

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

YASMIN BARBOSA MANNUCCI

**GERAÇÃO DE BIOGÁS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO COM REATOR UASB: avaliação dos benefícios econômicos e
proposta de investimento através dos títulos verdes (*green bonds*)**

MACAÉ

2021

YASMIN BARBOSA MANNUCCI

**GERAÇÃO DE BIOGÁS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO COM REATOR UASB: avaliação dos benefícios econômicos e
proposta de investimento através dos títulos verdes (*green bonds*)**

Trabalho de Conclusão de Curso de
graduação submetida à Universidade
Federal do Rio de Janeiro – Campus
Macaé como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(es):

Prof. Conrado Vidotte Plaza

Prof. Luan dos Santos

MACAÉ

2021

YASMIN BARBOSA MANNUCCI

**GERAÇÃO DE BIOGÁS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO COM REATOR UASB: avaliação dos benefícios econômicos e
proposta de investimento através dos títulos verdes (*green bonds*)**

Trabalho de Conclusão de Curso de
graduação submetida à Universidade
Federal do Rio de Janeiro – Campus
Macaé como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil.

Macaé, 23 de setembro de 2021



Prof. Conrado Vidotte Plaza - Orientador
Universidade Federal do Rio de Janeiro



Prof. Luan dos Santos - Orientador
Universidade Federal do Rio de Janeiro



Profa. Beatriz Rohden Becker
Universidade Federal do Rio de Janeiro



Profa. Elisa Pinto da Rocha
Universidade Federal do Rio de Janeiro



Prof. Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira
Universidade Federal do Rio de Janeiro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me conceder a minha vida, por sempre iluminar meus caminhos e minhas decisões. Peço que esteja sempre ao meu lado, guiando meus caminhos, e que me conceda sempre capacidade de superar os desafios que, porventura, possam aparecer na minha jornada profissional.

À minha mãe, que sempre acreditou em mim, nunca mediu esforços para realizar meus sonhos e sempre vibrou pelas minhas conquistas. À minha irmã, minha avó e meus tios, pelas conversas, companhia e ajuda em momentos difíceis.

Ao meu namorado, Eduardo, pelo companheirismo de sempre e pelo amparo em tantos momentos de indecisões e questionamentos.

Aos meus amigos de faculdade, pelos momentos de descontração e felicidade, pela convivência (mesmo não presencial nestes últimos tempos) e pela troca de conhecimento.

Aos meus orientadores, Conrado Vidotte e Luan Santos, e à professora Beatriz Becker, que foram muito importantes em todo esse processo. Obrigada por todo o auxílio, por todo conhecimento compartilhado e atenção que me prestaram neste e outros momentos tão importantes durante o processo.

Aos meus professores da Universidade, por todo conhecimento passado nesses cinco anos.

RESUMO

Em 2020, o marco do saneamento do Brasil foi atualizado e ampliado, resultando em investimentos crescentes no setor. No entanto, muito ainda há para se fazer, principalmente no que diz respeito ao tratamento de esgotos sanitários. O Reator UASB é um processo anaeróbio (sem presença de oxigênio) de tratamento de esgoto, que tem como objetivo principal a remoção da matéria orgânica dissolvida e em suspensão através de mecanismos biológicos. Durante o processo de decomposição da matéria orgânica do esgoto, acontece a liberação de um conjunto de gases, principalmente metano e dióxido de carbono, denominado de biogás. O biogás possui uma considerável capacidade de geração de calor e pode ser utilizado como fonte de energia, com o objetivo de reduzir os gastos com eletricidade nas ETEs e, ainda, reduzir o impacto ambiental associado à sua emissão no ambiente. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade econômica da cogeração do biogás em três Estações de Tratamento de Esgoto hipotéticas, de pequeno, médio e grande porte, com Reator UASB. Para isto, a metodologia teve início com a avaliação do potencial de geração de biogás em cada ETE. Posteriormente, calculou-se o potencial energético de cada ETE e o possível lucro associado. Concluiu-se que, apesar do investimento inicial ainda ser alto, a geração de energia através do biogás proveniente do Reator UASB é economicamente viável. No entanto, a utilização do financiamento através dos títulos verdes (títulos de renda fixa utilizados na captação de recursos para financiar exclusivamente projetos sustentáveis), pode tornar os projetos de biogás viável técnico e financeiramente.

Palavras-chave: Reator UASB. Estação de Tratamento de Esgoto. Biogás. Títulos Verdes.

ABSTRACT

In 2020, the Brazilian sanitation legal framework was updated and expanded, resulting in growing investments. However, there is still a lot to be done, especially regard to the treatment of sanitary sewage. The UASB Reactor is an anaerobic (oxygen-free) sewage treatment process, that aim at the removal of dissolved and suspended organic matter through biological mechanisms. During the decomposition process of the sewage's organic matter, a set of gases is produced and released at the atmosphere, among them methane and carbon dioxide. This set of gases, named biogas, has a considerable heat generation capacity and can be used as an energy source, with the objective of reducing electricity costs in the sewage treatment plants and the associated environmental impact. In this context, this work aimed to analyze the economic feasibility of biogas cogeneration from three hypothetical Sewage Treatment Plants (STP) with UASB Reactor: small, medium and large capacity. The methodology starts from the evaluation of the potential biogas generation for each STP. After that, the energy potential and associated profit for each STP was estimated. It was concluded that the generation of energy through biogas from the UASB Reactor is economically viable, despite the necessary high initial investments. However, the use of green bonds (fixed-income bonds used to raise funds to exclusively finance sustainable projects) can make the biogas projects technically and economically viable.

Keywords: UASB reactor. Sewage treatment station. Biogas. Green Bonds.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. OBJETIVOS	12
1.1.1. OBJETIVO GERAL.....	12
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.2. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. TRATAMENTO DE ESGOTO	14
2.2. REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE (UASB, RAFA, DAFA).....	17
2.3. COGERAÇÃO DO BIOGÁS.....	22
2.4. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS: CASO ALEMANHA	26
2.5. BARREIRAS E SOLUÇÕES PARA O MERCADO DO BIOGÁS NO BRASIL	29
2.6. TÍTULOS VERDES (<i>GREEN BONDS</i>)	34
3. METODOLOGIA.....	40
3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO ESTADO DO RIO DO JANEIRO	40
3.2. CARACTERIZAÇÃO DE ETES HIPOTÉTICAS PARA ESTUDO.....	42
3.3. CÁLCULO DA VAZÃO AFLUENTE DAS ETES	43
3.4. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS PELA QUANTIDADE DE HABITANTES	44
3.5. ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE GASES METANO E DIÓXIDO DE CARBONO PRESENTE NO BIOGÁS.....	45
3.6. ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS E SUA RESPECTIVA ECONOMIA	46
3.7. ESTIMATIVA DE CUSTOS DE UMA ETE	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1. ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS.....	49
4.2. ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE GASES METANO E DIÓXIDO DE CARBONO NO BIOGÁS	49
4.3. ESTIMATIVA DA ENERGIA PRODUZIDA PELO BIOGÁS E SUA RESPECTIVA ECONOMIA.....	50
4.4. AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE UMA ETE COM REATOR UASB.....	51
4.5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A ECONOMIA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS E OS CUSTOS DE UMA ETE	52
4.6. CONSIDERAÇÕES PARA A VIABILIZAÇÃO ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE PLANTAS DE GERAÇÃO DE BIOGÁS	53
5. CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tubos de alimentação vistos do interior de um UASB (ETE Mariléa, Rio das Ostras – RJ).....	18
Figura 2: Tubos de alimentação vistos do interior de um UASB (ETE Mariléa, Rio das Ostras – RJ).....	18
Figura 3: Caixa de distribuição do UASB (ETE Mariléa, Rio das Ostras – RJ).....	19
Figura 4: Defletor de gases visto do interior de um UASB (ETE Mariléa, Rio das Ostras - RJ).	19
Figura 5: Defletor de gases visto do interior de um UASB (ETE Mariléa, Rio das Ostras - RJ).	20
Figura 6: Esquema de um reator anaeróbio de fluxo ascendente.....	21
Figura 7: Composição do Biogás.....	24
Figura 8: Oferta primária de energia pelo mundo.....	27
Figura 9: Comparativo entre títulos verdes e convencionais.....	35
Figura 10: Uso dos recursos de Títulos Verdes.....	38
Figura 11: Custo de Implantação – UASB com pós-tratamento.....	48

LISTA DE TABELA

- Tabela 1:** Composições típicas do biogás produzido nas ETEs. 11
- Tabela 2:** Tipos de tratamento primário de esgoto 15
- Tabela 3:** Tipos de tratamento biológicos de esgoto. 16
- Tabela 4:** Principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios. 22
- Tabela 5:** Estações de tratamento de esgoto da Alemanha. 28
- Tabela 6:** Exemplos de atividades elegíveis para projetos de financiamento com títulos verdes. 37
- Tabela 7:** Estações de tratamento de esgoto com reator anaeróbio no estado do Rio de Janeiro. 40
- Tabela 8:** Comparativo dados disponíveis ATLAS do esgoto com os dados disponibilizados pela BRK Ambiental Macaé e Rio das Ostras. 42
- Tabela 9:** Classificação das ETEs por porte 43
- Tabela 10:** População atendida para as ETEs hipotéticas deste estudo. 43
- Tabela 11:** Estimativa da vazão e produção de Biogás diária. 49
- Tabela 12:** Quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás. 50
- Tabela 13:** Estimativa da energia bruta produzida pelo biogás e sua respectiva economia. 51
- Tabela 14:** Estimativa de custo e potência consumida nas ETEs. 52
- Tabela 15:** Análise comparativa entre os custos de uma ETE e economia oriunda da venda do biogás. 53
- Tabela 16:** Análise comparativo entre a energia produzida pelo biogás e a potência consumida na ETE. 53

1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico, no Brasil, é um direito assegurado pela Constituição de 1988 e tem suas diretrizes nacionais definidas pela Lei nº. 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (BRASIL, 2007). Em seu Artigo 2º, estabelece que:

“os serviços públicos de saneamento básico serão prestados com base nos seguintes princípios fundamentais: [...] III - abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos realizados de formas adequadas à saúde pública e à proteção do meio ambiente” (Brasil, 2007).

Em 15 de julho de 2020, pela Lei nº. 14.026/2020, o marco do saneamento do Brasil foi atualizado e ampliado, considerando prioridade a universalização dos serviços de esgotamento sanitário em todo território nacional:

“Art. 3º Para fins do disposto nesta Lei, considera-se: [...] III - universalização: ampliação progressiva do acesso de todos os domicílios ocupados ao saneamento básico, em todos os serviços previstos no inciso XIV do caput deste artigo, incluídos o tratamento e a disposição final adequados dos esgotos sanitários.” (Brasil, 2020).

De acordo com o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB, 2019), a situação de atendimento da população brasileira a serviços de tratamento de esgoto adequado (rede coletora e fossa séptica) é de 75,9% da população, ou cerca de 54,6 milhões de domicílios. No Brasil, em 2019, o volume de esgoto coletado foi de aproximadamente 6,5 bilhões de m³, dos quais 4,5 bilhões de m³ (69,8%) foram tratados. Entretanto, mesmo que seja um índice percentual alto de atendimento, o Brasil conta com cerca de 17,3 milhões de domicílios com déficit de atendimento (PLANSAB, 2019). Sendo

assim, é possível mensurar o horizonte de investimento para atender a parte da população que não tem acesso ao saneamento básico. Segundo o Atlas do Esgoto (ANA, 2021), para universalizar somente os serviços de esgotamento sanitário (coleta e tratamento), são necessários R\$ 149,5 bilhões em obras até 2035, sendo desse valor quase R\$ 48 bilhões para o tratamento adequado do esgoto.

O objetivo do tratamento de esgoto é remover os poluentes da água utilizada pela população e devolvê-la aos corpos hídricos, evitando contaminá-los. O esgoto tratado deve atender parâmetros mínimos de qualidade, instituídos tanto pela Resolução CONAMA 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, quanto pelas legislações específicas de cada estado e município.

“[...] Art. 3º Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis.” (Resolução CONAMA Nº 430 DE 13/05/2011).

Para realizar esse processo de purificação do esgoto, é necessária uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). O esgoto das residências, estabelecimentos comerciais e indústrias são coletados e encaminhados à ETE através de tubulações. Na ETE, inicialmente ocorre o tratamento preliminar, através da retirada das impurezas de maiores dimensões utilizando-se grades e peneiras. Os processos subsequentes dependem do tipo de tratamento implementado e podem ser divididos em: primário, secundário e terciário (VON SPERLING, 2005). Independentemente do nível de tratamento da ETE, o esgoto tratado deve atender aos parâmetros mínimos de qualidade, e o lodo (primário e secundário) deve ser descartado em local adequado (aterro sanitário).

O tratamento de esgoto também é responsável por emitir gases na atmosfera, como gás carbônico (CO₂) e metano (CH₄), considerados gases que contribuem para o aumento do efeito estufa. Esse último é resultado da degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica e é o responsável pela capacidade calorífica do biogás, que pode ser usado para gerar energia térmica, elétrica e até mesmo como combustível veicular. O biogás pode ser uma solução para transformar o que era um passivo ambiental em um ativo energético. Na Tabela 1 é possível observar a composição típica do biogás, a quantidade dos gases presentes e qual a composição volumétrica típica para o reator anaeróbio e o digestor de lodo.

Tabela 1: Composições típicas do biogás produzido nas ETEs.

Parâmetro	Unidade	Composição Volumétrica Típica	
		Reatores Anaeróbios	Digestores de Lodo
Metano CH ₄	%	60 a 85	60 a 70
Gás carbônico CO ₂	%	5 a 15	20 a 40
Monóxido de carbono CO	%	0 a 0,3	-
Nitrogênio N ₂	%	10 a 25	<2
Hidrogênio H ₂	%	0 a 3	-
Sulfeto de hidrogênio H ₂ S	ppmv	1.000 a 2.000	até 1.000
Oxigênio O ₂	%	Traços	-

Fonte: Tecnologias de Digestão Anaeróbica com Relevância para o Brasil - Substratos, Digestores e uso de Biogás, Probiogás, 2015.

A busca por novas fontes de energia abre caminho para a reutilização do biogás em estações de tratamento para gerar energia, podendo elevar as ETEs a um novo patamar de geração de energia, causando impactos sustentáveis positivos, atingindo ganhos sociais, econômicos e ambientais. A utilização do biogás proveniente de estações de tratamento de esgoto já é uma realidade fora do Brasil. Países como Alemanha, Reino Unido, Itália, Suécia e Estados Unidos já exploram o biogás, que foi inserido na matriz energética destes países. Desta forma, exemplos de incentivos governamentais e fiscais para a produção e utilização do biogás podem ser

vistos nestes países e acompanhar como esses incentivos alavancaram o mercado interno de fontes renováveis de energia e mudaram a percepção dos consumidores. No Brasil, o desenvolvimento para a produção e aproveitamento do biogás vem ganhando espaço com o passar dos anos através de novos projetos.

Sabendo-se da importância da redução de emissões dos gases de efeito estufa para retardamento das emergências climáticas, o uso de fontes renováveis de energia se tornam ainda mais urgentes. Desta forma, vê-se a necessidade de estudos de viabilidade técnica e econômica em ETEs para o aproveitamento energético do biogás.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise do aproveitamento energético do biogás em estações de tratamento de esgoto que utilizam o Reator UASB e a economia financeira decorrente (lucro). Além disso, discute-se soluções para a viabilidade econômica da implantação de plantas de geração de biogás no país.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar a capacidade de produção de biogás proveniente da digestão anaeróbia em um Reator UASB em três ETEs hipotéticas de diferentes portes;
- Quantificar o potencial de geração de energia proveniente deste biogás produzido nas ETEs analisadas e sua eficiência energética;
- Realizar uma análise acerca dos desafios e das perspectivas do aproveitamento do biogás oriundo do tratamento de esgotos no Brasil a partir da comparação com o histórico da Alemanha;

- Propor soluções para a aplicação da geração do biogás em ETEs do Brasil.

1.2. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho tem início com a introdução ao tema e apresentação dos objetivos gerais e específicos do trabalho. Posteriormente, apresenta-se a revisão bibliográfica, onde são abordados os seguintes tópicos: tratamento de esgoto; reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB, RAFA, DAFA); cogeração do biogás; aproveitamento energético do biogás: caso Alemanha; barreiras e soluções para o mercado do biogás no Brasil e; títulos verdes (*green bonds*). Em seguida, apresenta-se a metodologia utilizada nesse trabalho através dos seguintes tópicos: levantamento de dados das estações de tratamento de esgoto do estado do Rio de Janeiro; caracterização de uma ETEs hipotéticas para estudo; cálculo da vazão afluyente das ETEs; estimativa da produção de biogás pela quantidade de habitantes; estimativa de gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás; estimativa do potencial energético do biogás e seu respectivo lucro e; estimativa de custos de uma ETE. No capítulo de resultados e discussões, apresenta-se e discute-se os resultados da aplicação da metodologia. Por fim, apresenta-se a conclusão do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica do trabalho, contendo informações acerca do tratamento de esgoto e de como funciona um Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB), suas principais vantagens e desvantagens e como se difere dos outros tipos de tratamento. Será abordado, também, sobre a cogeração de biogás, como funciona o mercado de biogás na Alemanha, as principais barreiras enfrentadas pelo Brasil nesse mercado e sobre os títulos verdes.

2.1. TRATAMENTO DE ESGOTO

Segundo a ABNT NBR 9648/86, o esgoto sanitário é definido como despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária (ABNT, 1986). Ainda segundo a norma, o esgoto sanitário é composto pela água proveniente do uso para higiene e necessidades fisiológicas humanas, despejo líquido resultante dos processos industriais, da água pluvial que adentra a rede coletora de esgoto e toda água proveniente do subsolo que penetra das tubulações. Toda essa água residual urbana é coletada por um sistema de tubulação, podendo passar por uma ou mais estações elevatórias, que transporta o efluente até uma estação de tratamento de esgoto.

O esgoto doméstico é constituído por aproximadamente 99,9% de água, sendo a fração restante composta por microrganismos e sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos (NUVOLARI, 2003). Portanto, é devido à essa parcela de 0,1% que existe a necessidade de realizar o tratamento do esgoto.

Uma estação elevatória de esgoto se faz necessária quando o efluente, por motivos técnicos e econômicos, é impossibilitado de escoar pela ação da gravidade ou de transpor obstáculos. Portanto, requer um conduto forçado para elevar o esgoto para uma cota mais elevada. Desta forma, o efluente é direcionado das residências, estabelecimentos comerciais e indústrias até uma rede coletora e, por fim, para uma estação de tratamento.

O processo do tratamento de esgoto ocorre por uma série de operações unitárias com objetivo de remover as substâncias indesejáveis, ou para transformação destas substâncias em outras aceitáveis (JORDÃO E PESSOA, 2014). Esses processos são realizados dentro de uma estação de tratamento de esgoto e são classificados como: tratamento preliminar, primário, secundário e terciário.

Através de grades, peneiras e trituradores, o tratamento preliminar consiste na retenção ou redução dos sólidos grosseiros, gorduras e areia do efluente assim que ele chega na ETE. Desta maneira, é possível proteger os dispositivos subsequentes e as tubulações presentes no processo. É nessa etapa que a vazão de chegada do efluente é medido através da *Calha Parshall*, um dispositivo tradicional para medir a vazão em canais abertos.

Posteriormente, o tratamento primário é responsável pela remoção dos sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes. Essa etapa consiste na utilização da sedimentação e flotação (NUVOLARI, 2003). Na Tabela 2 é possível observar o objetivo desses dois tipos de tratamento primário. São processos que antecedem a etapa biológica do tratamento e não são suficientes para o efluente atender os parâmetros mínimos de qualidade.

Tabela 2: Tipos de tratamento primário de esgoto

Tipo de tratamento primário	Objetivo
Decantadores Primários	Por decantação, pode-se separar os sólidos em suspensão da parte líquida do efluente.
Flotação	O flotador funciona por redução de densidade das impurezas, fazendo-as flutuar através de um dispositivo de entrada de ar no tanque onde se encontra o efluente.

Fonte: Adaptado de Nuvolari (2003)

O tratamento secundário do esgoto é responsável pela remoção da matéria orgânica dissolvida e em suspensão através de mecanismos biológicos. Esses mecanismos podem ser anaeróbios (sem presença de

oxigênio) ou aeróbios (com a presença do oxigênio). Esse último, no geral, são processos mais rápidos, eficientes e fáceis de controlar. (NUVOLARI, 2003). Na Tabela 3 observa-se quais são os tipos de tratamento de esgoto anaeróbios (sem a presença de oxigênio) e aeróbios (com a presença de oxigênio).

Tabela 3: Tipos de tratamento biológicos de esgoto.

Anaeróbios (sem a presença do oxigênio)	Aeróbios (com a presença de oxigênio)
Reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	Lagoas Aeradas
Filtro Anaeróbio de Fluxo Ascendente	Filtros Biológicos
Lagoas Anaeróbias	Lodos Ativados
	Lagoas de Maturação

Fonte: Adaptado de Nuvolari (2003)

Dos tratamentos aeróbios, o processo de lodo ativado consome uma quantidade de energia elétrica razoável para incorporação de oxigênio e para acionar as bombas para recirculação. É um processo que gera uma grande quantidade de lodo que necessita ser corretamente disposto. As lagoas aeradas e de maturação demandam de uma grande área, enquanto os filtros biológicos são considerados de difícil operação. Por outro lado, os processos anaeróbios são bastantes promissores em regiões com condições climáticas favoráveis, ou seja, lugares em que as temperaturas se mantêm elevadas e sem grandes alterações durante o ano, uma vez que, geralmente, não dependem de energia e grandes áreas para instalação (NUVOLARI, 2003). Apresentam, como subproduto, o gás metano, que pode ser reaproveitado para geração de energia elétrica, energia térmica, como gás natural ou gás natural veicular.

Já a última etapa, o tratamento terciário de esgoto, é responsável pela remoção de organismos patogênicos, nutrientes e tratamento avançado (filtração final, absorção por carvão, membranas) (NUVOLARI, 2003). É uma etapa que tem como objetivo principal remover poluentes específicos. Alguns

dos processos utilizados nessa etapa são: osmose reversa, troca iônica, cloração entre outros.

2.2. REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE (UASB, RAFA, DAFA)

Os Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente tiveram sua origem na Holanda, na década de setenta e foram denominados de Reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*). Em português tem recebido inúmeras nomenclaturas diferentes para o mesmo processo como: DAFA (Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente) e RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente) (CHERNICHARO, 2007).

O processo de um reator UASB consiste no fluxo ascendente de esgoto através de um leito de lodo denso e de elevada atividade. O esgoto entra pelo fundo do tanque e o efluente deixa o reator através de um decantador interno localizado em sua parte superior. Logo abaixo desse decantador, fica localizado um dispositivo de separação dos gases e sólidos. Esse sistema garante as condições ótimas para a sedimentação das partículas que se desgarram da manta de lodo, permitindo que essas retornem a câmara de digestão, ao invés de serem levadas para fora do sistema (CHERNICHARO, 2007)

Segundo Jordão e Pessoa (2014), um reator UASB pode ser dividido em 5 partes principais:

- *Câmara de digestão*: na parte inferior, onde se localiza a manta de lodo e onde se processa a digestão anaeróbia. O esgoto entra pela parte inferior do tanque (Figuras 1, 2 e 3) e atravessa essa manta por um fluxo ascendente. Parte da matéria orgânica se mantém nessa zona e assim começa o processo de digestão anaeróbia;



Figura 1: Tubos de alimentação vistos do interior de um UASB (ETE Mariléa, Rio das Ostras – RJ).

Fonte: Acervo pessoal da autora, 2021



Figura 2: Tubos de alimentação vistos do interior de um UASB (ETE Mariléa, Rio das Ostras – RJ).

Fonte: Acervo pessoal da autora, 2021.



Figura 3: Caixa de distribuição do UASB (ETE Mariléa, Rio das Ostras – RJ).

Fonte: Acervo pessoal da autora, 2021.

- *Separador de fases*: dispositivo físico responsável pela separação da fase sólida (câmara de digestão) da parte líquida e gasosa, é na verdade um defletor de gases (Figuras 4 e 5);



Figura 4: Defletor de gases visto do interior de um UASB (ETE Mariléa, Rio das Ostras - RJ).

Fonte: Acervo pessoal da autora, 2021.



Figura 5: Defletor de gases visto do interior de um UASB (ETE Mariléa, Rio das Ostras - RJ).

Fonte: Acervo pessoal da autora, 2021.

- *Zona de transição:* entre a câmara digestão e a zona de sedimentação superior;
- *Zona de sedimentação:* o esgoto que penetrou pela parte inferior do reator alcança os vertedouros em uma velocidade ascensional ideal para a sedimentação de sólidos e flocos, os quais retornam para zona de transição e digestão. A parte líquida é recolhida;
- *Zona de acumulação de gás:* o gás produzido na fase da digestão é retido em uma zona superior de acumulação onde é coletado e pode ser reutilizado.

A Figura 6 a seguir ilustra um esquema típico de um reator UASB e as partes que o compõem.

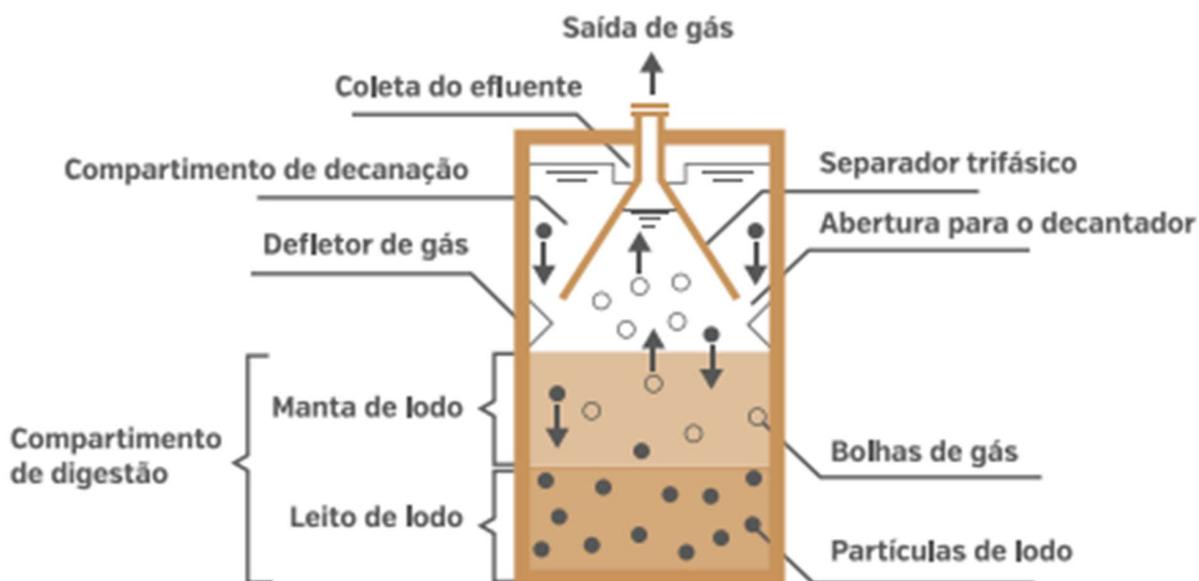


Figura 6: Esquema de um reator anaeróbio de fluxo ascendente.

Fonte: Probiogás, 2015.

Os reatores UASB demandam de um pré-tratamento, com gradeamento e remoção de areias e gorduras, e um pós-tratamento, uma vez que não é um processo suficiente para manter o efluente dentro dos parâmetros mínimos de qualidade.

Tendo em vista que o Brasil é um país atrativo para essa tecnologia de tratamento de esgoto devido as condições climáticas do país, caracterizadas por temperaturas elevadas sem grandes variações térmicas (CHERNICHARO, 2007), apresenta-se, na Tabela 4, algumas vantagens e desvantagens da digestão anaeróbia.

Tabela 4: Principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.

Vantagens	Desvantagens
Baixa produção de sólidos, cerca de 2 a 8 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios	Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória
Baixo consumo de energia e baixo custo operacional	Produção de efluente com aspecto desagradável e usualmente com qualidade insuficiente para atender aos padrões ambientais
Baixa demanda de área	Possibilidade de distúrbios devido a choques de carga orgânica e hidráulica, presença de compostos tóxicos ou ausência de nutrientes.
Baixos custos de implantação, da ordem de 20 a 30 dólares per capita	A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexos e ainda precisam ser estudadas
Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico	A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semente adaptado
Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses	Possibilidade de geração de maus odores e de problemas de corrosão, porém controláveis.
Tolerância a elevadas cargas orgânicas	
Aplicabilidade em pequena e grande escala	
Baixo consumo de nutrientes	

Fonte: Adaptado de Chernicharo, 2007.

Neste contexto, conhecendo-se o tratamento de esgoto por reatores anaeróbios e sabendo-se da vantagem climática do país para sua utilização, cabe conhecer sobre a geração e composição do biogás e seu aproveitamento energético.

2.3. COGERAÇÃO DO BIOGÁS

Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional (2020), o biogás é definido como:

“Uma fonte de energia renovável que se apresenta como ótima alternativa para o mercado nacional. Todo resíduo orgânico, como os restos de comida, frutas e vegetais, resíduos industriais de origem animal e vegetal e esterco animal, sofre ações de bactérias que decompõem estes materiais e geram gases, principalmente dióxido de carbono e metano, que quando não aproveitados, são liberados no meio ambiente, contribuindo para o aumento das taxas de emissão de gases indutores do efeito estufa. Esta decomposição pode ser realizada de maneira controlada, possibilitando a geração de energia, por meio do aproveitamento do metano, presente em grandes concentrações no biogás.”

Como citado anteriormente, a digestão anaeróbia do lodo dentro de um Reator UASB gera gases, denominados de “biogás”. O lançamento desses gases na atmosfera terrestre contribui para a destruição da camada de ozônio e agravamento do superaquecimento da terra (efeito estufa). A composição usual do biogás está apresentada na Figura 7 abaixo.

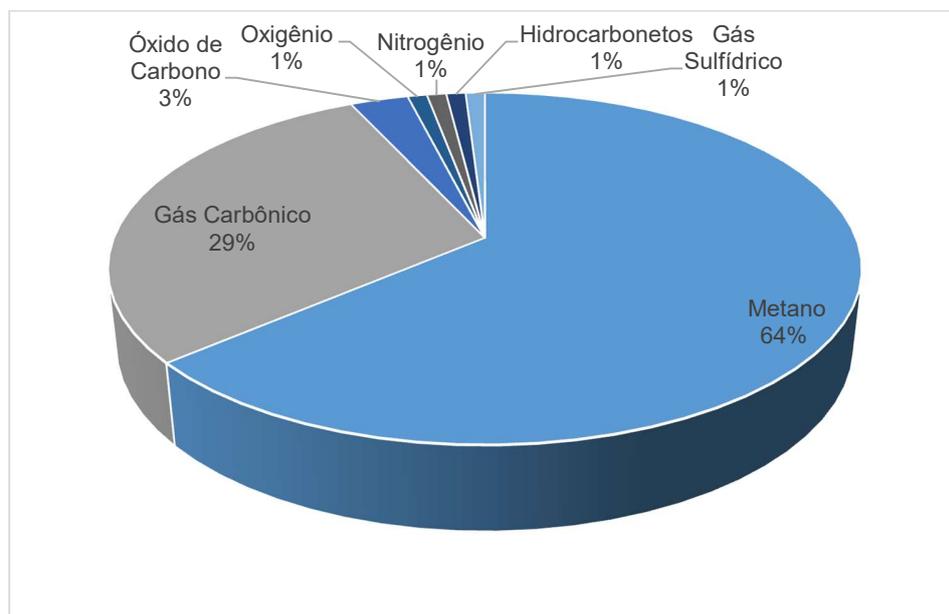


Figura 7: Composição do Biogás.

Fonte: Adaptado de Jordão e Pessoa (2014)

Em um reator UASB, a produção de gás está na faixa de 5 a 20 l/hab.dia, dos quais o metano representa em torno de 50 a 70% do total produzido. Nessa mistura, também pode ser encontrado os seguintes gases: CO_2 , NH_3 , H_2S entre outros. Esses gases podem ser liberados na atmosfera, queimados ou aproveitados para outros usos (JORDÃO E PESSOA, 2014).

Segundo a ABNT NBR 12.209/11, os gases provenientes da digestão anaeróbia do lodo, quando não aproveitados, podem ser eliminados através de queimadores ou dissipados na atmosfera sem queima, quando comprovadamente não houver risco de incêndio, explosão e problemas de odor. Entretanto, com a evolução da tecnologia, a queima desses gases não é a única solução possível e disponível. Segundo Jordão e Pessoa (2014), existem diferentes usos para o biogás e alguns deles são:

- **Geração de energia elétrica:** é possível atender parcialmente ou totalmente a demanda da ETE por energia elétrica. Se for o caso de a produção exceder o consumo de energia, é possível vender o excedente para a concessionária de energia;

- *Geração de energia térmica*: pode servir como fonte de aquecimento dos digestores, se necessário, através dos trocadores de calor;
- *Geração conjunta de energia elétrica e térmica*: o que se dá o nome de cogeração e traz inúmeras vantagens;
- *Combustível para outras unidades na estação de tratamento*: em particular para a unidade de secagem do lodo, quando existirem.

A cogeração de energia através do biogás com o uso de microturbinas pode gerar de 25 a 100kW. Essa eficiência energética é a mesma de motores pequenos com injeção por centelha com baixas emissões, fora a recuperação de vapor de baixa pressão. O biogás pode ser usado também como GNV – Gás Natural Veicular. O gás tem baixo impacto no meio ambiente se comparado a gasolina, que permite perfeita utilização em centros urbanos. E como gás natural (GN), pode também ser usado nos domicílios, como em cozinhas, vindo como gás encanado. O GN tem uma composição de 90% metano, não tem oscilações e é fornecido de maneira constante (EOS CONSULTORES, 2019).

A produção de biogás, a partir dos esgotos sanitários, depende das características do tratamento e da quantidade de matéria orgânica presente no efluente. O processo de tratamento anaeróbio é capaz de remover entre 60 e 70% da DQO (VON SPERLING, 2005). Segundo Metcalf & Eddy (2003): a produção de gás metano por quantidade de DQO removida é de $0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}_{\text{removida}}$. Portanto, o tratamento anaeróbio de esgoto é uma opção que libera uma quantidade de gás metano significativa na atmosfera.

No Brasil, já existe um projeto de incentivo à integração do biogás na cadeia produtiva brasileira, o Projeto GEF Biogás Brasil (GEF BIOGÁS BRASIL, 2021), que é administrado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e implementado pela Organização das Nações Unidas

para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO). O projeto tem como objetivo principal reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e a dependência nacional de combustíveis fósseis. Além dos benefícios econômicos e sociais, a geração de energia a partir do biogás também reduz a emissão de gases poluentes de efeito estufa na atmosfera, aprimorando o desempenho ambiental do agronegócio brasileiro e a gestão de resíduos urbanos no país.

O projeto GEF Biogás Brasil oferece apoio técnico para conversão de resíduos orgânicos em energia e combustível, além de suporte na criação de modelos de negócios e assistência especializada sobre financiamento e políticas públicas referentes ao setor.

Em 2013, foi desenvolvido o Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil - Probiogás (BRASIL, 2015) Fruto da cooperação técnica entre o Governo Brasileiro, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e o Governo Alemão, por meio da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH, o PROBIOGÁS tem como foco principal o aproveitamento do biogás gerado no tratamento anaeróbio dos esgotos sanitários, dos resíduos sólidos urbanos, agropecuários e dos efluentes agroindustriais. (BRASIL, 2015). Tem por objetivo, ainda, ampliar o uso energético eficiente do biogás no saneamento básico e em iniciativas agropecuárias e agroindustriais, além de inserir o biogás e o biometano na matriz energética nacional, contribuindo para a redução de emissões de gases do efeito estufa.

2.4. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS: CASO ALEMANHA

A matriz energética mundial ainda é fortemente dependente de fontes fósseis, sobretudo o petróleo (31%) e o carvão (29%). As fontes renováveis de energia representam somente 14% da produção total de energia, sendo a biomassa responsável por 74% desse total. (WBA, 2016, apud TAVARES, 2019). É possível ver essa distribuição na Figura 8 abaixo:

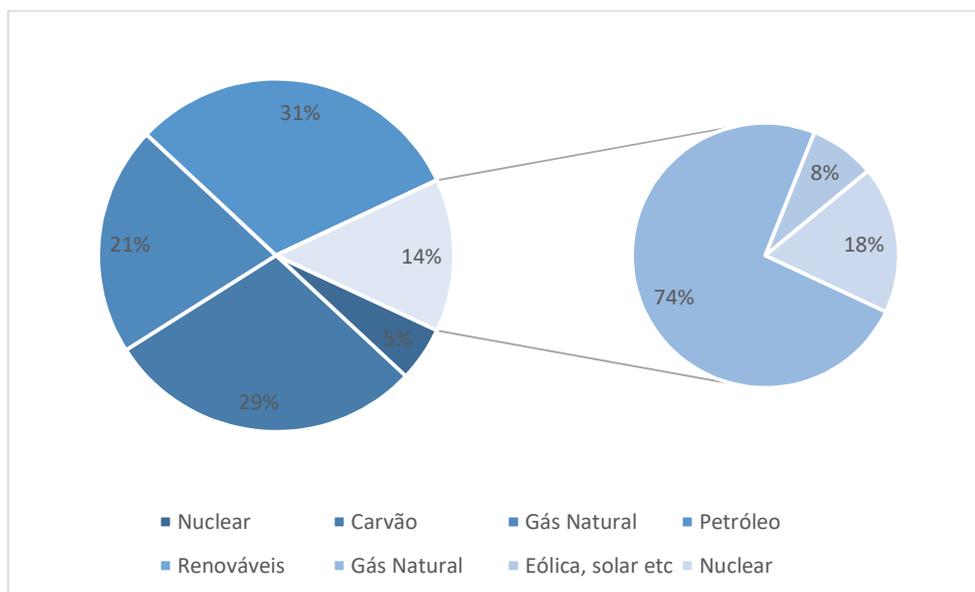


Figura 8: Oferta primária de energia pelo mundo.

Fonte: Adaptado de WBA (2016 apud Tavares, 2019).

O biogás é uma fonte renovável de energia e ganha espaço em dois contextos globais: i) a necessidade de redução de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa e a busca pela segurança energética e; ii) garantia de acesso aos serviços de energia através da geração descentralizada. Além disso, sua aplicação é um meio de incentivar a valorização de resíduos e efluentes, e garantir a melhoria da condição ambiental de áreas rurais e urbanas. (BRASIL, 2016)

O biogás vem se destacando como fonte alternativa de energia no âmbito internacional. Na Europa, a capacidade instalada em plantas de aproveitamento do biogás é superior a 8.000 MW, concentrada principalmente na Alemanha, Reino Unido e Itália, enquanto nos Estados Unidos essa capacidade é de cerca de 2.000 MW (IEA, 2014, apud BRASIL, 2016).

No ano de 2017, na Alemanha (que conta com uma população de aproximadamente 80 milhões de pessoas), a capacidade elétrica instalada gerada pela produção de biogás era de aproximadamente 4,5 GW (FNR, 2018, apud DWIH São Paulo, 2019), distribuída em 8.700 sistemas. A

capacidade média de uma instalação é de 30 a 50 kW. Essas usinas são responsáveis por quase 35% da geração bruta de eletricidade na Alemanha (UBA, 2019, apud DWIH São Paulo, 2019).

Na Alemanha, existem cerca de 10 mil estações de tratamento de esgoto. A Tabela 5 apresenta a relação destas com o porte de atendimento (em habitantes atendidos). Observa-se que 4.150 ETEs atendem uma população equivalente menor ou igual a mil habitantes cada uma (DWA, 2010, apud CARDOSO MOREIRA, 2017, p. 39).

Tabela 5: Estações de tratamento de esgoto da Alemanha.

Porte (Habitantes atendidos)	Número (aproximado)
> 100 mil habitantes	260
50 mil < x ≤ 100 mil habitantes	315
10 mil < x ≤ 50 mil habitantes	1660
5 mil < x ≤ 10 mil habitantes	865
1 mil < x ≤ 5 mil habitantes	2385
< 1 mil habitantes	4150

Fonte: Adaptado de DWA, 2016 apud Cardoso Moreira, 2017, p. 40.

Com relação ao aproveitamento energético de biogás, a Alemanha é uma referência mundial, apresentando 10.786 plantas, em um total de 17.240 plantas de biogás na Europa (EBA, 2014, apud CARDOSO MOREIRA, 2017, p. 40), ou seja, o maior mercado de biogás europeu. Todas essas plantas totalizam uma potência instalada de 8.293 MW.

Esse cenário apenas é possível na Alemanha por causa dos incentivos governamentais, tais como: investimentos nas instalações; preços preferenciais de venda da eletricidade produzida à rede; facilidades de ligação à rede elétrica; agilidade dos processos da parte dos governos e administrações; maior acesso a financiamentos e incentivos fiscais. (CARDOSO MOREIRA, 2017)

Como exemplo desses incentivos na Alemanha, podemos destacar as tarifas do tipo *feed-in* para fontes renováveis de energia. Através deste

esquema, o governo estabelece preços fixos de longo prazo, em geral superiores aos preços pagos pelas fontes convencionais de energia e garantias de entrada da energia na rede para produtores de fontes renováveis (BILEK, 2012, apud TAVARES, p 144, 2019). Essa tarifa é calculada em cima do tipo de biomassa utilizada para gerar o biogás e o porte da planta, e, além disso, existe um bônus adicional à tarifa se o biogás for transformado em biometano. (DEUTSCHE BANK, 2012, apud TAVARES, p 144, 2019) Os subsídios estabelecidos, bem como a queda na incerteza, atraem investidores interessados nas oportunidades surgidas.

2.5. BARREIRAS E SOLUÇÕES PARA O MERCADO DO BIOGÁS NO BRASIL

O potencial de produção de biogás do Brasil é comprovadamente elevado e vem sendo estudado e discutido há alguns anos. Porém, o país ainda se mantém muito dependente dos combustíveis fósseis e explora muito pouco as opções de energia mais eficientes e sustentáveis.

No Brasil, há algumas plantas de produção e aproveitamento energético do biogás, totalizando 76 MW de potência instalada (ANEEL, 2015). Há também diversas iniciativas de pesquisa e desenvolvimento, de organização do setor ou mesmo de discussões sobre regulamentação e incentivos do poder público. Apesar disso, observa-se certa dificuldade de crescimento e consolidação dessa fonte de energia no mercado (BRASIL, 2016).

Isto motivou o desenvolvimento do estudo “Barreiras e Soluções para o Mercado de Biogás no Brasil”, resultado do Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás – PROBIOGÁS, o qual foi elaborado entre janeiro de 2014 a maio de 2015. Foram entrevistadas 35 empresas e instituições do setor que implantaram ou planejam implantar empreendimentos voltados para a produção do biogás. Os entrevistados foram questionados sobre quais eram as barreiras existentes para o

desenvolvimento do setor do biogás no país, as respostas foram separadas em 4 principais pontos (BRASIL, 2016):

- *Relação incerta entre o custo do projeto e seu benefício comercial:* Os custos para a implementação dos projetos de biogás são extremamente altos e insuficientes para manter o projeto. Além disso, identificou-se barreiras financeiras para aquisição de *know-how*, extremas exigências de qualidade para comercialização do biogás, baixo volume de capacidade do mercado interno, impostos elevados para importação de equipamentos, entre outros.
- *Reduzida quantidade de projetos de referência bem sucedidos em escala comercial:* A implantação de um programa piloto exige um “pioneirismo” dos empreendedores, uma análise transparente e demonstração empírica, o que não parece ocorrer de forma produtiva e abrangente em todo o país, portanto, ainda existe muita incerteza e dificuldades no desenvolvimento do mercado de biogás. As experiências bem sucedidas que ocorreram fora do país não são suficientes para gerar segurança para as empresas, e o capital estrangeiro tem incertezas quanto ao investimento interno por causa do porte do investimento, regulamentação e oportunidades.
- *Dificuldade no acesso a informações técnicas, comerciais e legais:* O comércio do biogás pode estar incluído em diversos arranjos comerciais e está inserido em uma grande variedade de mercados e culturas de negócios, portanto exige grandes esforços para o desenvolvimento de projetos. Portanto, observa-se que há pouco acesso a informações no país sobre as tecnologias apropriadas para a produção e aproveitamento de biogás. Acerca da falta de conhecimento sobre as oportunidades, custos, formas de comercialização e

financiamento de projetos de biogás no Brasil, observa-se que, embora haja alguns mecanismos de incentivo, como Resolução ANEEL 482/2012, e redução de impostos para fontes renováveis, há pouca divulgação e pouco conhecimento dos próprios órgãos responsáveis pela implementação;

- *Inexistência de políticas específicas relacionadas ao biogás*: Os instrumentos de política, como o marco regulatório, licenciamentos ambientais, linhas de financiamento, incentivos fiscais e tributários e leilões de energia específicos, devem ser adaptados à realidade do biogás de maneira integrada e estratégica. Em relação às condições de financiamento, há algumas linhas que se adequam aos projetos de biogás, como financiamentos para infraestrutura, de cunho socioambiental ou de fomento à indústria. Porém, algumas particularidades acabam dificultando ou impossibilitando o acesso à linhas existentes. Portanto, a falta de linhas de financiamento, de um marco regulatório e de incentivos específicos para projetos de biogás reduz a atratividade econômico-financeira de projetos, podendo inclusive inviabilizar sua execução.

O interesse em mudar esse cenário no país deve ser incentivado tanto pelo setor privado quanto pelo governo. Novas políticas públicas devem ser adotadas para viabilizar e expandir esse mercado, incentivar o desenvolvimento de tecnologias e fortalecer empresas que sejam capazes de atuar de maneira competitiva. Essas novas políticas devem interferir no mercado tanto direta quanto indiretamente. As ações do lado da oferta devem atuar sobre os equipamentos, construtoras e operadoras de plantas de biogás, aumentando a competitividade, barateando as tecnologias e tornando-as acessíveis. Por outro lado, as políticas aplicadas na demanda precisam criar consumidores para esse tipo de fonte de energia, por exemplo (TAVARES, 2019).

Exemplos de incentivos governamentais e fiscais para a produção do biogás podem ser vistos na Europa e na América do Norte, em países como a Alemanha, Reino Unido, Suécia, Dinamarca, Estados Unidos, entre outros. Fato é que existem inúmeros exemplos pelo mundo de como esses incentivos alavancaram o mercado interno de fontes renováveis de energia e mudaram a percepção dos consumidores. No Brasil, o desenvolvimento para a produção e aproveitamento do biogás ocorre em passos lentos. Entretanto, projetos como Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (Probiogás) que ocorreu de 2013 a 2017 já obteve resultados positivos que representam uma nova perspectiva da inserção do biogás na matriz energética do país. Alguns desses resultados foram:

- Convites feitos pela agência regulatória ANEEL para apresentação de projetos de geração e energia a partir de biogás, abriram o acesso a financiamento de 476 milhões de reais;
- Em janeiro de 2015, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP, publicou uma especificação, que permite a injeção de biometano produzido a partir de resíduos da agropecuária na rede pública de gás natural e o seu uso com combustível veicular;
- Em março de 2016, o Ministério das Cidades incluiu explicitamente o uso do biogás como fonte de energia em seus critérios para aplicação de recursos em projetos de tratamento de esgoto;
- Em maio de 2016, pela primeira vez um projeto de biogás com capacidade instalada de 21 MW, que usa resíduos agrícolas, ganhou a um preço de R\$ 251/MWh em um leilão de energia (A-5). A planta começará a produzir eletricidade a partir de 2021 entre outros resultados positivos. (GIZ)

Além disso, já podemos observar alguns exemplos de projetos bem-sucedidos de geração de energia através do biogás, como, por exemplo, a estação Arrudas, localizada no município de Sabará - MG, que trata o esgoto utilizando reatores anaeróbios (UASB) seguidos de pós-tratamento aeróbio. A estação é projetada para tratar uma vazão média de 2,25 m³/s, o que corresponde a uma população atendida de cerca de 1 milhão de habitantes. (COPASA, 2012). O biogás é produzido nos digestores anaeróbios, e para o seu aproveitamento foi implantada uma Pequena Central Termoelétrica (PCT), com potência instalada de 2,4 MW, que consiste em um conjunto de microturbinas movidas a biogás. Todo o biogás gerado, que antes da existência da PCT era queimado sem qualquer aproveitamento energético, é coletado e passa por um sistema de condensação para a retirada da umidade. O biogás é mantido sob pressão em um conjunto de gasômetros que alimentam um sistema de tratamento de gás. Atualmente, o biogás é aproveitado para gerar energia elétrica e calor (ALVES apud CANCELLI, 2013).

E também, é possível ressaltar a usina de geração de biogás instalada no Paraná, que gera energia a partir da combinação de resíduos orgânicos e lodo de esgoto. A CS Bioenergia, formada pela estatal Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e pelo grupo Cattalini Bio Energia, está localizada em Curitiba e utiliza o lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgoto Belém. A planta consiste, inicialmente, de dois reatores vedados, aquecidos e equipados com misturadores, com capacidade de 5.000 m³ cada. Em uma futura expansão, mais dois tanques serão adicionados. O potencial energético da planta ao início da operação será de 2,8 MW e a energia elétrica será vendida no mercado livre por intermédio dos regulamentos preconizados na Resolução 506/2012 da ANEEL. (Sanepar 2016)

Além desse exemplo, pode-se observar outros projetos em operação no país, como as ETEs implantadas pelas companhias de saneamento

Sanepar, Sabesp, entre outros. No entanto, o principal problema enfrentado para realização de projetos dessa natureza ainda é a viabilidade econômica.

Além disso, vale destacar que a produção de energia através do biogás traz benefícios sociais e ambientais para o país. A produção dessa energia auxilia na aplicabilidade das metas desenvolvidas pela agenda mundial, adotada na Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável em setembro de 2015, composta por 17 objetivos e 169 metas a serem atingidos até 2030, chamadas de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Nas 17 ODS estão previstas ações mundiais nas áreas de erradicação da pobreza, segurança alimentar, agricultura, saúde, educação, igualdade de gênero, redução das desigualdades, energia, água e saneamento, padrões sustentáveis de produção e de consumo, mudança do clima, cidades sustentáveis, proteção e uso sustentável dos oceanos e dos ecossistemas terrestres, crescimento econômico inclusivo, infraestrutura, industrialização, entre outros (BRASIL, 2015)

Por fim, observa-se que a viabilidade dos projetos desse viés no país está atrelada à falta de incentivo e investimento no setor. O mercado de saneamento ainda tem uma certa dificuldade em avaliar a cogeração do biogás como um investimento lucrativo. Em uma análise econômica conduzida e apresentada por Pereira e Cammarota (2017), através da taxa interna de retorno (TIR) e a taxa mínima de atratividade, foi constatado que o modelo de estação com reator UASB se mostra mais vantajoso economicamente para projetos de ETEs destinados às escalas de 100.000 e 500.000 habitantes, indicando ser vantajosos os projetos de linha de biogás nas ETEs e a relevância desses projetos para as concessionárias e possíveis investidores do setor de saneamento.

Portanto, a captação de recursos para implantação desses projetos pode ocorrer a partir de títulos verdes (*green bonds*) que financiam projetos sustentáveis.

2.6. TÍTULOS VERDES (*GREEN BONDS*)

Os títulos verdes são títulos de renda fixa utilizados na captação de recursos para financiar exclusivamente projetos sustentáveis, como exemplo de: energia renovável, eficiência energética, gestão sustentável dos resíduos, projetos florestais e outros que podem gerar um impacto positivo no ponto de vista ambiental e climático. Através deles é possível financiar e viabilizar novas tecnologias (FEBRABRAN, 2016). Esses títulos 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).

As principais características de um título verde, que o diferem de um título convencional, são os usos dos recursos em projetos verdes e a promoção do atributo ambiental dos títulos junto aos investidores. Na Figura 9 é possível observar essa comparação (FEBRABRAN, 2016).

Características	Títulos Verdes	Títulos convencionais
São títulos de dívida	✓	✓
Pagam cupom periódico ou no vencimento	✓	✓
Podem receber nota de rating de crédito	✓	✓
Tipologia de acordo com garantia da dívida	✓	✓
Financiamento ou refinanciamento	✓	✓
Recursos destinados para Projetos Verdes	✓	eventualmente
Rotulados como verdes e promovidos dessa forma junto aos investidores	✓	
O emissor se compromete a algum nível de transparência e documentação sobre o uso dos recursos nos Projetos Verdes	✓	
Credenciais verdes dos projetos recebem avaliação externa	✓	

Figura 9: Comparativo entre títulos verdes e convencionais.

Fonte: FEBRABRAN, 2016.

A emissão desse tipo de título garante benefícios tanto para o emissor quanto para o investidor. Para o emissor, os benefícios vão desde aumentar e diversificar a base de investidores com fundos sustentáveis até a ganhos de reputação positivos, uma vez que a marca é reconhecida pelo comprometimento com a conservação do meio ambiente e com a mitigação e prevenção dos riscos originados pelas mudanças climáticas. Para os investidores, a aplicação dos recursos tem maior transparência. Os projetos financiados costumam ser estruturados a longo prazo alinhados com as políticas da empresa. Além disso, possuem clareza e destinação específica, para que possam monitorar os investimentos de forma mais assertiva (ABGI, 2020)

O mercado dos títulos verdes possui peculiaridades em relação às emissões tradicionais, é necessário Agentes de Avaliação Externa ou *Second Opinion*, ou seja, instituições que atestam por meio de um parecer independente as características ambientais do projeto além de indicar para quais projetos os recursos captados serão destinados. No Brasil, as instituições de avaliação externa são: FEBRABAN (Federação Brasileira de Banco) e CEBDS (Conselho Empresarial Brasileiro do Desenvolvimento Sustentável) (FAYH, 2020).

No mais, os emissores dos Títulos Verdes definem a que categorias de Projetos Verdes os recursos obtidos com a emissão serão destinados. Pode-se observar as principais categorias e seus exemplos na Tabela 6 (FEBRABRAN, 2016).

Tabela 6: Exemplos de atividades elegíveis para projetos de financiamento com títulos verdes.

Categorias	Exemplos
Energia Renovável	Geração, transmissão, armazenamento ou uso de energia solar, eólica, bioenergia, hidráulica, maremotriz (energia das marés), geotérmica.
Eficiência Energética (equipamentos e produtos)	Edificações sustentáveis (retrofit e novas construções); sistemas eficientes de armazenamento; sistemas eficientes de aquecimento; redes inteligentes (smart grids)
Prevenção e controle da poluição	Tratamento de efluentes; controle de emissões (GEE e outros poluentes); descontaminação de solos; reciclagem e geração de produtos de alto valor agregado; geração de energia a partir de resíduos; análises e monitoramentos ambientais
Gestão sustentável dos recursos naturais	Agropecuária de baixo carbono; silvicultura e manejo florestal sustentável; conservação, restauração e recomposição de vegetação nativa; recuperação de áreas degradadas; pesca e aquicultura sustentável
Conservação da biodiversidade	Proteção de habitats terrestres, costeiros, marinhos, fluviais e lacustres; uso sustentável da biodiversidade; implementação de corredores ecológicos
Transporte limpo	Produção e uso de veículos elétricos e híbridos; veículos não motorizados; ferroviário e metroviário; multimodal; infraestrutura para veículos limpos
Gestão sustentável dos recursos hídricos	Tratamento e despoluição da água; infraestrutura para captação e armazenamento; infraestrutura para distribuição; proteção de bacias hidrográficas; sistemas sustentáveis de drenagem urbana; sistemas para controle de enchentes
Adaptação às mudanças climáticas	Monitoramento climático ou de alerta rápido; infraestrutura de resiliência (barragens e/ou outras estruturas); desenvolvimento/uso de variedades resistentes a condições climáticas extremas
Produtos, tecnologias de produção e processos eco eficientes	Selos ecológicos/certificados de sustentabilidade; desenvolvimento de tecnologia/produtos biodegradáveis ou de origem renovável; produtos/processos eco eficientes

Fonte: Guia para emissão de títulos verdes no Brasil, FEBRABRAN, 2016.

Em 2015, no Brasil, iniciou-se a primeira operação com títulos verdes para captações internacionais, desde então, o país já captou mais de US\$20 milhões em títulos verdes, no entanto, ainda há muito o que conquistar. No Brasil existe um grande potencial de crescimento na emissão de títulos verdes, principalmente pela abundância de recursos naturais. De 2014 a 2019, foram emitidos cerca de US\$ 5,3 milhões em títulos verdes no país. Em janeiro de 2020, a empresa geradora de energia, *Faro Energy*, captou R\$ 15 milhões para financiar um projeto de energia eólica em Pirapora, no interior de São Paulo. (FAYH, 2020)

No mercado internacional, os Títulos Verdes são geralmente emitidos para financiar projetos em setores de: Transporte; Energia Renovável; Eficiência Energética; Água; Florestal; Agronegócio; Construção Civil e Saneamento. Na figura 10 abaixo é possível ver essa distribuição ao redor do mundo de acordo com os dados disponíveis de 2019. Nesse gráfico é possível observar que a porcentagem de títulos verdes emitidos para o setor de energia supera todos os outros setores (CLIMATE BONDS INITIATIVE, 2019).

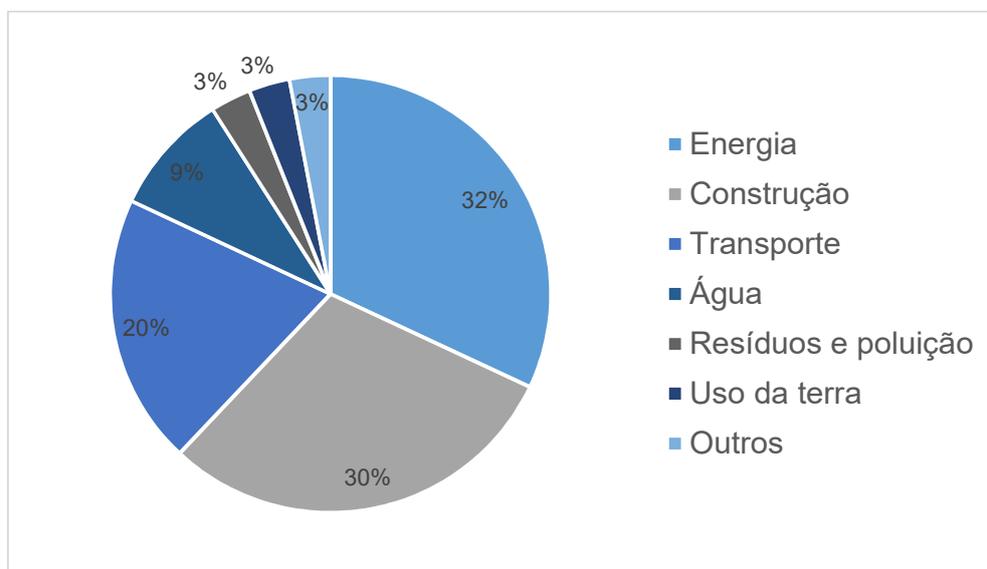


Figura 10: Uso dos recursos de Títulos Verdes.

Fonte: Climate Bonds Initiative, 2019.

De acordo com a análise de mercado recente da *Climate Bonds Initiative*, os Títulos Verdes que financiam projetos de Energia Renovável representam 42,8% do total das emissões de títulos rotulados como Verdes no mundo. Este tipo de título pode se tornar o instrumento natural de (re)financiamento desta indústria. Além do mais, o Plano Decenal de Energia, as metas de redução de Gases de Efeito Estufa (GEE) nacionais incluem o aumento da proporção de energia eólica, solar e de biomassa para, pelo menos, 23% da oferta nacional de energia, além do aumento da eficiência energética no setor elétrico em 10% até 2030 (FEBRABRAN, 2016). Com isso, é possível perceber o enorme potencial dos títulos verdes em fomentar a geração de energia por fontes sustentáveis, incluindo o biogás.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia, adaptada de Maques (2014), para atingir o objetivo deste estudo. Para ETEs que utilizam o Reator UASB no seu ciclo de tratamento foi estimada a quantidade de biogás produzido, permitindo estimar a quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás e o seu consequente potencial energético e lucro associado.

3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO ESTADO DO RIO DO JANEIRO

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2017), dos 2013 municípios brasileiros que possuíam tratamento de esgotos, cerca de 784 utilizavam reatores anaeróbicos. Das regiões brasileiras que mais utilizavam esse tipo de tratamento, destaca-se o Sudeste, com 346 reatores anaeróbicos, o que indica um razoável potencial de aproveitamento energético do biogás nessa região.

Para o desenvolvimento desse trabalho, inicialmente optou-se por utilizar dados reais de ETEs do Estado do Rio de Janeiro. Para isso, levantou-se informações na base do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2019) através do mapa da Outorgas de Direito de Recursos Hídricos. Foi necessário filtrar esse banco de dados pela localização (estado do Rio de Janeiro) e pelo tipo de tratamento (Reator UASB). Ao todo, foram contabilizadas 53 estações de tratamento que estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7: Estações de tratamento de esgoto com reator anaeróbio no estado do Rio de Janeiro.

Estação de Tratamento	Cidade	Estação de Tratamento	Cidade
ETE Morro dos Morenos	Angra dos Reis	ETE Manibra	Barra do Pirai
ETE Monsuaba	Angra dos Reis	ETE Bom Jesus do Itabapoana	Bom Jesus do Itabapoana
ETE Jacuecanga	Angra dos Reis	ETE Donana	Campos dos Goytacazes
ETE Bonfim	Angra dos Reis	ETE Imperial	Campos dos Goytacazes
ETE Califórnia Barra do Pirai	Barra do Pirai		

<i>Estação de Tratamento</i>	<i>Cidade</i>
ETE Chatuba	Campos dos Goytacazes
ETE Guarus	Campos dos Goytacazes
ETE Mutum	Macaé
ETE Centro - Macaé	Macaé
ETE Lagomar	Macaé
ETE Sana	Macaé
ETE Maricá	Maricá
ETE Miguel Pereira	Miguel Pereira
ETE Barreto	Niterói
ETE Toque-Toque	Niterói
ETE Jurujuba	Niterói
ETE Piratininga (Camboinhas)	Niterói
ETE Itaipava (Granja Brasil)	Petrópolis
ETE Rua O	Petrópolis
ETE Côrreas	Petrópolis
ETE Palatino	Petrópolis
ETE Quitandinha - Petrópolis	Petrópolis
ETE Unimed	Petrópolis
ETE Rodoviária	Petrópolis
ETE Posse	Petrópolis
ETE Sub Bacia A	Piraí
ETE Sub Bacia D	Piraí
ETE Centro Porto Real	Porto Real

<i>Estação de Tratamento</i>	<i>Cidade</i>
ETE Marina	Porto Real
ETE Santo Antônio	Porto Real
ETE Piteiras	Quissamã
ETE Mauá	Resende
ETE Capelinha	Resende
ETE Fumaça	Resende
ETE Alegria Resende	Resende
ETE Monet	Resende
ETE do Baixinho	Rio das Flores
ETE Marilea	Rio das Ostras
ETE Pedra de Guaratiba	Rio de Janeiro
ETE Triunfo	Santa Maria Madalena
ETE Saquarema	Saquarema
ETE Boa Vista	Seropédica
ETE Bairro Cidadão	Três Rios
ETE Bugio	Volta Redonda
ETE Gil Portugal (ETE Correios)	Volta Redonda
ETE Aterrado	Volta Redonda
ETE Volta Grande IV	Volta Redonda
ETE Silvino Streva	Volta Redonda
ETE Santa Rita	Volta Redonda

Fonte: SNIRH, 2019.

Através desse levantamento de dados, foi necessário pesquisar nos relatórios do SNIRH: Atlas do Esgoto Despoluição de Bacias Hidrográfica de 2017, os dados fornecidos pelo Ministério das Cidades, Agência Nacional de Águas (ANA) e pelo Governo Federal sobre a vazão afluente, a população atendida e a carga lançada de DBO no corpo receptor por dia das estações de tratamento de esgoto do Rio de Janeiro. As informações contidas nesses relatórios são informações de 2013 e de uma previsão preliminar para 2035. No entanto, a título de comparação, as informações do ATLAS foram comparadas com as informações disponibilizadas pela concessionária BRK Ambiental das cidades de Macaé e Rio das Ostras e foi possível observar

uma defasagem dos dados que impossibilita a confiabilidade das informações apresentadas. Os dados foram comparados apenas com os da concessionária BRK porque as outras prestadoras de serviço não disponibilizam essas informações no site. Na Tabela 8 abaixo é possível observar essa comparação.

Tabela 8: Comparativo dados disponíveis ATLAS do esgoto com os dados disponibilizados pela BRK Ambiental Macaé e Rio das Ostras.

Nome	Estações de tratamento (BRK Ambiental- 2021)		Estações de Tratamento (ATLAS do esgoto - 2013)	
	Vazão (l/s)	População Atendida	Vazão (l/s)	População Atendida
ETE MARILEA	70	36.000	38,1	26.754
ETE MUTUM	30	-	23,7	16.695
ETE CENTRO/MACAÉ	77	-	6,0	4.241
ETE LAGOMAR	23	-		

Fonte: Elaborado pela autora.

Devido à divergência entre as informações disponibilizadas pela concessionária das apresentadas no SNIRH (2017), para efeitos de cálculo, decidiu-se adotar estações de tratamento de esgoto hipotéticas.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DE ETES HIPOTÉTICAS PARA ESTUDO

Visando criar ETES hipotéticas para o desenvolvimento deste estudo, verificou-se a classificação de acordo com a capacidade de tratamento por número de habitantes (porte). Como a norma brasileira não apresenta uma metodologia para classificação, apenas por tipo de tratamento, utilizou-se, neste trabalho, a classificação desenvolvida por SANEPAR (2020), disponível em suas diretrizes para elaboração de projetos de sistemas de tratamento de esgoto. Essa classificação por porte é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9: Classificação das ETEs por porte

Porte	Capacidade de tratamento (habitantes)
Pequeno	Até 30.000
Médio	Entre 30.000 e 250.000
Grande	Superior a 250.000

Fonte: Adaptado de Sanepar (2020).

Criou-se, então, uma ETE para cada porte presente na bibliografia. Para a capacidade de tratamento das ETEs de pequeno e médio porte, adotou-se o valor médio das faixas apresentadas na Tabela 9. Já para a ETE de porte grande, adotou-se o menor valor possível, uma vez que não seria possível determinar o valor médio. Os valores adotados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: População atendida para as ETEs hipotéticas deste estudo.

Porte	População atendida
Pequeno	15.000
Médio	140.000
Grande	250.000

Fonte: Elaborado pela autora.

Com a população atendida fixada, a próxima etapa consiste em estimar a vazão unitária de afluente de cada ETE, e, assim, determinar qual metodologia de cálculo será utilizada para estimar a quantidade de biogás produzido.

3.3. CÁLCULO DA VAZÃO AFLUENTE DAS ETES

Para as três ETEs, considerou-se que, em seu ciclo de tratamento, utilizam o Reator UASB. Portanto, é necessário também estimar a vazão unitária de esgoto afluente. Essa estimativa pode ser calculada através da Equação 1:

$$q = R * C \quad (\text{Eq.1})$$

Sendo:

q = Vazão unitária de esgoto [L/hab.dia];

R = Coeficiente de retorno [%];

C = Consumo médio de água [L/hab.dia].

Para o cálculo dessa estimativa, utilizou-se o consumo médio de água indicado na NBR 7.229/1993 para uma residência de alto padrão, igual a 160 L. Para o coeficiente de retorno da água potável à rede coletora de esgoto, adotou-se o valor de 0,8, indicado na NBR 9.649/1986.

Com a vazão unitária de esgoto calculada e a população atendida é possível calcular a vazão média de afluente em cada ETE.

$$Q = P * q \quad (\text{Eq.2})$$

Sendo:

q = Vazão unitária de esgoto [L/hab.dia];

Q = Vazão média contribuinte afluente a cada ETE [L/dia];

P = População estimada contribuinte de cada ETE [hab].

3.4. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS PELA QUANTIDADE DE HABITANTES

A metodologia usualmente utilizada para calcular a estimativa de produção de biogás foi elaborada por Chernicharo (2007). Entretanto, para esses cálculos, seria necessário dados de: concentração de DQO afluente e efluente; carga de DQO convertida em metano e temperatura operacional do reator. Como não é possível estimar essas informações para as ETEs hipotéticas adotadas para este estudo, para calcular a estimativa de biogás, foi utilizada uma metodologia adaptada de Marques (2014) e Jordão e Pessoa (2014). A metodologia foi adaptada e aplicada para os dados de uma estação de tratamento de esgoto que trabalha com Reator UASB e com os dados da população atendida apresentados na Tabela 10.

Segundo Jordão & Pessoa (2014), a produção de biogás nas estações de tratamento de esgoto 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%. Sabendo dessa estimativa de produção de biogás por habitantes, foi possível calcular a estimativa do potencial de geração de biogás produzido pelas ETEs estudadas.

$$B_{total} = P_{percapita} * P * 0,001 \quad (\text{Eq.3})$$

Sendo:

$$B_{total} = \text{Produção total de biogás [m}^3\text{/dia]}$$

$P_{percapita}$ = Produção de biogás per capita para Reator Anaeróbio [L/hab.d]

P = População (dados estimados ou encontrados) [hab]

Cabe ressaltar que os cálculos por massa de SVT (Sólidos Voláteis Totais) destruídos são mais confiáveis e, normalmente, utilizados nos balanços energéticos. Entretanto, os cálculos realizados no presente trabalho, foram feitos com base em um dado populacional, pois o foco do trabalho é fazer apenas uma estimativa da produção de biogás nas ETEs elencadas.

3.5. ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE GASES METANO E DIÓXIDO DE CARBONO PRESENTE NO BIOGÁS

Após a estimativa de biogás, é necessário calcular a estimativa de produção de gases metano e dióxido de carbono presente no biogás. Segundo Jordão e Pessoa (2014), como mencionado anteriormente, o gás metano pode representar um valor em torno de 50 a 70% do biogás e o gás carbônico uma parcela próxima de 25 a 35%. Assim, com base nessas concentrações, adotando-se os valores intermediários de 60% e 30% respectivamente, foi estimado a produção do CH₄ e CO₂, em kg/ano, através das equações 4 e 5, respectivamente. Esses cálculos foram realizados com base no balanço de massa, considerando-se que o volume do gás é de

0,02271 m³/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.

$$CH_4\ volume = (B_{total} * 60\% * 365\ dias * MM_{CH_4}) / Vol_{gás} \quad (Eq.4)$$

$$CO_2\ volume = (B_{total} * 30\% * 365\ dias * MM_{CO_2}) / Vol_{gás} \quad (Eq.5)$$

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 [m³/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 [m³/mol].

3.6. ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS E SUA RESPECTIVA ECONOMIA

Para estimar a energia produzida a partir do biogás proveniente do lodo resultante dos processos anaeróbios, considerou-se o parâmetro $A_{energético}$ igual a 15 kWh/hab.ano, valor sugerido por Jordão e Pessoa (2014). A energia produzida a partir do biogás é calculada pela equação 6.

$$E_{prod} = A_{energético} * P \quad (Eq.6)$$

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].

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021), o valor da tarifa média anual na região de Sudeste no ano de 2021 é de R\$563,49/MWh. Sendo assim, estima-se a economia oriunda da venda do biogás equivalente da energia produzida a partir da produção de biogás através da Equação 7.

$$L_{\text{anual}} = E_{\text{prod}} * R\$563,49/\text{MWh} * 0,001 \quad (\text{Eq.7})$$

Sendo:

L_{anual} = Economia equivalente da energia produzida [R\$/ano];

E_{prod} = Energia produzida através do biogás [kWh/ano].

3.7. ESTIMATIVA DE CUSTOS DE UMA ETE

Para as estimativas de custos de implantação de uma ETE com Reator UASB, Jordão e Pessoa (2014) apresenta uma função matemática linear que correlaciona o custo de implantação de ETEs com Reator UASB com pós-tratamento em função da vazão, ilustrada na Figura 11. Os dados coletados para elaboração dessa equação matemática são de ETEs que apresentam um pós-tratamento com lagoas aeradas, lagoas de polimento, filtros submersos aerados e filtros aerados. Através desses dados, estabeleceu-se o valor médio de R\$51,00/hab. Portanto, com as informações obtidas de vazão é possível estimar um custo para implantação das ETEs estudadas.

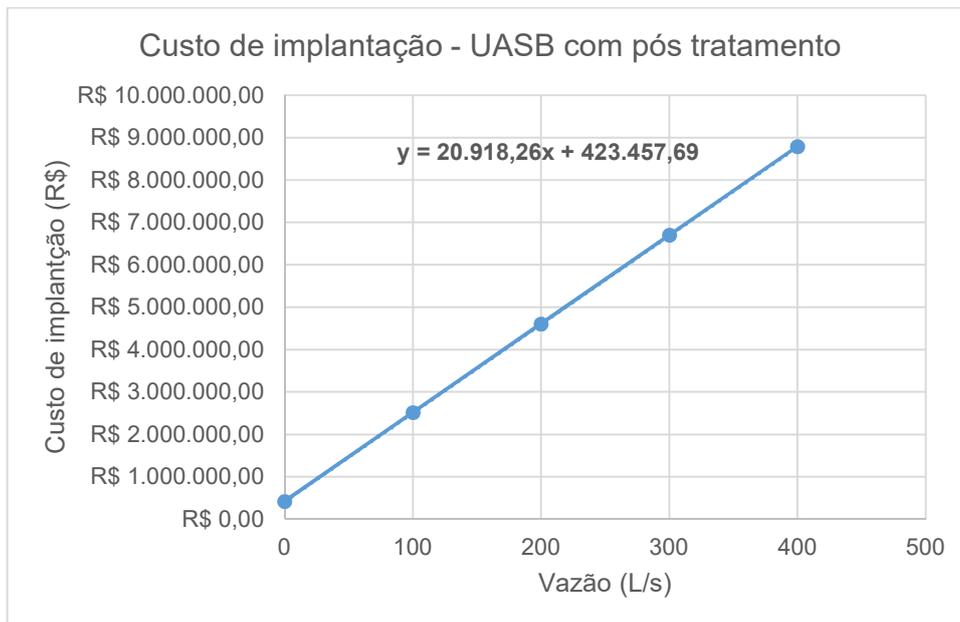


Figura 11: Custo de Implantação – UASB com pós-tratamento.

Fonte: Adaptado Jordão e Pessoa (2014).

Cabe ressaltar que os custos de implantação de uma estação de tratamento devem ser considerado apenas em um situação de construção da estação de tratamento, no entanto, se o sistema de biogás for acrescentado a uma ETE já existente, esses custos não devem ser considerados.

Além dos custos de implantação, é possível estimar os custos de operação e manutenção da estação de tratamento de esgoto que são inerentes aos funcionários, instalações da ETE, manutenção e/ou substituições das bombas, frota, caminhões para limpeza e desobstrução, produtos químicos entre outros. Segundo Chernicharo (2007), os custos médios de operação e manutenção de uma ETE com Reator UASB é de US\$1,00 a US\$1,50/hab.ano. Neste estudo, utilizou-se o valor da cotação atual do dólar de R\$5,38 (valor em 21 de agosto de 2021).

Por fim, pode-se estimar a potência consumida em uma estação de tratamento ao ano. Para este estudo, proveniente de Jordão e Pessoa (2014), considerou-se o valor médio de 22 kWh/hab.ano.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos para a estimativa de produção do biogás a partir dos Reatores UASB e sua respectiva economia para as ETEs elencadas para avaliação.

4.1. ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS

Os dados de vazão e produção de biogás foram calculados através da metodologia proposta pelo Jordão e Pessoa (2014) para as três ETEs hipotéticas apresentadas no capítulo Metodologia. Segundo os autores, essa metodologia pode ser adotada apenas para estimativa inicial de geração de biogás, que é o foco desta etapa. Entretanto, sabe-se que os dados obtidos através da metodologia de massa de SVT (sólidos voláteis totais) destruídos são mais confiáveis e devem ser priorizados para outras estimativas. É possível perceber que a produção de biogás é diretamente proporcional a população, ou seja, quanto maior o número da população atendida, mais biogás essa estação de tratamento gera. A Tabela 11 compila e apresenta essas informações para as três ETEs elencadas para este estudo.

Tabela 11: Estimativa da vazão e produção de Biogás diária.

ETE por porte	População (hab)	Vazão (l/s)	Produção de biogás (m³/dia)
Pequeno	15.000	22,2	187,5
Médio	140.000	207,4	1.750,0
Grande	250.000	370,4	3.125,0

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2. ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE GASES METANO E DIÓXIDO DE CARBONO NO BIOGÁS

Após o cálculo da produção de biogás diária, sabendo-se que o metano pode representar um valor entre 50 e 70% do biogás e o gás carbônico uma parcela entre 25 e 35%, estimou-se a produção destes gases tanto em m³ quanto em kg. O valor dos gases em kg/ano foi calculado através do balanço de massa, enquanto o valor em m³ utilizando-se o valor de

produção do biogás já calculado na etapa anterior. A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para esta etapa. Observa-se que a produção volumétrica do metano é superior à produção do dióxido de carbono para as três ETES avaliadas. Já quanto à produção em massa, o dióxido de carbono supera o gás metano para todas as ETES avaliadas.

Tabela 12: Quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás.

ETE por porte	Produção Volumétrica (m³/ano)		Produção em massa (kg/ano)	
	<i>CH₄</i>	<i>CO₂</i>	<i>CH₄</i>	<i>CO₂</i>
Pequeno	41.062,50	20.531,25	28.929,99	39.778,73
Médio	383.250,00	191.625,00	270.013,21	371.268,16
Grande	684.375,00	342.187,50	482.166,45	662.978,86

Fonte: Elaborado pela autora.

Vale ressaltar que essas informações de produção dos gases metano e dióxido de carbono 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, ou quando há grandes contribuições de água da chuva na rede, por exemplo.

4.3. ESTIMATIVA DA ENERGIA PRODUZIDA PELO BIOGÁS E SUA RESPECTIVA ECONOMIA

A estimativa de energia bruta produzida pelo biogás foi determinada através do aproveitamento do poder calorífico do biogás, que fica próximo do valor de 15 kWh/hab.ano. A economia oriunda da venda do biogás pôde ser calculado através do valor médio da tarifa de energia da região sudeste. Desta forma, é possível identificar o valor agregado da energia produzida para a concessionária das estações de tratamento de esgoto. Os resultados de quantitativo de energia produzida e a economia oriunda da venda do biogás anual são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Estimativa da energia bruta produzida pelo biogás e sua respectiva economia.

ETE pro porte	Energia Produzida (kWh/ano)	Economia anual (R\$)
Pequeno	225.000	R\$ 126.785,25
Médio	2.100.000	R\$ 1.183.329,00
Grande	3.750.000	R\$ 2.113.087,50

Fonte: Elaborado pela autora.

4.4. AVALIAÇÃO DOS 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: custos de construção, compra ou desapropriação do terreno, custos de projetos e supervisão, taxas legais e juros dos empréstimos durante o período de construção. 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.

Os custos de implantação desse estudo foram calculados com base nas informações disponíveis em Jordão e Pessoa (2014), enquanto os custos de operação e manutenção, de acordo com Chernicharo (2007), conforme descrito no capítulo 3.7. O objetivo principal desses cálculos é estimar os custos decorrentes do funcionamento de uma ETE com Reator UASB.

Quanto ao consumo de energia nas estações de tratamento durante um ano, foi necessário calcular a potência consumida na estação. Para isso, utilizou-se o valor médio de 22 kWh/hab.ano, valor estimado por Jordão & Pessoa (2014).

Tanto os custos anuais de implantação, de manutenção e operação e totais quanto a potência consumida são apresentados na Tabela 14. O custo total anual foi obtido somando-se os custos de implantação de manutenção e operação.

Tabela 14: Estimativa de custo e potência consumida nas ETEs.

<i>ETE por porte</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>
Pequeno	R\$ 888.307,91	R\$ 121.050,00	R\$ 1.009.357,91	330.000
Médio	R\$ 4.762.059,76	R\$ 1.129.800,00	R\$ 5.891.859,76	3.080.000
Grande	R\$ 8.170.961,39	R\$ 2.017.500,00	R\$ 10.188.461,39	5.500.000

Fonte: Elaborado pela autora.

4.5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A ECONOMIA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS E OS CUSTOS DE UMA ETE

Com todos os dados estimados, foi elaborada a Tabela 15, visando a comparação entre o valor da economia oriunda da produção do biogás e os custos das respectivas estações de tratamento. Também é possível comparar a quantidade de energia gerada na própria estação com a energia que ela utiliza anualmente.

Observa-se que, nas estações de pequeno, médio e grande porte, a energia produzida pelo biogás equivale à 68% da energia consumida na estação. Comparando-se a economia oriunda da venda do biogás com os custos totais anuais, observa-se que, para a estação de pequeno porte, economia oriunda da venda do biogás equivale à, aproximadamente, 13% do valor dos custos da ETE. Já para as de médio e grande porte, essa porcentagem é de, aproximadamente, 20% e 21% respectivamente. No entanto, todas as três ETEs estudadas apresentam um valor expressivo de produção de energia através do biogás.

Tabela 15: Análise comparativa entre os custos de uma ETE e economia oriunda da venda do biogás.

<i>ETE por porte</i>	<i>Economia anual (R\$/ano)</i>	<i>Custo total (R\$/ano)</i>	<i>Economia/Custo Total</i>
Pequeno	R\$ 126.785,25	R\$ 1.009.357,91	13%
Médio	R\$ 1.183.329,00	R\$ 5.891.859,76	20%
Grande	R\$ 2.113.087,50	R\$ 10.188.461,39	21%

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 16: Análise comparativo entre a energia produzida pelo biogás e a potência consumida na ETE.

<i>ETE por porte</i>	<i>Energia Produzida (kWh/ano)</i>	<i>Potência Consumida (kWh/ano)</i>	<i>Potência produzida / Potência consumida</i>
Pequeno	225.000	330.000	68%
Médio	2.100.000	3.080.000	68%
Grande	3.750.000	5.500.000	68%

Fonte: Elaborado pela autora.

4.6. CONSIDERAÇÕES PARA A VIABILIZAÇÃO ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE PLANTAS DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

As estações de tratamento de esgoto que trabalham com Reator UASB no seu ciclo de tratamento apresentam um custo de implantação superior a outros processos anaeróbios, como, por exemplo, as opções com filtro anaeróbio ou lagoa anaeróbia. Portanto, os custos totais anuais estão em uma faixa mais alta de valor comparado a outras opções de tratamento.

Para fins comparativos, a análise da economia oriunda da venda do biogás anual foi elaborada considerando que o valor do kWh gerado pelo biogás é o mesmo valor da concessionária fornecedora de energia da região. No entanto, outras soluções podem ser adotadas para aumentar o lucro final do sistema e incrementar a viabilidade econômica da implantação, como: geração conjunta de energia elétrica e térmica, utilização do combustível para outras unidades da própria estação ou, até mesmo, como combustível veicular da frota interna da ETE. As opções de reutilização do biogás são

inúmeras e as vantagens das opções devem ser avaliadas de acordo com os diferentes cenários da região de estudo.

O custo de implantação do sistema de geração do biogás é relativamente elevado e que sempre deve ser considerado na avaliação de viabilidade de implantação de ETEs. Vale lembrar que alguns equipamentos, tecnologias e produtos específicos são importados e a conversão cambial representam um acréscimo no valor final do sistema. Deve-se considerar também nos estudos de viabilidade destes projetos outros ganhos socioeconômicos, como os ganhos obtidos com a venda de energia não utilizada pela ETE ou, até mesmo, os ganhos monetários ambientais decorrentes da não emissão destes gases na atmosfera.

É importante ressaltar que o Brasil tem enorme potencial para o reaproveitamento do biogás e para solidificá-lo na matriz energética do país. No entanto, falta incentivo, normas consolidadas e interesse do mercado para que isto ocorra. Quando se avalia os instrumentos legais e normativos consolidados na Alemanha, 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 DWA desenvolvidas direcionaram fortemente as iniciativas de biogás em ETEs. Porém, inúmeras são as barreiras para o biogás se consolidar no país. Políticas públicas e incentivos fiscais são os pontos principais para consolidar esse mercado no Brasil. A medida que novos projetos forem concluídos e bem sucedidos, os intercâmbios de informações devem ser cada vez mais intensos, fazendo com que o mercado ganhe visibilidade e consistência, atraindo assim, novos investimentos no setor.

Iniciativas como os títulos verdes (*green bonds*), que foram 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), se enquadra como uma solução para o transporte limpo.

Através dos títulos verdes, poderá ser feita a conexão entre os projetos de geração de biogás do Brasil com os investidores interessados. Uma vez que os recursos sejam alocados nestas iniciativas, novas experiências bem sucedidas poderão servir de exemplos para novos projetos e segurança para novos investimentos.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo realizar uma análise do aproveitamento energético do biogás em estações de tratamento de esgoto que utilizam o Reator UASB e a economia financeira decorrente da venda e produção do biogás. Além disso, discute-se soluções para a viabilidade econômica da implantação de plantas de geração de biogás no país.

Para isto, avaliou-se três ETEs genéricas: pequeno (15.000 habitantes), médio (140.000 habitantes) e grande porte (250.000 habitantes). Através da análise feita neste trabalho, constatou-se que, em relação ao potencial energético estimado do biogás, para todas as ETEs avaliadas, é possível suprir um pouco mais de 2/3 da demanda de energia elétrica da própria estação (cerca de 68%). Já o valor de venda desse biogás pode suprir parte dos custos anuais das ETEs (implantação, operação e manutenção). Para as ETEs estudadas, de pequeno, médio e grande porte, obteve-se valores de 13%, 20% e 21% respectivamente. Portanto, 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.

Vale ressaltar que 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. Também é importante destacar que a viabilidade de geração de energia elétrica em uma estação de tratamento de efluentes 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 no ponto de vista lucrativo para uma concessionária de tratamento de esgoto.

Os títulos verdes, portanto, são uma ótima opção para os incentivos econômicos para projetos desse viés. O biogás proveniente das estações de

tratamento de esgoto se enquadra como uma atividade elegível para o financiamento pelo título verde. Além de ser uma opção de energia renovável, ele 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), se enquadra como uma solução para o transporte limpo.

Além dos benefícios econômicos, vale evidenciar os benefícios ambiental e sociais da produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto. A geração de energia através do biogás atende as ODS estabelecidas no país e pode-se destacar as seguintes ODS: energia limpa e acessível, através das metas: “Até 2030, manter elevada a participação de energias renováveis na matriz energética nacional” e “Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa.”; ação contra a mudança global do clima, contribuindo positivamente para a meta: “Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais: Emissões totais de gases de efeito estufa por ano.” e a inovação e estrutura, através da meta: “Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as atividades econômicas para torná-las sustentáveis, com foco no uso de recursos renováveis e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente adequados.”

Por fim, políticas públicas e incentivos fiscais são os pontos principais para consolidar esse mercado no Brasil. A 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.

Recomenda-se, como sugestão para trabalhos futuros, utilizar a metodologia desenvolvida por Chernicharo (2007) para a estimativa da

produção de biogás através da carga de DQO afluente ao reator e comparar com os resultados obtidos a partir da metodologia deste estudo. Além disso, recomenda-se aplicar a metodologia utilizada para dados reais de uma estação de tratamento de esgoto.

A maior contribuição desse trabalho foi pesquisar e compreender as possibilidades da geração e utilização do biogás no setor de saneamento. Como proposta de aprofundamento da pesquisa e recomendação de trabalhos futuros, recomenda-se fortemente mais estudos sobre novos projetos de geração de energia elétrica através de um Reator UASB, visando fomentar a discussão e tornar mais atrativo o tema. Outra sugestão é realizar uma análise econômico-financeira de projetos de geração de biogás através de títulos verdes e quais alternativas de utilização desse biogás (energia elétrica, energia térmica, GN, GNV, entre outros) podem ser elegíveis ao financiamento. Aplicado diretamente à continuidade deste trabalho, recomenda-se uma análise do conceito dos títulos verdes e energias renováveis, visando entender melhor os diferentes aspectos desse tipo de financiamento no país e os gargalos para sua aplicabilidade no saneamento. No âmbito da cooperação internacional, sugere-se um novo programa de cooperação, a fim de fortalecer a troca de conhecimentos entre o Brasil e Alemanha acerca do tema.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, “ATLAS Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas”, Agência Nacional de Águas e Secretária Nacional do Saneamento Ambiental, Brasília – DF, 2017.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Tarifas residenciais. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/dados/tarifas>>. Acesso em: 21 de agosto de 2021.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa ANEEL Nº482, de 14 de abril de 2012. Brasília-DF. Disponível em < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em: 26 julho 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário, Rio de Janeiro, p.1, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário, Rio de Janeiro, p.7, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.209: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário, Rio de Janeiro, p.11, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos, Rio de Janeiro, p.4, 1997.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 30 de agosto de 2021

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm>. Acesso em: 30 de agosto de 2021.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Bruno Silveira ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Oliver Jende ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Oliver Jende ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Sebastian Rosenfeldt ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Probiogás. Disponível em: <<https://antigo.mdr.gov.br/saneamento/probiogas>>. Acesso em: 01 de setembro de 2021.

BRASIL. Objetivos do desenvolvimento sustentável. Disponível em: <<https://odsbrasil.gov.br/>>. Acesso em: 27 de setembro de 2021.

BRK AMBIENTAL. Quem somos. Disponível em: <<https://www.brkambiental.com.br/macae/quem-somos>>. Acesso em: 18 de agosto de 2021.

CANCELLI, T. Geração de energia a partir do biogás de estações de tratamento de esgoto doméstico. Tese (Pós-Graduação em Mudanças Climáticas, Projetos Sustentáveis e Mercado de Carbono) – UFPA, Curitiba, 2013.

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”, 2ª Ed. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007.

CLIMATE BONDS INITIATIVE, Green Bonds Global State of the Market, 2019. Disponível em: <<https://www.climatebonds.net/resources/reports/green-bonds-global-state-market-2019>>. Acesso em: 01 de setembro de 2021.

CONAMA, Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. “Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.” Brasília, DF.

COPASA. Companhia de Saneamento de Minas Gerais. Relatório de sustentabilidade. Belo Horizonte, 2012.

DWIH SÃO PAULO. Biogás: alternativa em prol da sustentabilidade. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://www.dwih-saopaulo.org/pt/2019/10/09/biogas-alternativa-em-prol-da-sustentabilidade/>>. Acesso em: 14 de agosto de 2021.

EOS CONSULTORES, EOS Organização e Sistemas Ltda, 2019. Disponível em: <<https://www.eosconsultores.com.br/tratamento-de-esgoto-no-brasil/>> acessado em 14 de maio 2021 às 11:36.

FAYH, Marcelo. Green bonds: o que são os títulos verdes. The Cap, 22 de setembro de 2020. Disponível em: <https://comoinvestir.thecap.com.br/green-bonds-o-que-sao-os-titulos-verdes/#O_que_sao_Green_Bonds>. Acesso em: 21 de agosto de 2021 às 23:50.

FEBRABRAN, CEBDS. Guia para Emissão de Títulos Verdes no Brasil 2016. FEBRABRAN, CEBDS, 2016.

GEF BIOGÁS BRASIL, Projeto GEF Biogás Brasil, 2021. Disponível em: <<https://www.gefbiogas.org.br/sobreprojeto.html>>. Acesso em: 14 de maio de 2021.

GIZ, Iniciativas alemãs de tecnologias do clima: Promoção de tecnologias de biogás para proteção ao clima no Brasil. Disponível em: https://www.giz.de/en/worldwide/40085.html?query=biog%C3%A1s&send_button_search=Search. Acesso em: 14/08/2021 às 18:20.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pnsb/pnsb-2017#Esgotamento%20Sanit%C3%A1rio> acessado em 22/08/2021 às 00:31.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 7ª Ed. Rio de Janeiro: ABES. 2014.

MARQUES, L. S. Avaliação dos benefícios ambientais e econômicos do aproveitamento do biogás do digestor anaeróbio para tratamento de lodo de esgoto. 2014. 63 f. Monografia (Graduação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and reuse. 4ª Ed. New York, 2003.

NUVOLARI, A. *et al.* “Esgoto Sanitário: Coleta Transporte Tratamento e Reuso Agrícola.” 1ª Ed. São Paulo, Editora Blucher, 2003.

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. Congresso Abes Fenansan, 2017. Disponível em: <<https://saneamentobasico.com.br/wp-content/uploads/2019/01/II-210.pdf>>. Acesso em: 23 de agosto de 2021.

PLANSAB, Plano Nacional de Saneamento Básico. Brasília: Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab>. Acesso em: 13 de maio de 2021.

SANEPAR, Aproveitamento Energético de Biogás de ETEs, 4º *Workshop* Internacional, 2016.

SANEPAR. Manual de Projetos de Saneamento. Diretrizes para Elaboração de Projetos de Sistemas de Tratamento de Esgoto. 2020.

SNIRH, Relatório Geral ATLAS do Esgoto. Disponível em: https://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Atlas_Esgoto/Rio_de_Janeiro/Relatorio_Geral/. Acesso em: 14 de julho de 2021 às 19:50.

SNIRH, Outorgas de Direito de Uso de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=6d866c5d54c64b17bd53af4bdcfb4b91>. Acesso em: 12 de junho de 2021 às 10:36.

TAVARES, André Neiva. Oportunidades enterradas [recurso eletrônico]: geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos / André Neiva Tavares, Glicia Vieira dos Santos, Ruy de Quadros Carvalho [autores], Sérgio Valdir Bajay (colaborador). - Dados eletrônicos. - Vitória: EDUFES, 2019.

VON SPERLING M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG, 2005.