

Economia circular aplicada a estações de tratamento de esgotos: uma análise do potencial de geração de energia na ETE de Passos/MG

Álvaro José Dias

Mestre, UEMG, Brasil.
alvaroj.dias27@gmail.com

Eduardo Meireles

Professora Doutor, UEMG, Brasil.
eduardo.meireles@uemg.br

Ester Feche Guimarães

Professora Doutora, IEA/USP, Brasil.
feche.guimaraes@gmail.com

Jean Lucas Rosa

Mestre, UEMG, Brasil.
Jeanlucas.rosa@hotmail.com

Tatiane Luciano Balliano

Professora Doutora, UFAL, Brasil.
tlballiano@gmail.com

Recebido: 25 de janeiro de 2024

Aceito: 16 de julho de 2024

Publicado online: 25 de agosto de 2024

RESUMO

O trabalho em questão tem como objetivo realizar uma análise dos projetos realizados pela Sabesp no estado de São Paulo, principalmente o de Franca/SP desenvolvido em parceria com o Instituto Fraunhofer que consiste em reutilizar o lodo gerado em suas estações transformando-o em combustível (Biogás) e em adubo para a reciclagem agrícola. Em paralelo também será analisada a ETE da cidade de Passos/MG, para que seja listado e estudado os principais pontos e diferenças, buscando replicar os processos fundamentais dos projetos da Sabesp na ETE da cidade mineira. A metodologia utilizada foi o estudo de caso, onde foram coletados dados quantitativos e qualitativos das estações que foram comparados e embasados por meio de uma revisão bibliográfica a fim de listar processos replicáveis. Nesse sentido, espera-se que o trabalho colabore com a difusão dos conceitos de Economia Circular e auxilie no desenvolvimento sustentável da região, sendo referência para a replicação das boas práticas no saneamento.

PALAVRAS-CHAVE: Saneamento. Resíduos sólidos. Sustentabilidade. Desenvolvimento.

1 INTRODUÇÃO

A Economia Circular surge como resposta à necessidade de revisão do atual sistema de produção linear, estabelecido desde a Revolução Industrial. A discussão ganha destaque a partir dos anos 80, com o Relatório de Brundtland, enfocando a importância de atender às necessidades presentes sem comprometer as gerações futuras. Esse paradigma sustentável propõe uma mudança no ciclo de vida dos produtos, substituindo o modelo linear por um processo que busca restaurar e regenerar, mantendo produtos, componentes e materiais em constante ciclo de produção.

O setor de Saneamento Básico, impulsionado pelo aumento populacional e consequente expansão das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), enfrenta desafios significativos relacionados à gestão do lodo gerado. A urgência dessa questão levou à implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010, visando mitigar a geração e promover o reaproveitamento desses resíduos. No âmbito global, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU estabelecem metas estratégicas para o desenvolvimento sustentável, alinhadas com a preservação dos recursos naturais. No Brasil, a recente Lei nº 14.026 de 2020, conhecida como Marco Legal do Saneamento Básico, representa uma transformação profunda no setor. Destaques incluem a facilitação da entrada de empresas privadas por meio de contratos de concessão, a organização dos municípios em blocos para apoiar cidades menores e a criação do Comitê Interministerial de Saneamento Básico para aprimorar a coordenação entre os órgãos federais atuantes no setor.

Diante da urgência em desenvolver iniciativas sustentáveis no setor de saneamento, este trabalho se propõe a abordar a seguinte questão: Como os princípios da economia circular podem ser implementados na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Passos/MG? O estudo consistirá em realizar um benchmarking das práticas adotadas pela Sabesp e uma análise da viabilidade para aplicação desses processos na ETE de Passos/MG. A pesquisa é orientada pela seguinte problemática: Como os conceitos da economia circular podem ser efetivamente integrados à ETE de Passos/MG?

O objetivo geral foi estudar a aplicabilidade da economia circular com a reutilização do lodo gerado na ETE Passos-MG. E os Específicos são: analisar as iniciativas de economia circular aplicada pela Sabesp – Franca, especialmente a transformação do biogás em energia elétrica e combustível; estabelecer o potencial energético que a ETE de Passos possui em relação a geração estimada de biogás.

2 METODOLOGIA

A metodologia empregada no estudo foi o estudo de caso, utilizando dados qualitativos de eventos reais para explorar fenômenos contemporâneos. O protocolo de pesquisa foi desenvolvido com base em benchmarking, identificando requisitos essenciais para a coleta de dados. As estações de tratamento de esgoto (SAAE e SABESP) foram contatadas para obter dados primários e secundários, integrando-se aos resultados como insumo para o modelo de análise.

2.1 Benchmarking – ETE de Franca (Sabesp)

O trabalho incluiu um benchmarking de produtos e genérico, centrado nas iniciativas da Sabesp em Franca, especialmente seus produtos como biogás e fertilizantes. O objetivo é implementar essa metodologia na estação de tratamento de esgoto de Passos, pertencente à autarquia SAAE. A Estação de Tratamento de Esgoto de Franca da Sabesp foi escolhida como modelo para o benchmarking devido à congruência de seus princípios e objetivos com os propostos pelo projeto, bem como à semelhança com o Plano Municipal de Saneamento de Passos, instituído pela Lei Nº 3.511 em dezembro de 2019. Vale ressaltar que o Plano Municipal de Saneamento de Passos está alinhado com as premissas do Programa Corporativo de ETES Sustentáveis da Sabesp, que visa transformar subprodutos gerados em ETES (biogás, lodo e efluente) em recursos sustentáveis com valor de mercado, considerando seu aproveitamento energético (SABESP, 2019, p.65).

2.2 Estudo para aplicação na geração de energia

O estudo relativo ao Biogás teve como base o projeto feito pela Sabesp de Franca abordado por Miki (2019). Por não existir um levantamento da quantidade de biogás que é gerado pela ETE de Passos o número foi uma estimativa, onde seu cálculo foi feito pelo programa Probio, desenvolvido pela iniciativa ETE Sustentáveis e pela UFMG. Com os dados em mãos foi feita uma análise do potencial de geração de energia da ETE a partir do biogás.

2.2.1 Probio – Modelo Matemático

De acordo com Posseti e Chenicharo (2015, p.22)

Os dados de entrada necessários aos cálculos são: população contribuinte; contribuição *per capita* de esgoto (QPC); vazão média de esgoto afluente ($Q_{méd}$); concentração de demanda química de oxigênio (DQO) total afluente ($CDQO_{total}$); eficiência de remoção de DQO (EDQO); concentração de sulfato no afluente (CSO_4); eficiência de redução de sulfato (ESO_4); coeficiente de produção de sólidos (Y); fator de conversão de STV em DQO ($K_{sólidos}$); fator de supersaturação de CH_4 na fase líquida (F_s); perda de CH_4 na fase gasosa com o gás residual (p_w); outras perdas de CH_4 na fase gasosa (p_o); temperatura operacional do reator (T).

Ainda conforme os autores:

Definidos os dados de entrada, primeiramente são estimadas as parcelas de DQO removida no sistema, convertida em lodo e consumida na redução do sulfato. Com essas parcelas calcula-se a DQO máxima convertida em CH₄ e a consequente produção volumétrica máxima. A fim de se calcular o volume de CH₄ realmente disponível para o aproveitamento energético, o modelo considera as perdas de CH₄ dissolvido no efluente e na fase gasosa com o gás residual, além de outras perdas eventuais na fase gasosa. Por fim, descontadas essas perdas, o potencial energético disponível é calculado. As equações utilizadas para os cálculos de todas as parcelas do balanço de massa da DQO e do potencial de recuperação de energia são apresentadas a seguir (POSSETTI, CHERNICHARO, 2015, p.22).

Para cálculo da DQO removida no sistema é apresentada as equações 1 e 2.

$$DQO_{remov} = Pop \times QPC \times C_{DQO_{total}} \times E_{DQO} \quad (1)$$

$$DQO_{remov} = Q_{méd} \times C_{DQO_{total}} \times E_{DQO} \quad (2)$$

Onde:

- DQO_{remov} = massa diária de DQO removida no sistema ($kgDQO_{remov}d^{-1}$);
- Pop = população contribuinte (hab);
- QPC = contribuição per capita de DQO ($m^3 \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}$);
- $Q_{méd}$ = Vazão média de esgoto afluente ao reator ($m^3 \cdot d^{-1}$);
- $C_{DQO_{total}}$ = concentração de DQO total afluente ($kgDQO \cdot m^{-3}$);
- E_{DQO} = eficiência de remoção de DQO (%).

Já a produção de lodo em reatores UASB (DQO convertida em lodo) são estimadas de acordo com as equações 3 e 4.

$$DQO_{lodo} = Y_{obs} \times DQO_{remov} \quad (3)$$

Onde:

- DQO_{lodo} = massa diária de DQO convertida em lodo ($kgDQO_{lodo}d^{-1}$);
- DQO_{remov} = massa diária de DQO removida no sistema ($kgDQO_{remov}d^{-1}$);
- Y_{obs} = coeficiente de produção de sólidos no sistema ($kgDQO_{lodo}kgDQO_{remov}^{-1}$);

$$Y_{obs} = Y \times K_{sólidos} \quad (4)$$

Onde:

- Y = coeficiente de produção de sólidos ($kgSVT^{-1} \cdot kgDQO_{remov}^{-1}$);
- $K_{sólidos}$ = fator de conversão de STV em DQO ($1,42 \text{ kgDQO}_{lodo}kgSVT^{-1}$);

Percebe-se que a DQO convertida em lodo, calculada pela equação 5, pode ser dividida em duas parcelas: (1) DQO convertida em lodo e retida no sistema e (2) DQO convertida em lodo e perdida junto ao efluente.

Para o cálculo da DQO utilizada pelas BRS na redução de sulfato, utiliza-se as equações 5 e 6, que correspondem a estimativa de carga de sulfato reduzida a sulfeto e a de carga de DQO utilizada na redução de sulfato respectivamente.

$$CO_{SO_4 \text{ convertida}} = Q_{méd} \times C_{SO_4} \times E_{SO_4} \quad (5)$$

Onde:

- $CO_{SO_4 \text{ convertida}} =$ carga de SO_4 convertida em sulfeto ($kgSO_4 \cdot d^{-1}$);
- $Q_{méd} =$ Vazão média de esgoto afluente ao reator ($m^3 \cdot d^{-1}$);
- $C_{SO_4} =$ concentração média de SO_4 no afluente ($kgSO_4 \cdot m^{-3}$);
- $E_{SO_4} =$ Eficiência de redução de SO_4 (%)

$$DQO_{SO_4} = C_{SO_4 \text{ convertida}} \times K_{DQO-SO_4} \quad (6)$$

Onde:

$DQO_{SO_4} =$ DQO utilizada pela BRS na redução de sulfato ($kgDQO_{SO_4} \cdot d^{-1}$);

$K_{DQO-SO_4} =$ DQO consumida na redução de sulfato ($0,667 \text{ kgDQO}/kgSO_4 \text{ convertido}$).

Para a determinação da DQO convertida em CH_4 e presente no biogás, primeiro calcula-se a produção teórica máxima de metano por grama de DQO removida, exposta na equação 7.

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4} \times R \times (273+T)}{P \times K_{DQO} \times 1000} \quad (7)$$

Onde:

- $Q_{CH_4} =$ produção volumétrica máxima de metano ($m^3 \cdot d^{-1}$);
- $DQO_{CH_4} =$ massa diária DQO removida no reator e convertida em metano ($kgDQO_{CH_4} \cdot d^{-1}$);
- $P =$ pressão atmosférica (1atm);
- $K_{DQO} =$ DQO correspondente a um mol de CH_4 ($0,064 \text{ kgDQO} \cdot mol^{-1}$);
- $R =$ constante dos gases ($0,08206 \text{ atm} \cdot L \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$);
- $T =$ temperatura operacional do reator (K)

Depois é feita a determinação da massa diária de DQO convertida em CH_4 por meio da equação 8.

$$DQO_{CH_4} = DQO_{rem} - DQO_{lodo} - DQO_{SO_4^{2-}} \quad (8)$$

A partir da produção volumétrica de CH_4 , pode-se estimar a produção total de biogás, a partir do teor esperado neste, de acordo com a Equação 9.

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (9)$$

Onde:

- $Q_{biogás} =$ produção volumétrica de biogás ($m^3 \cdot d^{-1}$);
- $C_{CH_4} =$ concentração de metano no biogás (% v/v).

Para se obter as concentrações de CH₄ no biogás em função da concentração de DQO utiliza-se as equações a seguir. Na qual para DQO entre 100mg.L⁻¹ e 400mg.L⁻¹ usa-se a equação 14 e para DQO entre 500mg L⁻¹ e 1.000mg L⁻¹ tem-se a equação 10.

$$CCH_4 = 2 \times 10^{-7} DQO^3 - 0,0004 DQO^2 + 0,2333 DQO + 18 \quad (10)$$

$$CCH_4 = 0,0059 DQO + 66,219 \quad (11)$$

Para a definição da DQO convertida em CH₄ e perda dissolvida no efluente e no gás residual é importante pontuar que a equação 12 diz respeito a produção volumétrica máxima de metano, não levando em consideração as perdas de CH₄ dissolvido no efluente ou no gás residual e, também, outras perdas, como vazamentos, purgas de condensado etc. (POSSETTI, CHERNICHARO, 2015) Ainda segundo os autores “quando o intuito do balanço de massa da DQO é estimar o volume de metano efetivamente coletado no interior do separador trifásico e disponível para recuperação de energia, é importante considerar essas perdas a fim de se obter valores mais reais”. Para que seja calculada essas perdas de metano no gás residual e outras perdas, usa-se as equações 12 e 13, respectivamente.

$$Q_{W-CH_4} = Q_{CH_4} \times p_w \quad (12)$$

$$Q_{O-CH_4} = Q_{CH_4} \times p_o \quad (13)$$

Onde:

- Q_{W-CH_4} = perda de metano na fase gasosa, com o gás residual (m³.d⁻¹);
- p_w = percentual de perda de metano na fase gasosa, com o gás residual (%);
- Q_{O-CH_4} = outras perdas de metano na fase gasosa (m³.d⁻¹);
- p_o = percentual de outras perdas de metano na fase gasosa (%).

No modelo matemático do programa, os valores percentuais de perdas de metano são expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores e percentuais de perda de metano.

Tipo de perda de metano	Unidade	Cenário		
		Otimista	Típico	Conservador
Perda com o gás residual (pW)	%	2,5	5	7,5
Outras perdas (pO)	%	2,5	5	7,5

Fonte: Adaptado de Lobato, 2011

Para definir as perdas de metano dissolvido no efluente, usa-se a equação 14.

$$Q_{L-CH_4} = Q_{méd} \times p_L \times f_{CH_4} \times \left(\frac{R \times (273+T)}{P \times K_{DQO}} \right) \quad (14)$$

Onde:

- Q_{L-CH_4} = perda de metano na fase líquida, dissolvido no efluente (m³.d⁻¹);
- $Q_{méd}$ = vazão média de esgoto (m³.d⁻¹)

- p_L = perda de metano na fase líquida, dissolvido no efluente (kg. m^{-3});
- f_{CH_4} = fator de conversão de massa *de metano em massa de DQO* (coeficiente estequiométrico 4,0 kgDQO);

A variável p_L calcula-se por meio da equação 15.

$$p_L = \frac{C_{\text{CH}_4}}{100} \times K_h \times F_s \quad (15)$$

Onde:

- p_L = concentração de metano dissolvido no efluente (mg. L^{-1});
- K_h = constante de Henry ($\text{mg. L}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$);
- F_s = fator de supersaturação de CH_4 na fase líquida;

O fator de supersaturação são pré-determinados, e são mostrados na Tabela 2, variando de acordo com o cenário.

Tabela 2 – Fator de saturação (F_s).

Cenário	F_s
Otimista	1
Típico	1,35
Conservador	1,7

Fonte: Posseti e Chenicharo, 2015

Após determinar-se a produção teórica de metano e as partes referentes as perdas, deve estimar o volume de metano efetivamente coletado no interior de separador trifásico e disponível para recuperação de energia. A equação 16 corresponde a estimativa da produção real de CH_4 .

$$Q_{\text{REAL-CH}_4} = Q_{\text{CH}_4} \times Q_{\text{W-CH}_4} \times Q_{\text{O-CH}_4} \times Q_{\text{L-CH}_4} \quad (16)$$

Onde:

$$Q_{\text{REAL-CH}_4} = \text{produção real de metano disponível para recuperação de energia (m}^3 \cdot \text{d}^{-1}\text{)}$$

Finalmente é possível efetuar o cálculo do potencial energético disponível no biogás efetivamente coletado pelo separador trifásico, ele é feito pela equação 17:

$$PE_{\text{REAL-CH}_4} = Q_{\text{N-REAL-CH}_4} \times E_{\text{CH}_4} \quad (17)$$

Na qual:

- $PE_{\text{REAL-CH}_4}$ = Potencial energético disponível (MJ. d^{-1});
- $Q_{\text{N-REAL-CH}_4}$ = Produção real normalizada de metano ($\text{Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);
- E_{CH_4} = poder calorífico decorrente da combustão do metano ($35,9 \text{MJ. Nm}^3$)

2.3 Caracterização dos locais de estudo

2.3.1 Sabesp

A Sabesp é uma sociedade anônima de economia mista que detém a concessão dos serviços públicos de saneamento básico no Estado de São Paulo. A estrutura acionária inclui 50,3% das ações da Secretaria da Fazenda do Estado de São Paulo, 25,9% na Bolsa de Valores de Nova York e 23,8% no Novo Mercado da B3 em São Paulo.

Com sede em São Paulo (SP), a empresa atende 375 municípios do estado, fornecendo serviços de saneamento. Nas cidades de São Caetano do Sul (SP) e Mogi das Cruzes (SP), na Região Metropolitana de São Paulo, a Sabesp fornece água tratada e esgoto no atacado, enquanto essas cidades são responsáveis pela distribuição de água e coleta de esgoto.

Como signatária do Pacto Global da ONU, a Sabesp promove políticas de responsabilidade social corporativa e desenvolvimento sustentável. A empresa é reconhecida por seu compromisso com a pesquisa e desenvolvimento, destacando-se a destinação de cerca de R\$ 20,5 milhões a projetos de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação em 2020.

De acordo com a empresa

Além da economia circular, nossas frentes estão organizadas em diferentes linhas de projetos para atendimentos das demandas internas, são elas: melhoria de processos de construção e operação de sistemas de água e esgotos; soluções de tratamento de água e esgoto; controle e gestão de ativos; processos de geração de energia limpa e renovável; eficiência energética; tecnologias para relacionamento com o cliente; e redução de perdas (SABESP, 2020, p.77).

No município de Franca, a Sabesp iniciou seus serviços em março de 1977. A cidade é abastecida pela Estação de Tratamento de Água e o esgoto é processado em nove sistemas: Franca, Luiza, Paulistano I, Paulistano II, City Petrópolis, Aeroporto, Palestina, São Francisco e Morada do Verde.

2.3.2 Estação de Tratamento de Esgoto de Franca/SP

A ETE Franca/SP, em operação desde 1998, abrange uma área total de 200.000 m², possui uma potência instalada de 3,5 kW e atende atualmente ao município de Franca, com uma população estimada em 355.901 habitantes pelo IBGE. Com uma vazão sanitária de 450 l/s, sua capacidade total pode atingir aproximadamente 750 l/s, e o tratamento do efluente é realizado por métodos aeróbios e anaeróbios.

A estação está organizada em setores:

Gradeamento/Caixas de Areia/E.E.E.B. (Estação Elevatória de Esgoto Bruto): Realiza o tratamento preliminar, removendo materiais sólidos como pedras e plásticos. Utiliza grades e caixas de areia para essa remoção.

Decantadores Primários: Nessa fase, os sólidos sedimentáveis são removidos, sendo encaminhados para o tratamento do lodo (Setor 5).

Tanques de Aeração: O efluente, após o tratamento primário, passa por tanques de aeração, onde a matéria orgânica é degradada.

Decantadores Secundários e E.E.R.L. (Estação Elevatória de Recirculação de Lodo): Projetados para clarificar o efluente final e tratar o lodo floculado, composto de bactérias e matéria orgânica. O lodo é recirculado para o tanque de aeração.

Tanque de Mistura e Adensadores de Lodo: Prepara uma mistura homogênea de lodo primário e secundário. O lodo é bombeado para o biodigestor.

Biodigestores: Aqui, o lodo passa por digestão anaeróbia, convertendo a matéria orgânica em gases como metano e dióxido de carbono. O gás é coletado e utilizado, enquanto o lodo é enviado para desidratação.

Filtros Prensa de Esteira: Realiza a desidratação do lodo, resultando em biossólidos compostos de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e potássio, que podem ser utilizados na agricultura. O percentual de sólidos secos alcança 20%.

2.3.3 SAAE

O SAAE é uma autarquia municipal com personalidade jurídica pública e autonomia administrativa e financeira. Foi instituído pela Lei nº 439, em 25 de novembro de 1960, com a finalidade de operar, manter, proteger e explorar os serviços públicos de água potável e esgoto em toda a cidade de Passos. Sua receita é derivada das tarifas de água e esgoto (SAAE, 2020).

2.3.4 Estação de Tratamento de Esgoto de Passos/MG

A ETE Passos/MG, inaugurada em 2008, opera com uma capacidade de tratamento de aproximadamente 82% do esgoto da cidade. A estação, que ocupa uma área de cerca de 4 hectares, utiliza reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB) para seu funcionamento (SILVA, 2019; SAAE, 2020).

O tratamento do esgoto na ETE Passos ocorre em seis etapas:

Tratamento Preliminar: Inclui dispositivos para remoção de areia e outros materiais, com três partes distintas, iniciando nos gradeamentos com diferentes espaçamentos. A primeira grade possui 25mm, a segunda, que funciona automaticamente, tem 15mm, e em seguida o efluente é direcionado aos desarenadores.

Gradeamento: Envolve a remoção de sólidos grosseiros por meio de dispositivos de retenção e remoção, podendo ser mecanizados ou manuais.

Desarenadores: Etapa final do tratamento preliminar, retendo areia e outros particulados que podem representar riscos ao tratamento subsequente do esgoto.

Medidor de Vazão: Após o tratamento preliminar, o efluente passa por um medidor de vazão para indicar a quantidade de esgoto que entrará nos reatores. Essa etapa é essencial para a coleta de dados sobre vazões, picos de vazões e a quantificação do esgoto da cidade, além de permitir a avaliação da eficiência do processo em relação à DBO e DQO.

Caixa de Distribuição de Esgoto: Localizada após o medidor de vazão e antes dos Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente, a caixa de distribuição tem a função de distribuir o esgoto de forma equitativa entre os reatores, evitando diferenças de carga ou sobrecarga entre eles.

Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente: Utilizados como tratamento biológico de esgoto, esses reatores têm a finalidade de remover matéria orgânica e materiais sólidos do efluente. A estação possui dois módulos, cada um composto por três Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente, totalizando seis reatores.

De acordo com Silva (2019, p.11)

O tratamento biológico ocorre por processo anaeróbio, isto é, sem oxigênio. Basicamente a decomposição da matéria orgânica é feita por microrganismos presentes num manto de lodo, o esgoto sai da parte de baixo do reator e passa pela camada de lodo que atua como um filtro. Melhor explicando no reator a biomassa cresce dispersa no meio formando pequenos grânulos. A concentração de bactérias é bastante elevada formando uma manta de lodo. O efluente entra embaixo do reator e possui fluxo ascendente. No topo do reator há uma estrutura cônica. Esta possibilita a separação dos gases resultantes do processo anaeróbio (gás carbônico e metano) da biomassa, que sedimenta no cone sendo devolvida ao reator, e do efluente, a área deste sistema é bastante reduzido devido à alta concentração das bactérias. A produção do lodo é baixa e já sai estabilizada.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados para produção de Biogás na ETE de Passos/MG

Devido à ausência de alguns parâmetros para o cálculo exato da produção de biogás na ETE de Passos, foram utilizados números padrões, divididos em três cenários para análise: conservador, típico e otimista. A variação desses parâmetros de entrada é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de cálculo de estimativa de produção de biogás, de acordo com o cenário.

Parâmetro	Unidade	Cenário Conservador	Cenário Típico	Cenário Otimista
Concentração de SO ₄ no afluente (CSO ₄)	mg. L ⁻¹	20	15	10
Eficiência de remoção de DQO (EDQO)	%	60	65	70
Eficiência de redução de SO ₄ (ESO ₄)	%	80	75	70
Coef. de produção de lodo (Y)	kgSV/kgDQO _{rem}	0,15	0,15	0,15
Coef. de produção DQO-lodo (Ksólidos)	kgDQO-lodo/kgDQO _{rem}	0,213	0,213	0,213
Temperatura operacional reator (T)	°C	25	25	25
Fator de supersaturação de CH ₄ na fase líquida (Fs)	-	1,7	1,35	1
Perda de CH ₄ na fase gasosa com o gás residual (pw)	%	7,5	5	2,5
Perda de CH ₄ na fase gasosa com o gás residual (pw)	%	7,5	5	2,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que a eficiência de remoção de DQO (EDQO), por exemplo, foi considerado em 60% em cenário conservador, 65% em cenário típico e 70% em cenário otimista. De maneira geral, a viabilidade da produção de biogás e geração de energia foi analisada nos três cenários.

Em relação aos dados de entrada, a população considerada foi de 115.970 habitantes, que corresponde ao levantamento do IBGE de 2021, e a contribuição de esgoto por habitante e a demanda química do afluente (DQO_{afluente}) foram fornecidos pelo SAAE e correspondem respectivamente por 180 L/hab.dia e 500mg/L.

Com isso, os cálculos do balanço de cargas orgânicas nos três cenários possíveis estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado do balanço de cargas orgânicas nos três cenários possíveis.

Parâmetro	Unidade	Cenário Conservador	Cenário Típico	Cenário Otimista
Carga DQO afluente	KgDQO/dia	10437,3	10437,3	10437,3
Carga SO ₄ afluente	KgSO ₄ /dia	417,5	313,1	208,7
Carga DQO efluente	KgDQO/dia	4174,9	3653,1	3131,2
Carga DQO removida	KgDQO/dia	6262,4	6784,2	7306,1
Carga DQO utilizada na redução de SO ₄	KgDQO/dia	222,8	156,6	97,5
Carga DQO convertida em lodo	KgDQOlodo/dia	1333,9	1445,0	1556,2
Carga DQO convertida em CH ₄	KgDQO-CH ₄ /dia	4705,7	5182,6	5652,4
DQO convertida em biomassa	%	21,3	21,3	23,1
DQO utilizada na redução de SO ₄	%	3,6	2,3	1,3
DQO convertida em CH ₄	%	75,1	76,4	77,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se uma variação mais considerável em alguns parâmetros, como por exemplo na carga de SO₄ do afluente, que variou praticamente um pouco mais do dobro do cenário conservador para o otimista, e na DQO utilizada na redução de SO₄ que é quase o triplo entre os cenários opostos.

No que diz respeito a produção de metano e biogás, e o potencial de geração de energia nos três cenários, têm-se os resultados exemplificados nas tabelas 5 e 6 respectivamente.

Tabela 5 – Resultado na produção de metano e biogás nos três cenários possíveis.

Parâmetro	Unidade	Cenário Conservador	Cenário Típico	Cenário Otimista
CH ₄ no biogás	%	69,2	69,2	69,2
Perda de CH ₄ dissolvido no efluente	mg/L	25,2	20,0	14,8
Carga DQO convertida em CH ₄	kgDQO-CH ₄ /dia	4705,7	5182,6	5652,4
Fator correção temperatura	kgDQO/m ³	2,6	2,6	2,6
Perda volumétrica de CH ₄ com o efluente	m ³ /dia	803,5	638,1	472,7
Perda volumétrica de CH ₄ com o gás residual	m ³ /dia	74,6	67,1	42,2
Outras perdas volumétricas de CH ₄	m ³ /dia	74,6	67,1	42,2
Produção real de CH ₄ no biogás	m ³ /dia	845,3	1207,9	1602,7
Produção real de biogás	m ³ /dia	1222,1	1746,3	2317,1

Fonte: Elaborado pelo autor

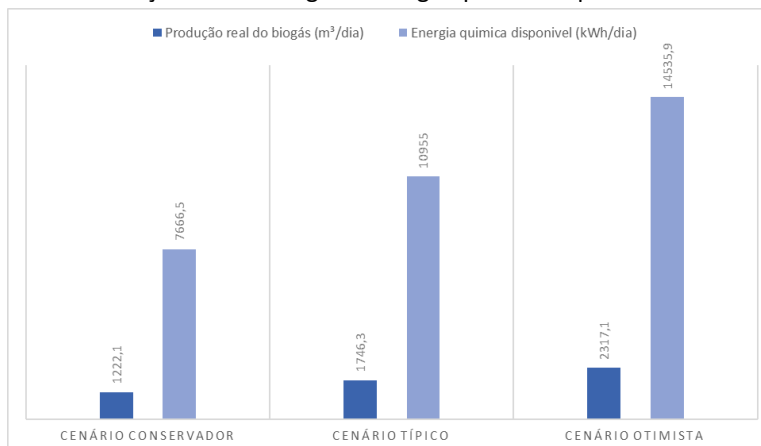
Tabela 6 – Potencial de geração de energia nos três cenários possíveis.

Parâmetro	Unidade	Cenário Conservador	Cenário Típico	Cenário Otimista
Produção normalizada de CH ₄	Nm ³ /dia	774,4	1106,6	1468,3
Taxa de emissão de CH ₄	Ton/ano	5087,8	7270,1	9646,6
Produção normalizada de biogás	Nm ³ /dia	1119,6	1599,8	2122,7
Energia química disponível	kWh/dia	7666,5	10955,0	14535,9

Fonte: Elaborado pelo autor

O Gráfico 1 ilustra a comparação da produção real de biogás e a energia química disponível entre os 3 cenários.

Gráfico 1 – Produção real do biogás e energia química disponível nos 3 cenários.

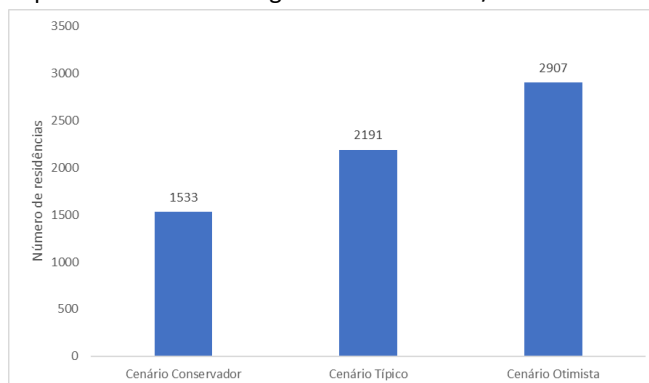


Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a geração de energia, é importante pontuar que a energia química disponível não representa um valor absoluto, pois quando se converte para energia elétrica, têm-se a dissipação de uma parte dessa energia. Logo para se obter o valor real da disponibilidade de energia é necessário levar em consideração o rendimento do equipamento escolhido para a conversão. Atualmente os motores de combustão interna, que convertem essa energia, possuem uma eficiência que varia entre 30% e 44%, portanto para o cálculo, considerou-se o valor médio de 37%. Têm-se, então, os valores de geração de energia elétrica de 2.836,6 KWh/dia, 4.053,35 KWh/dia e 5.378,3 6 KWh/dia nos cenários conservador, típico e otimista respectivamente.

Considerando que a média de consumo de energia elétrica nas residências brasileiras é 150 KWh/mês, têm-se a estimativa do número de residências que seriam abastecidas com o aproveitamento do biogás proveniente da ETE Passos, que é mostrada no Gráfico 6.

Gráfico 2 – Número de residências que poderiam ser abastecidas pela energia elétrica gerada pelo aproveitamento do biogás – ETE de Passos/MG.

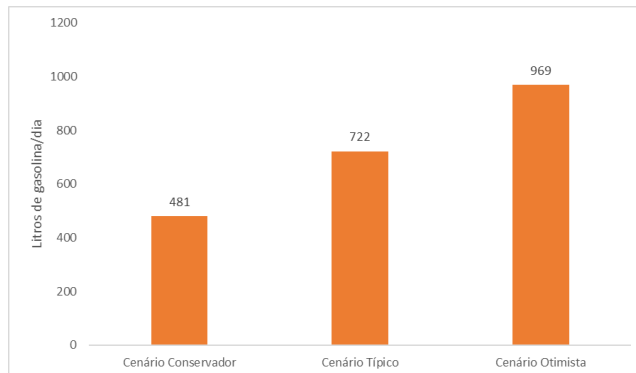


Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação a utilização do biogás gerado como combustível, é importante pontuar que a ETE de Passos possui uma capacidade de tratamento, e conseqüentemente, uma geração menor de biogás que a ETE de Franca, porém os resultados não deixam de ser promissores.

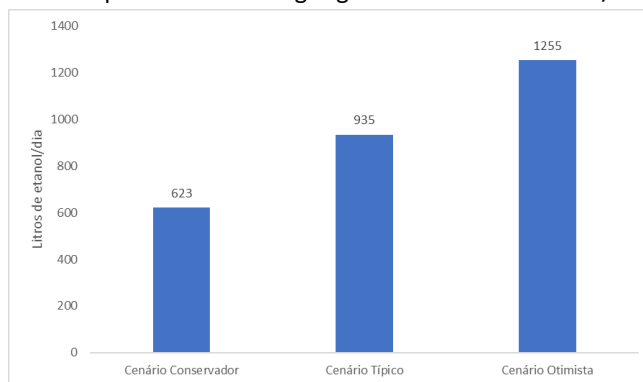
Nos Gráfico 7, 8, 9 e 10 são expostas as comparações do volume estimado gerado de biogás na ETE de Passos em relação a equivalência com outros combustíveis. Assim como anteriormente, foram consideradas os três cenários.

Gráfico 3 – Litros de gasolina equivalentes ao biogás gerado na ETE de Passos/MG, em L/dia.



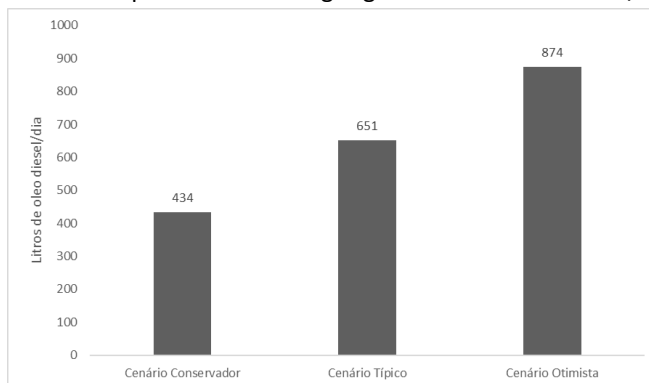
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4 – Litros de etanol equivalentes ao biogás gerado na ETE de Passos/MG, em L/dia.



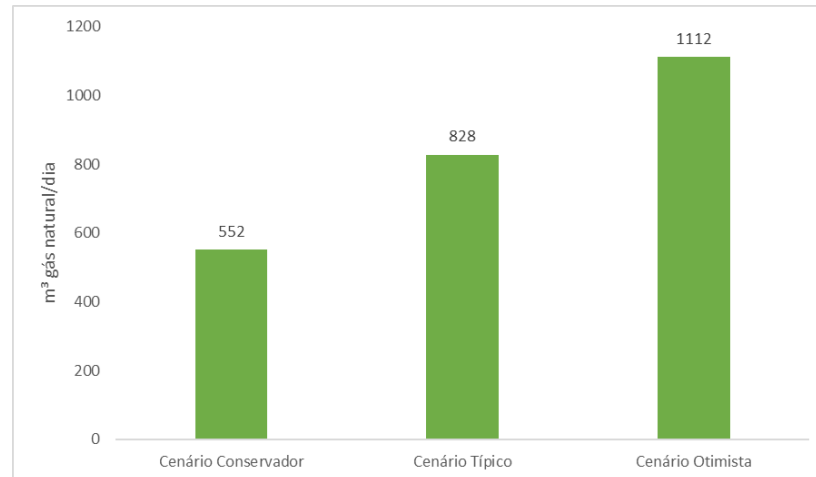
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 5 – Litros de óleo diesel equivalentes ao biogás gerado na ETE de Passos/MG, em L/dia.



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 6 – m³ de gás natural equivalente ao biogás gerado na ETE de Passos/MG, em L/dia.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com os resultados obtidos, fica claro o potencial energético que a ETE de Passos possui em relação a geração estimada de biogás.

Mesmo com as estimativas mais conservadoras, um projeto de reaproveitamento do biogás se faz necessário, seja para a geração de energia elétrica, ou para a geração de combustível.

Outro ponto importante é que, atualmente, existe um projeto para a expansão da ETE de Passos, onde a capacidade de tratamento irá aumentar, e conseqüentemente, a produção de lodo e biogás também. Isso pode representar um acréscimo considerável na potencialidade já existe no reaproveitamento energético.

Anualmente são geradas 150 a 200 toneladas de lodo ao ano pela ETE Passos, sendo um dos grandes problemas para o SAAE, que gasta cerca de R\$ 400,00 por tonelada para a destinação desse resíduo.

Espera-se que a pesquisa auxilie no fomento da aplicação da Economia Circular junto a estação de tratamento de esgoto de Passos/MG. Onde em um futuro próximo possa ser desenvolvido um plano de ação para a elaboração de iniciativas parecidas com a da Sabesp. Além disso, os conceitos poderão ser replicados para outras estações na região, e, para estações de tratamento de água (ETA).

Diante da urgência do tema, é esperado também, que a pesquisa possa agregar junto a literatura, servindo de referência para futuros estudos que busquem aprimorar os processos descritos, ou até mesmo replicá-los.

4 CONCLUSÃO

Os resultados destacam o alto potencial energético da ETE de Passos na geração de biogás, sugerindo a necessidade de um projeto para reaproveitamento desse recurso, seja para energia elétrica ou combustível. Com um projeto de expansão em curso, a capacidade da ETE será ampliada, aumentando a produção de lodo e biogás. A gestão das 150 a 200 toneladas anuais de lodo, que custa R\$ 400,00 por tonelada ao SAAE, representa um desafio financeiro. A pesquisa busca promover a Economia Circular na ETE de Passos, visando a elaboração de um

plano de ação semelhante ao da Sabesp, com potencial replicação em outras estações na região, incluindo estações de tratamento de água. A urgência do tema torna a pesquisa uma referência para futuros estudos que visem aprimorar ou replicar esses processos.

REFERÊNCIAS

BRASIL, Ministério do Desenvolvimento Regional. **Novo Marco Regulatório do Saneamento**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/saneamento-basico/novo-marco-legal-do-saneamento#:~:text=Novo%20Marco%20Regulat%C3%B3rio%20do%20Saneamento,a%20editar%20normas%20de%20refer%C3%A2ncia> . Acesso em: 16 mar. 2021.

EMF, 2017. **Uma Economia Circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial**. [S. l.]: CE100, Janeiro 2017.

MIKI, R. E. *et al.* Produção e uso de biometano como combustível veicular na ETE de Franca: Resultados e considerações do primeiro ano de operação. **30º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente**, São Paulo, p. 1-11, 2019.

POSSETTI, G. R. C., CHERNICHARO, C. A. L., 2015. **ProBio - Programa de estimativa de produção de biogás em reatores UASB**, Curitiba: s.n

SABESP conquista prêmio do BID por projeto de economia circular em Franca. **Portal do Governo**, São Paulo, p. 1, 7 out. 2019. Disponível em: <https://www.saopaulo.sp.gov.br/ultimas-noticias/sabesp-conquista-premio-do-bid-por-projeto-de-economia-circular-em-franca/>. Acesso em: 5 abr. 2021.

SILVA, L. R. N. Saneamento básico: visita técnica a estação de tratamento de esgoto (ETE), e a estação de tratamento de água (ETA) de Passos - MG. **Universidade do Estado de Minas Gerais**, Passos-MG, p. 1-21, 2019.