânica afluyente estivesse acima de 40% do limite mínimo de viabilidade para geração de energia elétrica a partir do biogás, conforme estabelecido por Rosenfeldt (2024). O limite inferior 40% menor foi adotado no decorrer da primeira triagem para também considerar ETEs que poderiam ter registrados um aumento da carga orgânica no período subsequente até 2019.

Quanto ao limite mínimo de viabilidade econômica, adotaram-se os resultados de Rosenfeldt (2024) para dois cenários, baseados no trabalho de Lobato (2011) sobre a produção de biogás em reatores UASB. O cenário pessimista considera as ETEs existentes, que podem apresentar déficit na produção e captação de biogás. Já o cenário típico reflete uma condição que poderia ser alcançada por meio da reforma de reatores UASB existentes ou da construção de novos reatores, com foco na garantia da estanqueidade e, consequentemente, no aumento da captação específica tecnicamente aproveitável.

De acordo com Rosenfeldt (2024), os limites mínimos de carga orgânica afluyente para viabilidade econômica de reatores UASB são de 5.228 kg_{DBO}/d para o cenário típico e 7.843 kg_{DBO}/d para o cenário pessimista, correspondendo, respectivamente, a populações de 104.569 e 156.853 habitantes. Para digestores anaeróbios, a carga mínima considerada é de 3.315 kg_{DBO}/d, equivalente a 66.300 habitantes. É importante destacar que esses limites se referem exclusivamente à viabilidade de implantação de um sistema de geração de energia em ETEs já existentes, não contribuindo para comparações de viabilidade entre processos alternativos de tratamento.

Os dados atualizados, em especial a carga orgânica afluyente e o consumo de energia elétrica, foram obtidos, sempre que possível, por meio do SNIS ou diretamente junto às companhias responsáveis pela operação das ETEs. Também foi realizado um levantamento da situação de captação e queima de biogás nas ETEs analisadas.

Com essas informações, foram estimadas as quantidades de biogás tecnicamente disponíveis para cada ETE. Para estações com digestores anaeróbios de lodo (DL), adotou-se, com base em Andreoli et al. (2001), uma produção específica de 16,1 NL_{CH₄}/(hab.d). Para reatores UASB, consideraram-se, conforme Lobato (2011), 6,8 NL_{CH₄}/(hab.d) no cenário pessimista e 10,2 NL_{CH₄}/(hab.d) no cenário típico.

Enquanto Lobato (2011) já contemplava em suas estimativas as perdas de metano por redução concorrente de sulfato, sedimentação e dissolução no efluente, para os digestores anaeróbios foram necessárias hipóteses adicionais, conforme DWA (2022). Nestes casos, foi considerada uma perda de 1,0% associada ao escoamento de lodo ascendente nos dispositivos de saída dos digestores. Além disso, para todas as instalações, tanto com reatores UASB quanto com digestores anaeróbios, assumiu-se uma perda adicional de 5% da produção de biogás, atribuída a vazamentos no sistema de coleta e transporte de gás e à combustão incompleta, conforme indicado pelo IPCC (2019).

Para avaliar o potencial econômico, foi atribuída a cada ETE uma planta de aproveitamento energético com potência instalada entre 191 e 2.000 kW_{el}, composta por sistemas de transporte e armazenamento de biogás, unidades de condicionamento de biogás e motogeradores, conforme as configurações descritas por Rosenfeldt (2024).

Neste estudo, considerou-se uma disponibilidade operacional de 90% para as instalações, assumindo funcionamento contínuo. A carga operacional anual em horas de plena carga foi calculada com base na disponibilidade de biogás e nas configurações de motogeradores disponíveis no mercado para cada ETE analisada.

Posteriormente, foram calculados para cada ETE o potencial de geração de energia elétrica, o custo de investimento (CAPEX), o custo de operação e manutenção (OPEX) e as receitas advindas da substituição da energia elétrica adquirida das concessionárias. A análise econômica considerou operação em carga base, com priorização da geração em horários de tarifa de ponta. Para o custo evitado, adotou-se o valor mediano das tarifas de 53 das 131 distribuidoras de energia do país, com base em dados do MME (2020).

Com base nos resultados obtidos para o conjunto das ETEs analisadas, foram calculados o valor presente líquido, a taxa interna de retorno e o grau de autossuficiência energética alcançável.

As premissas adotadas para os cálculos financeiros são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Premissas adotadas para os cálculos financeiros

Parâmetro		Unidade	Valor	Observação
Taxa de desconto		%	8,2	Adotado com base em Tenório (2021)
Taxa Cambial		R\$ por €	4,51538	Cambio de 02/01/2020
Vida útil	Motor-Gerador	anos	20	Estimativa com base em DWA (2012) e Wagner (2000)
	Condicionamento de biogás	anos	10	
	Gasômetro	anos	15	
	Transporte biogás	anos	10	
	Instalações elétricas	anos	20	
	Instrumentação	anos	8	
Autoconsumo de energia elétrica de motogerador		%	3,0	Estimativa com base no Dachs & Rehm (2006)
Custo de energia elétrica		R\$/kWh	0,56	Valor mediano da tarifa de energia elétrica em 2020 (Rosenfeldt, 2024)
Aumento real do custo de energia elétrica		%	2,0	Estimativa com base em ANEEL (2019)
Disponibilidade técnica		%	90	Wiser et al. (2010)

Adicionalmente, a contribuição do aproveitamento do biogás para a mitigação das mudanças climáticas foi avaliada considerando apenas a redução das emissões indiretas de gases de efeito estufa decorrentes da menor demanda por energia elétrica do Sistema Interligado Nacional. Para tal, utilizou-se como base o fator específico de emissão da matriz elétrica brasileira, de 78,8 kgCO₂-eq/MWh (EPE, 2021), além de um autoconsumo interno de energia elétrica pelos motogeradores de 3%, conforme Dachs e Rehm (2006).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Do total de cerca de 3.100 ETEs considerados no inventário “Atlas Esgotos” (ANA, 2017), foram identificadas, para os dois cenários analisados, 40 e 52 ETEs cujos processos empregados e cargas orgânicas aplicadas, atualizadas neste estudo (Tabela 2), apresentam condições econômicas favoráveis para a instalação de sistemas de aproveitamento energético de biogás.

Aproximadamente 63% dessas instalações utilizam variantes de processo que incluem reatores UASB, enquanto os 37% restantes correspondem a estações com digestão anaeróbia de lodo. Em termos de população atendida, a proporção se inverte, onde as estações com digestão anaeróbia representam 63% do total.

Ao adotar uma produção de metano tecnicamente aproveitável de 16,1 NL_{CH₄}/(hab.d) para os digestores de lodo, com base nas considerações de Andreoli et al. (2001), e de 6,8 a 10,2 NL_{CH₄}/(hab.d) para os reatores UASB, conforme os trabalhos de Lobato (2011) e Cabral et al. (2016), foi possível estimar a produção de biogás nas ETEs. Acrescentando a essas estimativas uma perda de 5% no sistema a jusante do processo de tratamento, podem ser atribuídas potências elétricas de geração compatíveis a cada ETE.

Tabela 2: Supervisão sobre as ETEs passíveis de instalação de sistema de aproveitamento energético de biogás

Processo de tratamento	Cenário pessimista *		Cenário típico **	
	Número ETEs	População Contribuinte [hab]	Número ETEs	População Contribuinte [hab]
Lodo ativado com digestor de lodo ***	14	15.080.927	14	15.080.927
Filtro biológico percolador com digestor de lodo	1	104.663	1	104.663
Reator UASB	2	1.545.844	3	1.689.768
Reator UASB com lodo ativado	8	2.862.691	12	3.408.179
Reator UASB com filtro biológico percolador	2	1.021.682	3	1.163.554
Reator UASB com tratamento físico/químico	7	1.875.825	10	2.249.970
Reator UASB com lagoa aerada	3	1.072.357	4	1.200.086
Reator UASB com lagoa facultativa/polimento/maturação	3	700.421	5	981.678
Total	40	24.264.409	52	25.878.823

* Critério para ETEs com reatores UASB e carga afluente > 7.843 kg_{BSSB}/d

** Critério para ETEs com reatores UASB e carga afluente > 5.228 kg_{BSSB}/d

*** Critério para ETEs com digestor de lodo e carga afluente nos dois cenários > 3.315 kg_{BSSB}/d

Na Figura 1 é apresentada a distribuição das plantas conforme a potência elétrica instalada. No caso das ETEs que apresentaram potencial superior a 2.000 kW_{el}, adotou-se uma modulação.

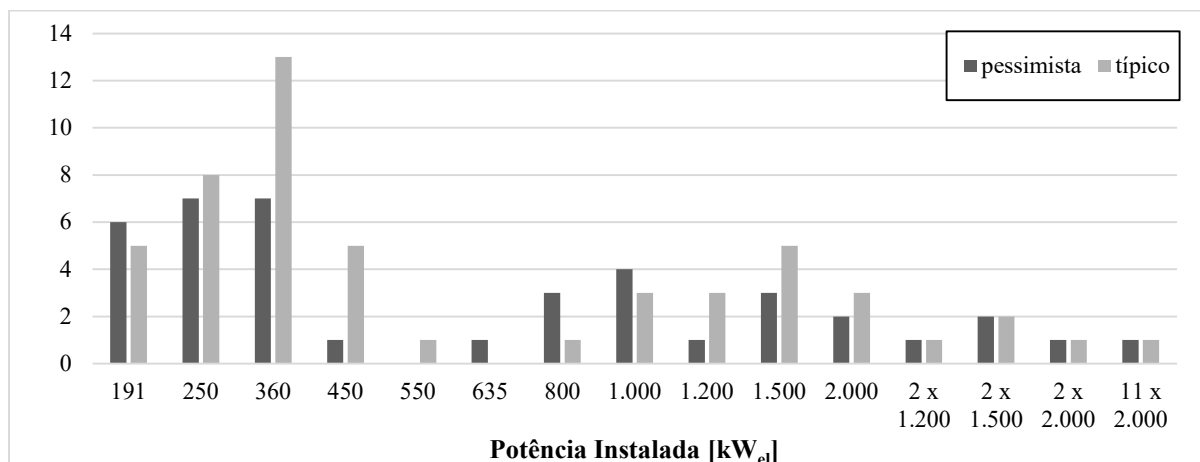


Figura 1: Distribuição das plantas conforme potência elétrica instalada

A instalação dos sistemas de geração de energia nas ETEs selecionadas requer, de acordo com as premissas adotadas, um volume de investimento entre R\$ 488,2 milhões e R\$ 575,6 milhões, dependendo do cenário. Os custos de operação e manutenção foram estimados entre R\$ 70,8 milhões e R\$ 82,0 milhões anuais, enquanto as receitas previstas variam de R\$ 236,0 milhões a R\$ 272,0 milhões anuais.

Com base nos custos e receitas apresentados na Tabela 3, obtém-se, dependendo do cenário, um valor presente líquido de R\$ 1,467 bilhões ou R\$ 1,673 bilhões, e uma taxa interna de retorno de 37,1% ou 36,3%. É importante destacar que, para instalações individuais, a taxa interna de retorno (TIR) varia entre 11,7% e 41,7%, dependendo da potência instalada, que pode variar entre 191 kW e 2.000 kW.

Considerando o autoconsumo interno dos motogeradores de 3% (Dachs & Rehm, 2006), estima-se um potencial de geração de energia elétrica de 416 GWh/ano no cenário pessimista e de 479 GWh/ano no cenário típico. A geração de energia elétrica per capita varia de 17,1 a 18,5 kWh/(hab.d), dependendo do cenário. Em relação ao consumo total do setor de esgotamento sanitário de 1,42 TWh/ano, o potencial corresponde a uma parcela entre 29% e 34%.

Os potenciais de geração de energia elétrica projetados neste estudo superam significativamente a estimativa de Chernicharo et al. (2018), que foi de 108,1 GWh/ano para seis estados e o Distrito Federal, sem considerar a produção advinda da digestão anaeróbia de lodo. Por outro lado, os resultados aqui obtidos são inferiores à projeção de 1.180 GWh/ano apresentada por D'Aquino et al. (2021), o que se justifica pelo fato de este estudo ter considerado os resultados da análise de viabilidade econômica realizada por Rosenfeldt (2024).

Tabela 3: Resumo de Custos, receitas e resultados da avaliação da viabilidade econômica e dos benefícios não monetários

Parâmetro		Cenário pessimista	Cenário típico
Custo de investimento CAPEX [R\$]	8 anos de vida útil	11.488.215	14.041.151
	10 anos de vida útil	48.527.973	57.409.369
	15 anos de vida útil	42.867.679	51.538.769
	20 anos de vida útil	385.289.544	452.624.874
	Total	488.173.410	575.614.163
Custo de operação e manutenção OPEX [R\$/a]		70.771.812	81.960.271
Receitas [R\$/a]		235.983.971	272.031.421
Valor presente líquido [R\$]		1.467.080.995	1.673.063.554
Taxa interna de retorno [-]		37,1 %	36,3 %
Potencial de geração de energia elétrica [GWh/a]		416	479
Potencial de geração de energia elétrica [kWh/(hab.d)]		17,1	18,5
Redução de emissões de GEE [tCO ₂ -eq/a]		32.745	37.736
Grau de autossuficiência de energia elétrica [%]		68	78

Ao analisar as ETEs cujo potencial de geração de energia elétrica é inferior ao seu consumo próprio, observa-se que elas atingiriam graus de autossuficiência elétrica de 68% e 78%, conforme o cenário. No cenário pessimista, 20 ETEs produziriam mais energia do que consomem; no cenário típico, esse número sobe para 34 ETEs.

O elevado número de ETEs que produziriam mais energia elétrica do que consomem pode ser explicado pelos processos de tratamento empregados. Aproximadamente 40% do esgoto afluente das ETEs analisadas é tratado por tecnologias que demandam pouca ou nenhuma energia elétrica. Essas ETEs utilizam processos combinados envolvendo reatores UASB e outras tecnologias, com exceção da combinação com lodos ativados, apresentando consumo mediano de 2,0 kWh/(hab.ano). Em comparação, as ETEs analisadas que operam com lodos ativados e digestores anaeróbios (DL) apresentaram consumo mediano de 18,8 kWh/(hab.ano), enquanto aquelas que combinam reatores UASB com lodos ativados apresentaram consumo de 17,1 kWh/(hab.ano) (Figura 2)

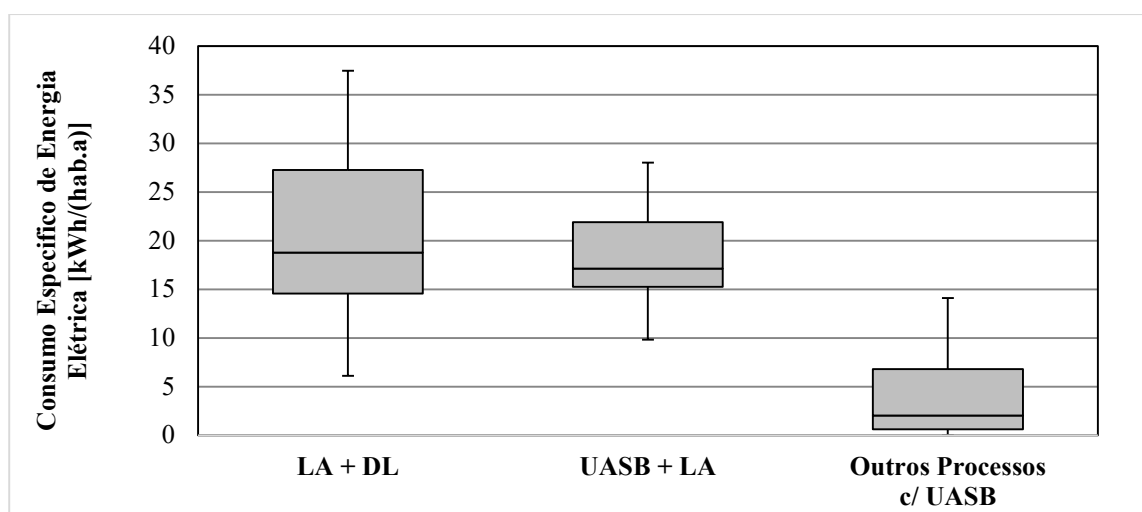


Figura 2: Consumo específico de energia elétrica por arranjo tecnológico de tratamento de esgoto

Em termos ambientais, o benefício traduz-se na redução de emissões de GEE pela substituição de energia elétrica proveniente do SIN. Considerando o fator de emissão de 78,8 kgCO₂-eq/MWh (EPE, 2021), as reduções estimadas são de 32.745 tCO₂-eq/ano para o cenário pessimista e 37.736 tCO₂-eq/ano para o cenário típico.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho demonstrou o potencial de benefícios econômicos e ambientais a partir da análise de uma composição amostral de 40 ETEs no cenário pessimista e 52 ETEs no cenário típico, atendendo, respectivamente, uma população de 24,3 milhões e 25,9 milhões de habitantes, o que corresponde a aproximadamente 12% da população brasileira.

A projeção do potencial de geração de energia elétrica dessas ETEs, variando entre 416 e 479 GWh/ano, pode ser considerada significativa, por representar de 29% a 34% do consumo total de energia do setor de esgotamento sanitário. Este resultado expressivo deve-se, principalmente, ao fato de que a maioria das ETEs brasileiras emprega tecnologias com baixo grau de mecanização. Por outro lado, a redução nas emissões de GEE, variando entre 32.745 e 37.736 tCO₂-eq/ano, representa apenas cerca de 0,11% das emissões totais do setor, reflexo da predominância das emissões diretas de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (Rosenfeldt, 2024).

O estudo adotou uma escala mínima para viabilidade econômica entre 104.569 e 156.853 habitantes, considerando o custo médio da energia elétrica no Brasil e, para os reatores UASB, baseadas em uma captação específica entre 6,8 e 10,2 NL_{CH₄}/(hab.d), conforme dois cenários idealizado por Lobato (2011). Ao alcançar uma captação de biogás superior ou considerando variações nas tarifas de energia em ETEs específicas, pode-se alterar a composição da amostra e consequentemente o potencial de benefícios na escala nacional.

Adicionalmente, deve-se considerar que o potencial de benefícios pode aumentar à medida que se expanda a cobertura de tratamento de esgoto, dado que 49,2% da população brasileira ainda não dispõe desse serviço.

Recomenda-se a realização de estudos de instalações existentes para investigar os custos reais de operação e manutenção, a disponibilidade técnica e o grau de aproveitamento energético sob condições brasileiras, considerando que este estudo se baseou em estimativas teóricas.

Considerando que a avaliação de viabilidade econômica foi realizada com base em plantas modelo utilizando motogeradores importados, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas com plantas em escala real, empregando motogeradores de fabricação nacional, com foco no rendimento elétrico, durabilidade, confiabilidade e custos de operação e manutenção.

Uma vez que este estudo foi desenvolvido com base em um cenário pré-pandêmico de 2020, recomenda-se a atualização dos custos e receitas, a fim de confirmar a escala mínima de viabilidade econômica atual para sistemas de aproveitamento energético de biogás no Brasil, bem como o potencial associado.

Por fim, considerando a existência de outras estratégias potenciais para o aproveitamento energético do biogás, como o uso predominantemente térmico para a secagem de lodo, a produção de biometano para injeção em redes de gás ou para uso veicular, e até mesmo a geração de hidrogênio verde, recomenda-se a realização de estudos comparativos detalhados. Esses estudos devem avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de cada alternativa, visando identificar as soluções mais adequadas para diferentes contextos operacionais e regionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. Atlas esgotos: despoluição das bacias hidrográficas. Brasília, 2017.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2001.
- ANEEL. Tarifa média por classe de consumo e por região. Brasília, 2019.
- BARBOSA FILHO, W. P.; AZEVEDO, A. C. S. de. Geração distribuída: vantagens e desvantagens. In: II Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia, Belém, 2013.
- BRASIL. 25º Diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2019. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), Secretaria Nacional de Saneamento (SNS), SNIS, 2020.

- CABRAL, C.; CHERNICHARO, C.; ROSENFELDT, S.; HOFFMANN, H.; PLATZER, C.; NEVES, P. N.; BRESSANI-RIBEIRO, T. Resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Programa Probiogás, 2016.
- CHERNICHARO, C.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; GARCIA, G. B.; LERMONTOV, A.; PEREIRA, C. B.; PLATZER, C.; POSSETTI, G. R. C.; MIKI, M. K.; JUDICE, M. A. M.; LEITES, M. A. L.; DA SILVA, M.; ROSSETO, R. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. Revista DAE, v. 66, n. 213, p. 5-19, 2018.
- DACHS, G.; REHM, W. Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung. München: Solarenergieförderverein Bayern e.V., 2006.
- D'AQUINO, C. A.; POSSETTI, G. R. C.; MARIANI, L.; Y., DE LIMA MITO J.; MIKI, R.; NAVARRO, K. C.; FREDDO, A.; MARTINEZ, D. G.; PEREIRA, A. S. Potencial de produção de biogás a partir do tratamento do esgoto: perspectivas para a universalização sustentável dos serviços de esgotamento sanitário no Brasil. São Paulo: ABiogás, 2021.
- DESTATIS. Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas: Deutschland. [S.l.]: Destatis, 2020. Disponível em: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data>. Acesso em: 5 maio 2021.
- DWA. Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen. 8. Aufl. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2012.
- DWA. Merkblatt DWA-M 230-1: Treibhausgasemissionen bei der Abwasserbehandlung: Teil 1: Direkte Treibhausgasemissionen: Messen und Bewerten. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2022.
- EPE. Consumo nacional de energia elétrica na rede por classe. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.
- EPE. Balanço energético nacional 2021: relatório síntese – ano base 2020. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2021.
- GRÄGEL, W. Wirtschaftlichkeit der Gasverwertung auf kommunalen Kläranlagen. Korrespondenz Abwasser, Abfall, v. 57, n. 12, p. 1221-1225, 2010.
- INEE. Notas sobre geração distribuída: introdução. Rio de Janeiro: Fórum de Cogeração, 2001.
- IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 5 – Waste. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.
- LOBATO, L. C. da SILVA. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- MME. Informativo gestão setor elétrico. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020.
- ROSENFELDT, S. Energetische Nutzung von Faulgas in Blockheizkraftwerken auf Kläranlagen in Brasilien: Machbarkeitsstudie am Beispiel mehrerer Anlagen. 2024. Tese (Doutorado) – Technische Universität Berlin, Berlin, 2024.
- SEEG. Emissões de GEE no Brasil. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso em: 2021.
- SYNWOLDT, C. Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien: Technik, Märkte, kommunale Perspektiven. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- TENÓRIO, T. L. de M. Custo médio ponderado de capital (WACC): estudo comparativo da metodologia de cálculo entre empresas do setor de saneamento. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- WAGNER, W. Stellenwert der Nutzungsdauer von Abwasseranlagen unter Kostengesichtspunkten. Korrespondenz Abwasser, v. 47, n. 7, p. 1036-1046, 2000.
- WISER, J. R.; SCHETTLER, J. W.; WILLIS, J. L. Evaluation of combined heat and power technologies for wastewater treatment facilities. Columbus: Columbus Water Works, 2010.