

# MACAÉ 2030

## Futuros cenários além do petróleo



**Macaé**  
PREFEITURA  
Secretaria Adjunta | ENSINO SUPERIOR



## **Prefeitura Municipal de Macaé**

Welberth Porto de Rezende

## **Secretaria Municipal de Educação**

Leandra Lopes Vieira

## **Secretaria Municipal Adjunta de Ensino Superior**

Flaviá Picon Pereira

## **Projeto Macaé 2030**

### **Observatório da Cidade de Macaé**

Alice Ferreira Tavares

### **Organização**

Alice Ferreira Tavares  
Ana Eliza Port Lourenço  
Felipe Dias Ramos Loureiro  
Gisele Silva Barbosa  
Leila Brito Bergold  
Lia Hasenclever  
Luana Silva Monteiro  
Maria Inês Paes Ferreira

### **Editorial**

Ana Eliza Port Lourenço  
Cremilda Barreto Couto  
Leila Brito Bergold  
Lia Hasenclever  
Luana Silva Monteiro  
Gisele Silva Barbosa

### **Revisão**

Cláudia de Magalhães Bastos Leite

### **Revisão e Normalização ABNT**

Henrique Barreiros Alves

### **Diagramação**

Raphael Bózeo de Sousa

### **Fotografia**

Raphael Bózeo de Sousa  
César Fernandes (divulgação BRK)

### **Colaboração**

Renatta Viana Rodrigues

### **Instituições de Ensino**

FeMASS  
UFRJ  
NUPEM-UFRJ  
UERJ  
UFF  
IFF  
CEDERJ  
FAETEC-Rj  
UENF  
CANDIDO MENDES

### **Grupo de trabalho interinstitucional**

Alfredo Manhães  
Aurea Yuki Sugai  
Carlos Barboza  
Cristina Maria de O. Melo  
Elaine Antunes  
Erick Zickwolff  
Gisele Muniz  
Giuliano Alves Borges e Silva  
Henrique de A. Carvalho  
Henrique Rocha Mendonça  
Hugo Bomfim  
João Wellington de Assis  
José Augusto F. da Silva  
José Ricardo Siqueira  
Larissa Tavares  
Marcelina Marri B. C. França  
Maria Gertrudes Justi  
Moisés Marinho  
Paulo de Tarso  
Raul Ernesto Lopez Palacio  
Thiago Rocha Gomes

## PARTE 1

# PLANEJAMENTO URBANO, IDENTIDADE GASTRONÔMICA E DIVERSIFICAÇÃO DE ATIVIDADES ECONÔMICAS





## GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM REATOR UASB DE MACAÉ/RJ: BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E INVESTIMENTOS POR MEIO DE TÍTULOS VERDES (GREEN BONDS)

*Yasmin Barbosa Manucci<sup>1</sup>  
Beatriz Rohden Becker<sup>2</sup>  
Conrado Vidotte Plaza<sup>3</sup>  
Gisele Silva Barbosa<sup>4</sup>  
Bruno Barzellay Ferreira da Costa<sup>5</sup>  
Luan dos Santos<sup>6</sup>*

**Resumo:** Devido aos baixos índices de coleta e tratamento de esgoto sanitário no Brasil e com a atualização do marco do saneamento em 2020, são esperados investimentos crescentes no setor. O Reator UASB é um processo anaeróbio de tratamento de esgoto que libera o biogás e possui uma considerável capacidade de geração de calor, podendo ser utilizado como fonte de energia, reduzindo gastos com eletricidade e o impacto ambiental associado à sua emissão no ambiente. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a viabilidade econômica da cogeração do biogás em três Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) hipotéticas, de pequeno, médio e grande porte, com Reator UASB e compará-las com as ETEs em operação no município de Macaé/RJ. Para isso, a quantidade de geração de biogás em cada ETE foi levantada, além do cálculo do potencial energético, com o possível lucro associado. Os resultados indicaram que, apesar do investimento inicial ainda ser alto, a geração de energia por meio do biogás proveniente do Reator UASB é economicamente viável. Ainda, a utilização do financiamento por títulos verdes pode tornar os projetos de biogás viáveis técnico e financeiramente.

Palavras-chave: reator UASB; estação de tratamento de esgoto; biogás; títulos verdes.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o saneamento básico é um direito assegurado pela Constituição Federal de 1988 e tem suas diretrizes nacionais definidas pela Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (BRASIL, 2007). Em 2020, o marco do saneamento foi atualizado e ampliado pela Lei nº 14.026, considerando prioridade a universalização dos serviços de esgotamento sanitário em todo o território nacional, com metas de atendimento de 90% da população com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033 e melhorias dos métodos de tratamento (BRASIL, 2020, Art. 11). De acordo com os últimos dados divulgados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), 45% da população brasileira (quase 100 milhões) não têm acesso à coleta de esgoto e apenas 51% dos esgotos são tratados, o que representava, em 2020, o equivalente a 5,3 mil piscinas olímpicas de esgoto in natura sendo lançadas no ambiente diariamente (SNIS, 2020; Instituto Trata Brasil, 2022). Tais dados indicam o alto investimento que ainda deve ser feito nos serviços de coleta e tratamento de esgotamento sanitário que, de acordo com o Atlas do Esgoto (ANA, 2017), representam R\$ 149,5 bilhões em obras até 2035 e, desse montante, quase R\$ 48 bilhões especificamente para o tratamento adequado do esgoto. Ou seja, ainda há um longo caminho até a universalização desses serviços, principalmente se considerarmos as cidades menores e, por vezes, desprovidas de recursos para investimentos ou, ainda, de Planos Municipais de Saneamento Básico.

Em um cenário desejável, o esgoto sanitário gerado é coletado e encaminhado, por meio de tubulações (rede coletora), à Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), onde ocorre a degradação da matéria orgânica presente e, como resultado dos processos metabólicos, produz gases que contribuem para o aumento do efeito estufa, como o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e o metano ( $\text{CH}_4$ ), esse último quando em condições anaeróbias. Esses gases formados em condições anaeróbias são uma mistura de gases conhecida como biogás (Deublein; Steinhauser, 2011) que é considerado um Gás de Efeito Estufa (GEE) cujo metano, seu principal constituinte, apresenta significativo potencial de geração de energia.

Além dos gases, esse processo de tratamento resulta em esgoto tratado (a ser descartado em corpo receptor, após atender aos parâmetros de lançamento) e lodo, considerado o subproduto sólido do tratamento de esgotos (Von Sperling, 2005).

Nas Estações de Tratamento de Esgoto, o biogás é produzido geralmente nos reatores anaeróbios (Reator UASB) e pelos digestores de lodo. Os Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e de Manta de Lodo (RAFA), conhecidos pela sigla em inglês UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), são reatores de fluxo ascendente, pois o esgoto entra pelo fundo e se encontra com uma manta de lodo, que causa a adsorção de grande parte da matéria orgânica pela biomassa no reator, gerando gases, efluente líquido com baixa carga orgânica e lodo. O leito de lodo e o efluente líquido são

removidos por tubulações laterais presentes no reator e o gás, separado do líquido por defletores, é removido pelo canal de redistribuição no topo superior do reator. O lodo, gerado como um subproduto do tratamento de esgoto, tanto por processos aeróbios quanto anaeróbios, tem como destino final, na maioria das vezes, o aterro sanitário. No entanto, existem possibilidades de tratamento do lodo gerado nas ETEs e que vão ao encontro ao estabelecido na Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) (Art. 9º), que traz como prioridade o tratamento dos resíduos sólidos em vez da disposição final ambientalmente adequada (aterro sanitário) (BRASIL, 2010). Uma dessas possibilidades é pela decomposição anaeróbia, que reduz a carga orgânica, também gerando biogás.

O biogás vem se consolidando, no Brasil, principalmente pela versatilidade de aplicações e algumas políticas e regulações legais têm colaborado para esse crescimento e incentivo como, por exemplo, em 2017, quando foi inaugurada a Unidade de Demonstração de Biogás e Biometano da Itaipu Binacional, a primeira unidade do país a produzir biogás e biometano a partir da mistura de esgoto, restos de poda de grama e resíduos orgânicos de restaurantes para abastecer veículos da frota de Itaipu e do CIBiogás.

Em relação à produção de biogás, a partir do tratamento do esgoto, o Brasil apresentou um potencial de produção de 493,4 Nm<sup>3</sup> de biogás em 2019, que representa a demanda elétrica anual de uma cidade de 587 mil residências. E, para o período de 2023 a 2033, estima-se, num cenário otimista, que o potencial de produção de biogás no setor do saneamento brasileiro cresça mais de 85% (ABILOGÁS, 2021).

Apesar do potencial de produção do biogás, no Brasil, que já é significativo e tende a crescer ainda mais com a universalização dos serviços de esgotamento sanitário, o país ainda apresenta certa dificuldade de crescimento e consolidação dessa fonte de energia no mercado (PROBIOGÁS, 2016). Os principais desafios para o desenvolvimento do setor do biogás, segundo um documento intitulado “Biogás no Brasil: Barreiras e recomendações para o desenvolvimento do setor”, são: barreiras de conhecimento e mão de obra; barreiras econômicas, financeiras ou de modelo de negócios; barreiras políticas e regulatórias; e barreiras de Equidade de Gênero e Inclusão Social (EGIS) (INSTITUTO 17, 2021).

No ramo do saneamento, há ainda dificuldade em considerar a cogeração do biogás como um investimento lucrativo, sendo mais vantajoso economicamente em projetos de ETEs que atendem entre 100 e 500 mil habitantes (Pereira; Cammarota, 2017). Uma das soluções encontradas para que os investimentos em projetos sustentáveis sejam cada vez mais frequentes é a partir dos títulos verdes (*green bonds*), que são títulos de renda fixa utilizados na captação de recursos para financiar, exclusivamente, projetos sustentáveis, que geram um impacto positivo do ponto de vista ambiental e climático.

Os títulos verdes podem ser específicos em mitigar os impactos das mudanças

climáticas e emissão de gases do efeito estufa (GEE), e são denominados no mercado internacional como *Climate Bonds* (Fayh, 2020). No Brasil, temos o caso da usina São João, localizada na zona leste da cidade de São Paulo e que tem capacidade de geração de 23 MW de energia limpa a partir do biogás, atendendo ao consumo de, aproximadamente, 60.000 famílias (ENERGIA E BIOGÁS, 2021).

No Estado do Rio de Janeiro, existem 53 Estações de Tratamento de Esgoto que utilizam Reatores UASB (SNIRH, 2017). E, na cidade de Macaé, local de estudo desta pesquisa, a empresa privada que detém a concessão do sistema de esgotamento sanitário da área urbana da cidade optou pelo tratamento com reatores UASB em três das quatro ETEs que compõem o sistema de esgoto da sede do município, sendo que duas já se encontram em operação (ETE Mutum e ETE Centro) e uma ainda será construída. Segundo informações da Revisão do Plano de Saneamento Básico de Macaé, realizado em 2021, o biogás gerado nas duas ETEs em operação é queimado e, portanto, não há um aproveitamento energético desse produto (PMSB, 2021).

Diante do exposto, este trabalho analisou a viabilidade econômica da cogeração do biogás, oriundo dos reatores UASB utilizados nas Estações de Tratamento de Esgoto da sede do município de Macaé/RJ. Visando à adequação da pesquisa e desenvolvimento tecnológico, conforme os objetivos de desenvolvimento sustentável que devem ser cumpridos por todos os países do mundo, inclusive o Brasil, até 2030, este trabalho se enquadra, principalmente, no ODS6 (Água potável e saneamento), ODS7 (Energia limpa e acessível) e ODS12 (Consumo e produção responsáveis) (NAÇÕES UNIDAS, 2022).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será descrita a metodologia para o cálculo de estimativa do potencial energético do biogás e o lucro associado, nas ETEs que utilizam o Reator UASB no seu ciclo de tratamento. Os custos deste tipo de ETE também foram levantados, para uma melhor comparação com os lucros da geração de biogás, verificando a viabilidade financeira de tais medidas. Além disso, para realizar a estimativa de geração de biogás, foram utilizadas ETEs hipotéticas de pequeno, médio e grande porte; definidas a partir da população atendida.

### 2.1 LOCAL DE ESTUDO

Os serviços de esgotamento sanitário da sede do município de Macaé (cerca de 95% da população) foram firmados em 2012 a partir de uma Parceria Público Privada (PPP). Desde o início da concessão, que durará 35 anos, a cidade vem avançando na implantação da rede coletora, bem como na construção e operação das Estações de Tratamento de Esgoto. A área de concessão da sede do município ficou subdividida em quatro sistemas: Mutum, Centro, Aeroporto e Lagomar, sendo que três ETEs já se

encontram em operação (ETEs Mutum, Centro e Lagomar) e mais uma ainda será implantada (ETE Aeroporto) (PMSB, 2021).

O processo escolhido para três das quatro ETEs foi o Reator UASB (Tabela 1), cujo efluente segue para o pós-tratamento com biofiltros, pois, nesses casos, foi solicitado nível terciário de tratamento.

Tabela 1 – Dados das Estações de Tratamento de Esgoto da área de concessão da sede de Macaé/RJ

	Vazão máxima tratamento [litros/segundo]	Nível tratamento	Tipo tratamento biológico	População atendida***
<b>ETE Mutum</b>	40	Terciário	Reator UASB	22 – 35 mil
<b>ETE Centro</b>	300*	Terciário	Reator UASB	162 – 260 mil
<b>ETE Lagomar</b>	40	Secundário	Lodos Ativados	22 – 35 mil
<b>ETE Aeroporto**</b>	300	Terciário	Reator UASB	162 – 260 mil

Fonte: Plano Municipal de Saneamento Básico de Macaé (2021a); BRK (2022)

Notas: \*Atualmente a ETE Centro trata o máximo de 100 l/s, com capacidade futura de ampliação para 300 l/s

\*\*A ETE Aeroporto ainda não está em operação

\*\*\*Para estimar a população atendida, utilizam a ABNT NBR 13.969/1997, que traz uma contribuição diária de carga orgânica entre 100 a 160 l/hab.dia

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO HIPOTÉTICAS

Conforme já exposto, as ETEs atualmente em operação na cidade de Macaé recebem diferentes faixas de vazão, que dependem do subsistema a qual fazem parte e, portanto, da contribuição de esgoto gerado em cada um. Por esse motivo, este estudo optou por caracterizar três Estações de Tratamento de Esgoto hipotéticas que, além de abrangerem os diferentes cenários existentes no local de estudo, também permitem adotar essa metodologia em casos similares.

Para a caracterização das ETEs hipotéticas, considerou-se a classificação desenvolvida pela SANEPAR (2020), cujo porte da Estação é definido em pequeno, médio e grande, a partir da capacidade de tratamento, considerando o número de habitantes que atende (Tabela 2). A partir do porte da ETE é que se torna possível calcular a produção de biogás e seu respectivo potencial energético.

Tabela 2 – População atendida para as ETEs hipotéticas deste estudo

Porte	População atendida
<b>Pequeno</b>	15.000
<b>Médio</b>	140.000
<b>Grande</b>	250.000

Fonte: Adaptado de SANEPAR (2020)

## 2.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS (QUANTIDADE DE GASES METANO E DIÓXIDO DE CARBONO)

Antes de estimar a produção de biogás gerada em cada uma das ETEs

hipotéticas, é necessário o cálculo da estimativa de vazão unitária de esgoto afluente, calculada a partir de um consumo médio de água (em litros/habitante.dia) e um coeficiente de retorno, que considera a parcela de consumo de água que, efetivamente, gerou esgoto. Para este trabalho, o consumo médio de água adotado foi de 160 litros/habitante.dia, indicado na norma ABNT NBR 7.229/1993 para uma residência de alto padrão (ABNT, 1993) e o coeficiente de retorno de 0,8 (ABNT, 1986). Além disso, é necessária a população contribuinte ao sistema, em que foram considerados os números da Tabela 2.

No cálculo da estimativa de produção de biogás gerado em cada ETE hipotética (pequena, média e grande), foi utilizada a metodologia adaptada de Marques (2014) e Jordão e Pessoa (2014), para ETEs que operam com Reatores UASB (Equação 1) e que são úteis para uma estimativa inicial de geração de biogás. Entretanto, há outros métodos a serem considerados como, por exemplo, a partir de dados de balanço de massa da DQO do esgoto afluente (Lobato, 2011).

A produção de biogás nas ETEs que utilizam os reatores UASB pode se situar na faixa de 5 a 20 l/hab.dia, dos quais o metano pode representar um valor em torno de 50 a 70% e o gás carbônico, uma parcela próxima de 25 a 35% (Jordão; Pessoa, 2014).

Assim, a estimativa de produção de biogás por habitantes é calculada da seguinte forma:

$$P_{total} = P_{per\ capita} * P * 0,001 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$P_{total}$  = Produção total de biogás [m<sup>3</sup>/dia]

$P_{per\ capita}$  = Produção de biogás *per capita* para Reator Anaeróbio [L/hab.dia]

$P$  = População

Para o cálculo da estimativa de produção de gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás (Equações 2 e 3), adotaram-se valores intermediários de 60% e 30%, respectivamente. Esses cálculos foram realizados com base no balanço de massa, considerando-se que o volume do gás é de 0,02271 m<sup>3</sup>/mol na CNTP e que a massa molar do metano é de 0,016 kg/mol e a do dióxido de carbono é de 0,044 kg/mol.

$$CH_{4\ volume} = (B_{total} * 60\% * 365\ dias * MM_{CH_4}) / Vol_{gás} \quad \text{Equação 2}$$

$$CO_{2\ volume} = (B_{total} * 30\% * 365\ dias * MM_{CO_2}) / Vol_{gás} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

$CH_{4\ volume}$  = Produção de gás metano [kg/ano];

$CO_{2\ volume}$  = Produção do gás dióxido de carbono [kg/ano];

$B_{total}$  = Produção total de biogás [m<sup>3</sup>/dia];

$MM_{CH_4}$  = Massa molar do metano [kg/mol];

$MM_{CO_2}$  = Massa molar do dióxido de carbono [kg/mol];

$Vol_{gás}$  = Volume de gás nas condições CNTP [m<sup>3</sup>/mol].

$Vol_{gás}$  = Volume de gás nas condições CNTP [m<sup>3</sup>/mol].

## 2.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO BIOGÁS E SEU RESPECTIVO LUCRO

Para estimar a energia produzida a partir do biogás, proveniente do lodo resultante dos processos anaeróbios, considerou-se o parâmetro de aproveitamento do poder calorífico do gás da digestão igual a 15 kWh/hab.ano, um valor sugerido por Jordão e Pessoa (2014). A energia produzida a partir do biogás é calculada pela Equação 4.

$$E_{prod} = A_{energético} * P \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

$E_{prod}$  = Energia produzida a partir do biogás [kWh/ano];

$A_{energético}$  = Aproveitamento do poder calorífico do gás da digestão [kWh/hab.ano];

$P$  = População [hab].

Para a estimativa do lucro anual gerado utilizou-se o valor da tarifa média anual de R\$ 563,49/MWh da região Sudeste, cujo lucro é calculado pelo produto do valor da tarifa com a energia produzida pelo biogás, a partir do esgoto tratado no reator UASB (Equação 4).

## 2.5 ESTIMATIVA DE CUSTOS DE UMA ETE COM REATOR UASB

No geral, os custos de uma estação de tratamento se resumem em custos de implantação e custos anuais de operação e manutenção (Von Sperling, 2005). Os custos de implantação compreendem a construção, compra ou desapropriação do terreno; projeto e supervisão; taxas legais e juros dos empréstimos. Já os custos anuais compreendem, dentre outros, juros e amortização dos empréstimos, depreciação da estação, seguro da estação, custos de operação e manutenção da operação.

Para as estimativas de custos de implantação de uma ETE com Reator UASB, o valor médio de R\$51,00/habitante é trazido por Jordão & Pessoa (2014) e representa o menor custo quando comparamos a outras categorias de ETEs (lodos ativados e sistema de lagoas, por exemplo) (Von Sperling; Salazar, 2013). Além dos custos de implantação, os custos médios de operação e manutenção de uma ETE com Reator UASB é de US\$ 1,00 a US\$ 1,50/hab.ano (Chernicharo, 2007). Neste estudo, utilizou-se o valor da cotação atual do dólar de R\$5,38 (valor em 21 de agosto de 2021). Por fim, a potência consumida proveniente de uma ETE foi considerada como 22 kWh/hab.ano (Jordão; Pessoa, 2014).

## 3 RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para a estimativa de produção do biogás a partir dos Reatores UASB, com seu respectivo lucro para as ETEs hipotéticas consideradas neste trabalho.

### 3.1 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS (QUANTIDADE DE GASES METANO E DIÓXIDO DE CARBONO)

As ETEs de porte pequeno, médio e grande apresentaram valores de geração de biogás proporcionais à vazão de esgoto gerado (Quadro 1).

Quadro 1 – Estimativa da vazão e produção de biogás nas ETEs

<i>ETE por porte</i>	<i>População (habitantes)</i>	<i>Vazão (l/s)</i>	<i>Produção de biogás (m<sup>3</sup>/dia)</i>
<b>Pequeno</b>	15.000	22,2	187,5
<b>Médio</b>	140.000	207,4	1.750,0
<b>Grande</b>	250.000	370,4	3.125,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Com a estimativa da produção de biogás, foi possível calcular (tanto em m<sup>3</sup> quanto em kg) os gases metano e dióxido de carbono, cujos resultados estão na Quadro 2. É importante destacar que essas informações de produção dos gases consideram uma produção de biogás contínua. No entanto, sabe-se que variações podem ocorrer, inclusive no período de inverno, devido à redução da temperatura ambiente.

Quadro 2 – Quantidade de gases metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presentes no biogás.

<i>ETE por porte</i>	<i>Produção Volumétrica (m<sup>3</sup>/ano)</i>		<i>Produção em massa (kg/ano)</i>	
	<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>CO<sub>2</sub></i>
<b>Pequeno</b>	41.062,50	20.531,25	28.929,99	39.778,73
<b>Médio</b>	383.250,00	191.625,00	270.013,21	371.268,16
<b>Grande</b>	684.375,00	342.187,50	482.166,45	662.978,86

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

### 3.2 ESTIMATIVA POTENCIAL ENERGÉTICO BIOGÁS E SEU RESPECTIVO LUCRO

A estimativa de energia bruta produzida pelo biogás foi determinada por meio do aproveitamento do poder calorífico e pelo valor médio da tarifa de energia da região Sudeste e está apresentada na Quadro 3.

Quadro 3 – Estimativa da energia bruta produzida pelo biogás e seu respectivo lucro.

<i>ETE por porte</i>	<i>Energia Produzida (kWh/ano)</i>	<i>Lucro anual (R\$)</i>
<b>Pequeno</b>	225.000	R\$ 126.785,25
<b>Médio</b>	2.100.000	R\$ 1.183.329,00
<b>Grande</b>	3.750.000	R\$ 2.113.087,50

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

### 3.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS DE UMA ETE COM REATOR UASB

O custo total anual, que representa os custos de implantação, manutenção e operação foram calculados e estão apresentados na Tabela 3. O custo de implantação total foi dividido por 30 anos, considerando um tempo médio das concessões de saneamento praticadas no Brasil.

Tabela 3 - Estimativa de e potência consumida nas ETEs.

<i>ETE por porte</i>	<i>Custos de Implantação (R\$)</i>	<i>Custos de Implantação (R\$/ano)</i>	<i>Custos de manutenção e operação (R\$/ano)</i>	<i>Custo total anual (R\$/ano)</i>	<i>Potência Consumida (kWh/ano)</i>
<b>Pequeno</b>	R\$ 888.307,91	R\$ 29.610,26	R\$ 121.050,00	R\$ 150.660,26	330.000
<b>Médio</b>	R\$ 4.762.059,76	R\$ 158.735,33	R\$ 1.129.800,00	R\$ 1.288.535,33	3.080.000
<b>Grande</b>	R\$ 8.170.961,39	R\$ 272.365,38	R\$ 2.017.500,00	R\$ 2.289.865,38	5.500.000

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

### 3.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O LUCRO DA GERAÇÃO DE BIOGÁS E OS CUSTOS DE UMA ETE

A partir das informações da Tabela 4, é feita uma análise comparativa entre o lucro gerado pela produção do biogás e os custos das respectivas ETEs. E também é possível comparar a quantidade de energia gerada na própria estação com a energia que ela utiliza anualmente.

Tabela 4 - Análise comparativa entre os lucros e os custos de uma ETE com reator UASB.

<i>ETE por porte</i>	<i>Lucro anual (R\$/ano)</i>	<i>Custo total anual* (R\$/ano)</i>	<i>Lucro/Custo Total</i>
<b>Pequeno</b>	R\$ 126.785,25	R\$ 150.660,26	84%
<b>Médio</b>	R\$ 1.183.329,00	R\$ 1.288.535,33	92%
<b>Grande</b>	R\$ 2.113.087,50	R\$ 2.289.865,38	92%

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Nota: \*O custo total anual considerado foi o custo total de implantação mais os custos de operação e manutenção, divididos pelo horizonte de 30 anos.

É possível observar que, nas estações de pequeno, médio e grande porte, a energia produzida pelo biogás equivale a 68% da energia consumida na estação. Comparando-se o lucro com os custos totais anuais, observa-se que, para a estação de pequeno porte, o lucro anual equivale a, aproximadamente, 84% do valor dos custos da ETE. Já para as de médio e grande porte, essa porcentagem é de, aproximadamente, 92%.

### 3.5 ESTUDO DE CASO: ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE MACAÉ/RJ

O município de Macaé conta atualmente com duas Estações de Tratamento de Esgoto em funcionamento que operam com Reatores UASB: ETE Centro e ETE Mutum.

Para realizarmos a análise entre o lucro da geração de biogás e os custos de uma ETE, foi necessário estimar a população atendida em ambas as estações da cidade. E, então, foi possível classificar a ETE Centro como uma estação de grande porte e ETE Mutum, uma estação de pequeno porte.

Dessa forma, a produção do biogás, a energia produzida, o lucro anual e os custos de manutenção das estações já foram calculados. E, nesse caso, como as Estações já foram instaladas, desconsideramos os custos de construção e, portanto, esse cenário é ainda mais favorável quanto à implantação de um sistema de geração e aproveitamento do biogás.

Tabela 5 - Análise comparativa entre os lucros e os custos das ETEs com reator UASB na cidade de Macaé.

ETE	Vazão máxima tratamento [litros/segundo]	Produção de biogás (m <sup>3</sup> /dia)	Energia Produzida (kWh/ano)	Lucro anual (R\$)	Custos de manutenção e operação (R\$/ano)	Lucro/Custo Total
ETE Mutum	40	187,5	225.000	R\$ 126.785,25	R\$ 121.050,00	105%
ETE Centro	300*	3.125,00	3.750.000	R\$ 2.113.087,50	R\$ 2.017.500,00	105%

Fonte: Do autor (2023)

Nota: Observa-se que, em ambas as estações de tratamento de esgoto estudadas, o lucro anual calculado seria equivalente a suprir os custos de manutenção e operação das estações.

## 4 DISCUSSÃO

A partir dos resultados encontrados para as ETEs hipotéticas consideradas neste trabalho (pequeno, médio e grande porte) e tendo como método de tratamento os Reatores UASB, utilizado na maioria das ETEs na cidade de Macaé, observou-se que o custo de implantação de um sistema de produção de biogás, a partir do tratamento do esgoto, é relativamente elevado e que, portanto, esse deve ser considerado na avaliação de viabilidade de implantação de ETEs. Foi possível observar que o sistema apresentado supera os custos de operação e manutenção das ETEs, portanto, para estações já implantadas e operantes o sistema de reaproveitamento do biogás se torna uma alternativa mais interessante. Nesta análise é importante que outros ganhos também sejam considerados, como o lucro obtido com a venda de energia não utilizada pela ETE e também os benefícios ambientais a partir da não emissão dos gases gerados no tratamento anaeróbico de esgoto.

O Brasil tem um significativo potencial para o reaproveitamento do biogás e, com isso, seria importante solidificá-lo na matriz energética do país. Ao compararmos a nossa realidade com a da Alemanha, por exemplo, onde o biogás é amplamente utilizado tanto para geração de energia elétrica quanto para a secagem do lodo, observa-se que a lei de resíduos, as exigências do tratamento de esgotos e as normas desenvolvidas direcionaram fortemente as iniciativas de aproveitamento do biogás em ETEs, mesmo as de pequeno porte. (BRASIL, 2015)

No Brasil, ainda faltam incentivos e são muitas as barreiras para o biogás se consolidar no país. As iniciativas como os títulos verdes (*green bonds*), criados para financiar projetos e ativos que tenham benefícios ambientais e ou climáticos, são caminhos para a abertura do mercado de biogás no país. O biogás se enquadra como uma atividade elegível para o financiamento pelo título verde, além de ser uma opção de energia renovável, é uma solução que previne e controla a poluição do gás metano na atmosfera (controle de emissões de GEE e outros poluentes) e, também, se utilizado como GNV (Gás Natural Veicular), enquadra-se como uma solução para o transporte limpo. Assim, portanto, por meio dos títulos verdes poderá ser feita a conexão entre os projetos de geração de biogás do Brasil com os investidores interessados, pois, uma vez que os recursos sejam alocados nessas iniciativas, novas experiências bem sucedidas poderão servir de exemplos para novos projetos e segurança para novos investimentos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo realizar uma análise do aproveitamento energético do biogás em Estações de Tratamento de Esgoto que utilizam Reatores UASB, pois são as tecnologias de tratamento utilizadas nas ETEs em operação na cidade de Macaé. Para os cálculos da estimativa dos custos associados à produção de biogás, bem como seu aproveitamento energético (lucros), foram criadas três ETEs hipotéticas, considerando a população contribuinte, sendo elas de pequeno (15.000 habitantes), médio (140.000 habitantes) e grande (250.000 habitantes) porte.

Os resultados encontrados indicaram que o potencial energético estimado do biogás para todas as três ETEs hipotéticas consideradas é capaz de suprir um pouco mais de 2/3 da demanda de energia elétrica da própria estação (cerca de 68%) e o valor de venda desse biogás pode suprir parte dos custos anuais das ETEs (implantação, operação e manutenção). Dessa maneira, a geração de energia elétrica proveniente do biogás em uma estação de qualquer porte (pequeno, médio e grande) que trabalhe com um Reator UASB pode ter benefícios econômicos.

Os projetos que utilizam o biogás como fonte de energia são boas soluções para redução das emissões do gás metano e geração de energia renovável, além de fomentar a criação de políticas que aproveitem o biogás no Brasil. É importante destacar, também, que a viabilidade de geração de energia elétrica em uma ETE não se dá somente pelo incentivo regulatório, mas também pelo viés financeiro. As empresas de saneamento e os possíveis investidores também estão interessados em uma proposta lucrativa e economicamente viável. Portanto, incentivos fiscais e financeiros são interessantes para as concessionárias que operam sistemas de esgotamento sanitário, sejam elas públicas ou privadas.

Com isso, os títulos verdes entram como uma ótima opção para o incentivo econômico deste tipo de projeto, em que temos uma opção de energia renovável e uma

solução que previne e controla a poluição do gás metano na atmosfera (controle de emissões de GEE e outros poluentes). Por fim, políticas públicas e incentivos fiscais são os pontos principais para consolidar esse mercado no Brasil e, à medida que novos projetos forem concluídos e bem sucedidos, os intercâmbios de informações serão cada vez mais intensos, fazendo com que o mercado ganhe visibilidade e consistência, atraindo, assim, novos investimentos no setor.

## REFERÊNCIAS

ABIOGÁS.. **Potencial de produção de biogás a partir do tratamento do esgoto:** perspectivas para a universalização sustentável dos serviços de esgotamento sanitário no Brasil. Publicação elaborada por: ABES, ABiogás, CIBiogás, GEF Biogás Brasil, INCT ETEs Sustentáveis, Instituto 17/Programa de Energia para o Brasil (BEP), Sabesp e Sanepar. São Paulo, SP: ABiogás, 2021.

ANA. **Atlas Esgotos:** Despoluição de Bacias Hidrográficas. Secretária Nacional do Saneamento Ambiental, Brasília: 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648:** Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229:** Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos, Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 6 jan. 2007. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm). Acesso em: 30 ago. 2022.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, de 3 ago. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm). Acesso em: 30 de agosto de 2022.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm). Acesso em: 30 de agosto de 2022.

BRK AMBIENTAL. **Tratamento de Esgoto.** Macaé: BRK, [20-?]. Disponível em: <https://www.brkambiental.com.br/macae/tratamento-de-esgoto-1>. Acesso em: 18 ago. 2022.

CARDOSO MOREIRA, Hélinah; Souza, Reinaldo C. (Orientador); Possetti, Gustavo R.C. (Coorientador). Biogás em estações de tratamento de esgotos: os principais legados da cooperação técnica Brasil-Alemanha. Rio de Janeiro, 2017. 174 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias:** Reatores Anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. **Biogas from Waste and Renewable Resources.** 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH e Co KGaA, 2011.

- ENERGIA E BIOGÁS. Disponível em: <https://energiaebiogas.com.br/rzk-energia-anuncia-aquisicao-da-sao-joao-ambiental>. Acesso em: 5 maio 2022.
- FAYH, Marcelo. Green bonds: o que são os títulos verdes. The Capital Advisor, [s. l.], 22 set. 2020. Disponível em: [https://comoinvestir.thecap.com.br/green-bonds-o-que-sao-os-titulos-verdes/#O\\_que\\_sao\\_Green\\_Bonds](https://comoinvestir.thecap.com.br/green-bonds-o-que-sao-os-titulos-verdes/#O_que_sao_Green_Bonds). Acesso em: 21 ago. 2022.
- FUNDAMENTOS do biogás: operação e manutenção de plantas de biogás, arranjos de viabilidade econômica e panorama do biogás. Foz do Iguaçu: [s. n.], 2020. p. 1-44.
- INSTITUTO 17. **Biogás no Brasil: barreiras e recomendações para o desenvolvimento do setor: Programa de Energia para o Brasil – BEP (Brasil): Relatório Técnico i17 001: 2021.** São Paulo, SP: Instituto 17, 2021.
- INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do saneamento 2022 (SNIS 2020).** São Paulo: GO, 2022. Disponível em: [https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/Relatorio\\_do\\_RS\\_2022.pdf](https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/Relatorio_do_RS_2022.pdf) Acesso em: 25 ago. 2022.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** 7. ed. Rio de Janeiro: ABES. 2014.
- LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico.** 2011. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Juiz de Fora, 2011.
- MARQUES, L. S. **Avaliação dos benefícios ambientais e econômicos do aproveitamento do biogás do digestor anaeróbio para tratamento de lodo de esgoto.** 2014. Monografia (Graduação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.
- PEREIRA, R. A. S.; CAMMAROTA, M. C. Viabilidade de estações de tratamento de esgoto com cogeração com biogás em diferentes escalas de suprimento de energia – análise econômica. In: CONGRESSO ABES FENANSAN, 2017, São Paulo. **Anais [...].** São Paulo: [s. n.], 2017. p. 1-6. Disponível em: <https://saneamentobasico.com.br/wp-content/uploads/2019/01/II-210.pdf> Acesso em: 23 ago. 2021.
- PROBIOGÁS. **Barreiras e Propostas de Soluções para o Mercado de Biogás no Brasil.** Brasília: GIZ, 2016.
- SANEPAR. **Manual de Projetos de Saneamento:** diretrizes para Elaboração de Projetos de Sistemas de Tratamento de Esgoto. [S. l: s. n.], 2020. Disponível em: [https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/mps-versao-2020-em-elaboracao/modulo\\_09.8\\_-\\_diretrizes\\_para\\_projetos\\_-\\_fluxograma\\_de\\_processo\\_e\\_de\\_engenharia.pdf](https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/mps-versao-2020-em-elaboracao/modulo_09.8_-_diretrizes_para_projetos_-_fluxograma_de_processo_e_de_engenharia.pdf). Acesso em: 05 jul. 2022.
- SERENCO. **Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico de Macaé, 2021: Produto 7.** Macaé: Serenco Serviços de Engenharia Consultiva, 2021. Disponível em: <https://macae.rj.gov.br/midia/conteudo/arquivos/1626996609.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2022.
- SNIRH. **Relatório Geral Atlas do Esgoto.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2017. Disponível em: [https://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Atlas\\_Esgoto/Rio\\_de\\_Janeiro/Relatorio\\_Geral/](https://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Atlas_Esgoto/Rio_de_Janeiro/Relatorio_Geral/). Acesso em: 14 jul. 2022.
- SNIS. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto.** Visão Geral: ano de referência 2020. [S. l: s. n.], [2021?]. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnosticos>. Acesso em: 25 ago. 2022.

VON SPERLING M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

VON SPERLING, M.; SALAZAR, B. L. Determination of capital costs for conventional sewerage systems (collection, transportation and treatment) in a developing country. **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, [s. l.], v.3, n. 3, p. 365-374, 2013.

## NOTAS DE RODAPÉ

<sup>1</sup> Graduada em Engenharia Civil pelo Instituto Politécnico, Centro Multidisciplinar - UFRJ Macaé.

<sup>2</sup> Tem graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e mestrado em Engenharia de Reservatório e Exploração pela Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), com pesquisa na área de biorremediação em sedimentos de restinga contaminados por petróleo. É doutoranda do Programa de Engenharia Civil (PEC) pela COPPE/UFRJ, com pesquisa na área de gestão sustentável de recursos hídricos em áreas urbanas, especificamente controle de inundações, drenagem urbana sustentável e restauração de rios urbanos. Desde 2014 é Docente da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), no curso de Engenharia Civil, *Campus Macaé*.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia de Transportes. Professor no Instituto Politécnico - Centro Multidisciplinar de Macaé - Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ. E-mail: conradoplaza@macae.ufrj.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0640-5327>

<sup>4</sup> Doutora em Urbanismo. Professora no Instituto Politécnico - Centro Multidisciplinar de Macaé - Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ. E-mail: giselebarbosa@poli.ufrj.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8535-6289>

<sup>5</sup> Doutor em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. E-mail: bruno.barzellay@macae.ufrj.br

<sup>6</sup> Professor da Faculdade de Administração e Ciências Contábeis (FACC/UFRJ) e do Programa de Engenharia de Produção (PEP/COPPE/UFRJ)



**Macaé**  
P R E F E I T U R A  
Secretaria Adjunta | ENSINO SUPERIOR



**Observatório**  
da Cidade de Macaé

ISBN: 978-65-89225-03-4

CD



9 786589 225034