

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**JOÃO MARCOS DOS REIS**

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS  
GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO MUNICÍPIO DE  
POÇOS DE CALDAS**

**Poços De Caldas/MG**

**2021**

JOÃO MARCOS DOS REIS

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS  
GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO MUNICÍPIO DE  
POÇOS DE CALDAS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Tratamento de efluentes.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Brito de Moura

Poços de Caldas/MG

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca campus Poços de Caldas

Reis, João Marcos dos.

R375e      Estudo da viabilidade econômica para produção de biogás gerado nas estações de tratamento de esgoto no município de Poços de Caldas / João Marcos dos Reis. -- Poços de Caldas/MG, 2021.  
48 f. –

Orientador(a): Rafael Brito de Moura.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2021.  
Bibliografia.

1. Esgotos sanitários. 2. Biodigestores. 3. Sustentabilidade. I. Moura, Rafael Brito de. II. Título.

CDD – 628.1

# ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO MUNICÍPIO DE POÇOS DE CALDAS

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Tratamento de Efluentes.

**Aprovada em: 20 de dezembro de 2021**

Prof. Dr. Rafael Brito de Moura - Orientador

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Daniel Moureira Fontes Lima

Instituição: Universidade Federal de Sergipe

Profa. Dra. Giselle Patrícia Sancinetti

Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por Rafael Brito de Moura, Professor do Magistério Superior, em 21/12/2021, às 10:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Daniel Moureira Fontes Lima, Usuário Externo, em 22/12/2021, às 11:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Giselle Patrícia Sancinetti, Professor do Magistério Superior, em 22/12/2021, às 14:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 0654438 e o código CRC 5ADA653E.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças e saúde para correr atrás de meus objetivos e sonhos.

A minha família pela confiança depositada em mim e toda a ajuda e incentivo.

Ao meu orientador e professor Dr. Rafael Brito de Moura pela orientação e atenção prestadas em toda a pós-graduação.

A analista de engenharia do DMAE (Departamento municipal de água e esgoto) de Poços de Caldas e colega da pós-graduação Amanda Carvalhaes Souto Valim, por toda a ajuda prestada nesse período.

Ao DMAE (Departamento municipal de água e esgoto) da cidade de Poços de Caldas por todas as informações fornecidas.

A empresa ERBR (Energias Renováveis), por todas as cotações, orçamentos e informações fornecidas para o desenvolvimento desse trabalho.

A Ana Beatriz Carvalho Terra por toda a ajuda prestada na confecção desse trabalho.

A UNIFAL (Universidade Federal de Alfenas) e todos os professores e funcionários e colegas que me acolheram em todo esse período.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

E a todos que contribuíram diretamente e indiretamente para que esse trabalho fosse realizado.

*Sonhar grande e sonhar pequeno dá o mesmo trabalho.*

(Jorge Paulo Lemann)

## RESUMO

Nos últimos anos tem-se observado uma preocupação crescente da população mundial em relação à busca por alternativas sustentáveis de desenvolvimento. Nesse contexto, o tratamento e reutilização de efluentes tem ganhado destaque nas pesquisas científicas, visando a redução de impactos ambientais, soluções associadas à escassez de recursos hídricos e produção de energia (biogás) como alternativa aos combustíveis fósseis. O objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de produção de metano e geração de energia no tratamento de esgoto do município de Poços de Caldas (MG), comparando os indicadores econômicos do custo de implantação de uma usina de geração de energia nesses estabelecimentos. Para a realização do estudo foram selecionadas 3 ETEs Estação de tratamento de esgoto (Córrego D'Antas, Contorno e Bortolan). As ETEs Córrego D'antas e Contorno possuem reator UASB, ao passo que a Bortolan é composta por um sistema compacto, onde no mesmo reator ocorrem o tratamento das partes aeróbias e anaeróbias. As amostras do afluente e do efluente foram caracterizadas nos laboratórios do DMAE (ETE 1) e Qualin Serviços LTDA (ETE 2 e 3). Os parâmetros avaliados, através do software probio 1.0, foram a produção de biogás e seu potencial energético, análise técnica-econômica dos custos de implantação de uma usina de geração de energia, custos de investimento e operação, análise energética e a viabilidade econômica. O software probio 1.0 considera todas as rotas possíveis de conversão da DQO e suas perdas, estimando cenários conservadores, otimistas e típicos. Foi observado que a ETE 1 (Córrego D'Antas) possui uma vazão e carga de DQO superior as demais. Todas as ETEs apresentaram proporções acima de 60 % de CH<sub>4</sub> no biogás. No entanto, a ETE 3 (Bortolan), não apresentou a quantidade mínima de produção de biogás para que seja possível a instalação de uma usina de geração de energia. Em relação aos custos de investimento, a ETE 1 apresenta um custo total anual de R\$70.467,96, ao passo que a ETE 2 tem um valor de R\$31.967,38. A análise energética demonstrou que a ETE 1 tem a capacidade de produção mensal superior a ETE 2, com valores de 165.000 kWh/mês e 14.625 kWh/mês, respectivamente. Em relação ao tempo de retorno de investimento (Payback), a ETE 1 demanda 25 meses ao passo que a ETE 2 precisaria de 221 meses. Conclui-se então que, apenas a ETE 1 apresenta viabilidade para instalação de usina de energia a partir do biogás gerado pelo tratamento de esgoto, considerando a sua capacidade de produção energética e o tempo de retorno de investimento.

Palavras-chave: esgoto sanitário; produção energética; sustentabilidade.

## ABSTRACT

Recently, there has been a growing concern of the world population regarding sustainable development alternatives. Thus, the treatment and reuse of effluents have gained prominence in scientific research. Therefore, reducing environmental impacts, solutions associated with the scarcity of water resources, and energy production (biogas) as an alternative to fossil fuels. The objective of this work was to evaluate the potential of methane production and energy generation in the sewage treatment in the city of Poços de Caldas (MG) Brazil, comparing the economic indicators of the cost of implementing an energy generation plant in these establishments. For the present study, 3 ETEs (Córrego D'Antas, Contorno and Bortolan) were selected. The Córrego D'antas and Contorno have a UASB reactor, while Bortolan is composed of a compact system, where the aerobic and anaerobic parts occur in the same reactor. The influent and effluent samples were characterized in the laboratories of DMAE (ETE 1) and Qualin Serviços LTDA (ETE 2 and 3). The parameters evaluated, using the Probio 1.0 software, were the production of biogas and its energy potential, technical-economic analysis of the costs of implementing a power generation plant, investment and operation costs, energy analysis, and economic feasibility. Probio 1.0 software considers all possible COD conversion routes and their losses, estimating conservative, optimistic, and typical scenarios. ETE 1 (Córrego D'Antas) has a higher flow and COD load than the others. All ETEs presented proportions above 60% of CH<sub>4</sub> in the biogas. However, ETE 3 (Bortolan) did not have the minimum amount of biogas production to allow the installation of an energy generation plant. Regarding investment costs, ETE 1 has a total annual cost of R\$70,467.96, while ETE 2 has a value of R\$31,967.38. The energy analysis showed that ETE 1 has a monthly production capacity higher than ETE 2, with values of 165,000 kWh/month and 14,625 kWh/month, respectively. Regarding the return on investment (Payback), ETE 1 requires 25 months, while ETE 2 would need 221 months. Therefore, it is concluded that only ETE 1 is viable for installing a power plant from biogas generated by sewage treatment, considering its energy production capacity and the return-on-investment time.

Keywords: energy production; sanitary sewage; sustainability.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma estação de tratamento de esgoto .....	15
Figura 2 - Fases da produção de biogás por biodigestão anaeróbia .....	17
Figura 3 - Esquema Biodigestor Indiano .....	22
Figura 4 - Biodigestor modelo chinês .....	23
Figura 5 - Biodigestor Tubular com capacidade para 800m <sup>3</sup> . .....	23
Figura 6 - Esquema de um biodigestor UASB .....	24
Figura 7 - Esquema de uma ETE com UASB. ....	25

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do UASB quando comparado aos biodigestores convencionais .....	26
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade do efluente para lançamento em corpos hídricos no que tange a lei federal e a legislação do estado de Minas Gerais .....	16
Tabela 2 - Composição química do biogás pré e pós processo de purificação .....	19
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens da utilização de biogás em ETEs .....	20

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPEX	<i>Capital expenditure</i>
CEE	Certificado de Emissões Evitadas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
DME	Departamento Municipal de Eletricidade
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases do efeito estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
RALF	Reatores Anaeróbios de Lodo Fluidizado
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>13</b>
<b>2 REVISÃO LITERATURA / DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>14</b>
2.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO .....	14
2.2 PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	16
2.3 BIODIGESTORES .....	21
<b>2.3.1 Biodigestor Indiano.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2 Biodigestor Chinês.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.3 Biodigestores tubulares .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.4 Biodigestor UASB .....</b>	<b>24</b>
2.4 ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS ASSOCIADOS AO USO DO BIOGÁS COMO FONTE ENERGÉTICA.....	26
2.5 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM UASB E GERAÇÃO DE ENERGIA.....	27
2.6 GERAÇÃO DESCENTRALIZADA DE ENERGIA.....	28
<b>3 ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO MUNICÍPIO DE POÇOS DE CALDAS .....</b>	<b>31</b>
<b>3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Diante do aumento da população mundial e a crescente demanda por alimentos e água, associados à intensificação da urbanização, o tratamento e reutilização de efluentes tem ganhado destaque nas pesquisas científicas visando a busca por soluções para reduzir os impactos ambientais e os problemas associados à escassez de recursos hídricos.

Segundo Calijuri e Cunha (2013), todo produto gerado em instalações hidráulico-sanitárias é denominado por esgoto sanitário, sendo caracterizado por ter em sua composição o predomínio de matéria orgânica, além de nutrientes como o fósforo e nitrogênio, microrganismos patogênicos e outros componentes com potencial de apresentar toxicidade, como é o caso dos fármacos.

Nesse sentido, é necessário que um local onde as águas residuárias possam ser tratadas previamente ao seu descarte. Esse processo é então realizado pelas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), devendo essa respeitar as normas de legislação vigente, de forma que a água descartada apresente parâmetros adequados para que não haja prejuízo à saúde humana e à fauna e flora local.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), aproximadamente 43% de todo esgoto produzido no Brasil em 2015 foi tratado (SNIS, 2017), sendo que grande parte desses resíduos são tratados em reatores de digestão anaeróbica de fluxo ascendente e manta de lodo, denominados de reatores de UASB (GOMES *et al.*, 2017), sendo o lodo e o biogás os dois subprodutos principais gerados durante o processo (AMARAL *et al.*, 2019).

Surge então, diante desse cenário, a possibilidade de exploração do potencial energético das ETES, através do uso do biogás como fonte de energia. A European Commission (2001) destaca que o uso de biogás para fins energéticos é uma forma promissora para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa. Dessa forma, é observado que essa pode ser uma alternativa para minimizar os impactos ambientais, maximizar a eficiência energética e reduzir gastos, constituindo assim um processo sustentável de produção de energia.

Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de produção de metano e geração de energia no tratamento do esgoto no município de Poços De Caldas (MG), comparando os indicadores econômicos do custo de implantação de uma usina de geração de energia nesses estabelecimentos.

## 2 REVISÃO LITERATURA / DESENVOLVIMENTO

### 2.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

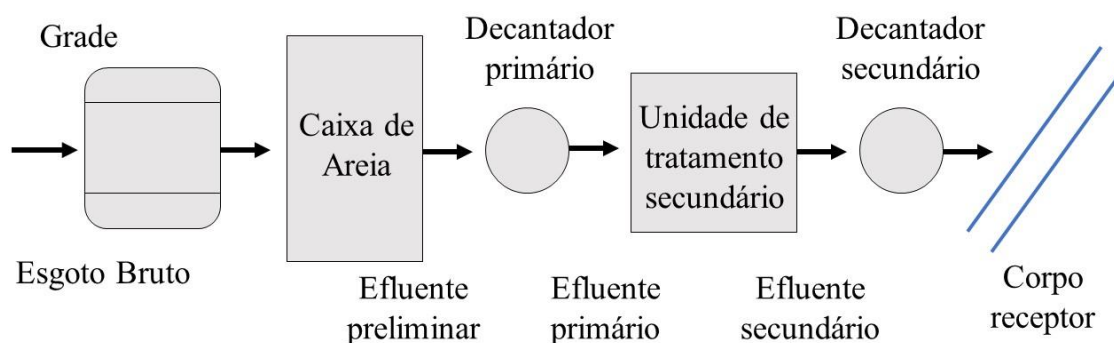
Os esgotos sanitários são definidos por Costa (2006) como águas residuais oriundas de uso doméstico, podem ser classificadas em: sólidos em suspensão, matéria orgânica, nutrientes e organismos patógenos. Há ainda a presença de elementos com elevado potencial de toxidez, a exemplo dos fármacos (VON SPERLING, 2014). No Brasil, 43% da população é atendida com rede coletora e estação de tratamento de esgoto (ETE), 18% possui acesso apenas à rede coletora, 12% utiliza fossa séptica e 27% encontra-se em situação de ausência total de tratamento sanitário (SNIRH, 2017).

A estação de tratamento tem como função minimizar os impactos ambientais resultantes da liberação de efluentes. No entanto, Hernandez-Padilla *et al.* (2017) destacam que é necessário a adoção de critérios de sustentabilidade para a escolha da melhor tecnologia a ser utilizada, sendo que um bom sistema de manejo de efluentes deve ser ambientalmente efetivo, economicamente acessível e socialmente aceitável (Noyola *et al.*, 2013).

Issa (2019) descreve que o tratamento nas ETEs pode ocorrer através de diferentes tecnologias e processos, físicos, químicos ou biológicos, cujo objetivo é a remoção dos componentes do esgoto e é dividido em diversas etapas. A etapa preliminar tem como objetivo a remoção de compostos sólidos maiores e materiais cuja sedimentação é mais rápida (VON SPERLING, 2014). Posteriormente, segundo o mesmo autor, inicia-se o tratamento primário onde, por meio de decantação ou reatores anaeróbios, sólidos sedimentáveis são removidos da suspensão em meio líquido.

Por fim, tem-se o tratamento secundário (terceira etapa), cuja finalidade é remover a matéria orgânica dissolvida ou em suspensão pela ação de microrganismos (ISSA, 2019). A Figura 1 ilustra um esquema geral de uma estação de tratamento de esgoto.

Figura 1 - Esquema de uma estação de tratamento de esgoto



Fonte: Adaptado de FERNANDES, 2000.

Segundo Toledo, Venturin e Dias (2012), no tratamento primário, são removidos aproximadamente 50% dos sólidos. Para o tratamento secundário, a remoção é equivalente a 45%, sendo esses compostos direcionados para um reator onde serão estabilizados. Destaca-se ainda que o grau e a eficiência do tratamento ocorrem em função do corpo receptor e das características da água do ponto a jusante de onde ocorre o lançamento; da capacidade de autodepuração e diluição desse local; da legislação ambiental vigente e, enfim, das consequências socioambientais e econômicas que o lançamento de esgoto pode gerar.

É válido ressaltar, porém, que as ETEs devem apresentar um padrão mínimo de eficiência de remoção de compostos para que o efluente possa ser descartado. No âmbito federal, é através da Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2011), que são dispostos as condições e padrões de lançamento de efluentes. Já para o estado de Minas Gerais, há uma Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 1, de 05 de maio de 2008, que estabelece os limites para lançamento dos efluentes. A Tabela 1 apresenta o comparativo entre as legislações federal e estadual.



**Tabela 1** - Parâmetros de qualidade do efluente para lançamento em corpos hídricos no que tange a lei federal e a legislação do estado de Minas Gerais

PARÂMETRO	UNIDADE	DN COPAM/CERH-MG 01/2008 (2008)	RESOLUÇÃO CONAMA Nº430 (2011)
<b>Fenóis totais</b>	mg.L <sup>-1</sup> de C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	≤ 0,5	≤ 0,5
<b>Materiais flutuantes</b>	-	Ausente	Ausente
<b>Substâncias de gosto ou odor</b>	-	-	-
<b>DBO<sub>5,20</sub></b>	mg.L <sup>-1</sup> de O <sub>2</sub>	Max. 120 ou remoção mínima de 60%	Max. 120 ou remoção mínima de 60%
<b>OD</b>	mg.L <sup>-1</sup> de O <sub>2</sub>	Não inferior a 2 mg.L <sup>-1</sup>	-
<b>pH</b>	-	Entre 6 e 9	Entre 5 e 9
<b>Temperatura</b>	°C	≤ 40	≤ 40
<b>Nitrogênio amoniacal total</b>	mg.L <sup>-1</sup> de N	≤ 3,7	≤ 20
<b>Regime de lançamento</b>	-	Vazão máxima de 1,5x a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor	Vazão máxima de 1,5x a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor

Fonte: Adaptado das legislações CONAMA nº 430/2011 e COPAM/CERH-MG nº 1/2008.

Ressalta-se, por fim, que o aproveitamento do biogás proveniente do tratamento de esgoto doméstico é uma alternativa de geração de energia elétrica com potencial de expansão no país (BILOTTA; ROSS, 2016). Sendo assim, quanto maior a eficiência do tratamento, maior será a produção de metano pelo sistema, consequentemente, haverá um aumento na sua capacidade de obtenção de energia (DENG *et al.*, 2014).

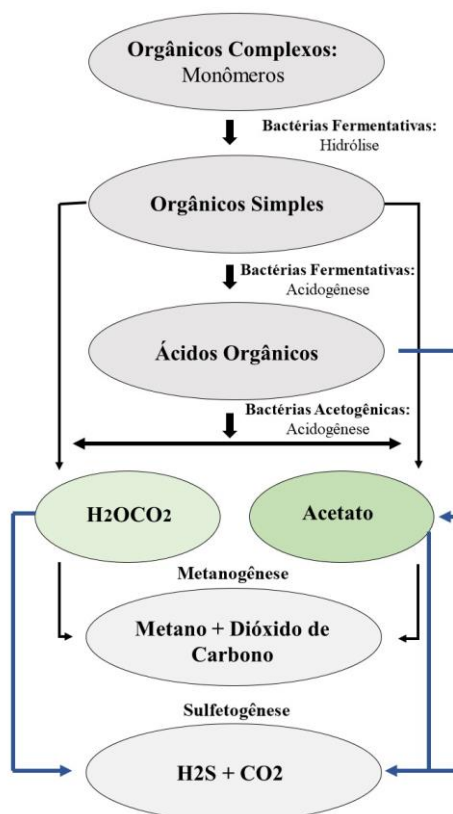
## 2.2 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O tratamento de águas residuárias pode ocorrer por processos aeróbios, anaeróbios ou de forma híbrida. Para Van Lier *et al.* (2015), embora o tratamento aeróbio constitua uma tecnologia mais antiga e amplamente difundida, em função do seu elevado grau de eficiência, o tratamento anaeróbio tem ganhado cada vez mais espaço pela sua simplicidade operacional, eficiência energética, baixa produção de lodo e redução ou eliminação do uso de produtos químicos.

Dentre os processos de tratamento aeróbio, o sistema de lodo ativado é mais conhecido e é caracterizado por possuir um tanque de aeração seguido de um sedimentador com recirculação de lodo (METCALF; EDDY, 2016). Os reatores aeróbios, conforme destacado por ROLLEMBERG *et al.* (2020), tem alta eficiência de remoção de matéria orgânica e nutrientes, no entanto, o seu dimensionamento deve ser realizado de forma otimizada e configurado adequadamente (VAN HAANDEL; VAN DER LUBBE, 2012).

Por outro lado, de acordo com Gomes *et al.* (2017), a decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos oriundos do esgoto sanitário gera uma quantidade significativa de lodo e biogás. A digestão anaeróbia é caracterizada, em algumas de suas etapas, pela ação de microrganismos que, na ausência de oxigênio, metabolizam a estrutura de compostos orgânicos complexos, transformando-os em compostos simples, como o metano e o gás carbônico (VAN HAANDEL, 1994). Durante esse processo são destacadas as fases de hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese (Figura 2).

Figura 2 - Fases da produção de biogás por biodigestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de ALMEIDA (2016).

A hidrólise consiste na primeira fase do processo de biodigestão anaeróbia e é realizada pela ação de exoenzimas excretadas por microrganismos denominados bactérias fermentativas hidrolíticas. De acordo com Morgenroth *et al.* (2002), essa etapa pode ser afetada pelos parâmetros de pH, temperatura, tempo de retenção hidráulica e o tamanho e distribuição do material particulado.

A acidogênese é a etapa onde os compostos formados na primeira fase (hidrólise) são metabolizados e convertidos em compostos mais simples, sendo os ácidos graxos voláteis os principais produtos das bactérias fermentativas acidogênicas. Em seguida dá-se início à acetogênese, onde as bactérias acetogênicas oxidam os produtos gerados durante a acidogênese, produzindo um substrato adequado para as arqueas metanogênicas, as quais serão responsáveis pela etapa final do processo (ALMEIDA, 2016).

Chernicharo (2008) observa que os principais produtos gerados na fase de acetogênese são hidrogênio, dióxido de carbono e acetato. Por fim, a metanogênese é o processo onde os compostos orgânicos são transformados em metano e dióxido de carbono por meio das arqueias metanogênicas acetoclásticas e hidrogenotróficas (CHERNICARO, 2008)

O biogás é composto por metano (80%), nitrogênio (10 a 25%) e dióxido de carbono (5 a 10%), ainda é notada a presença de vapor d'água, amônia, ácido sulfídrico e outros hidrocarbonetos (NOYOLA *et al.*, 2006; RYCKEBOSCH *et al.*, 2011). No entanto, o metano (CH<sub>4</sub>) presente no biogás de esgoto é cerca de 21 vezes mais poluente quando comparado ao CO<sub>2</sub>, sendo assim, torna-se ainda mais interessante o aproveitamento do biogás para fins energéticos (GODOY JUNIOR *et al.*, 2004).

Observa-se ainda que existem diversos fatores que podem influenciar na produção de biogás, tais como: a natureza do substrato; composição dos resíduos (quanto maior a quantidade de matéria orgânica no resíduo, maior será a produção do biogás); teor de água (deve representar de 60 a 90% do peso total do produto); temperatura (faixa ideal de 32 a 37°C para bactérias mesofílicas e 50 a 60°C para as termofílicas) e; a impermeabilidade, onde a presença de oxigênio no reator pode fazer com que a produção de CO<sub>2</sub> supere a de CH<sub>4</sub> (FRANÇA JUNIOR, 2008).

Dessa forma, para que o biogás seja utilizado como fonte de energia é necessário que em uma etapa anterior ao processo de geração de energia elétrica ele passe por um tratamento (GOMES *et al.*, 2017), uma vez que para haver a

queima do gás é necessário que a matéria-prima esteja livre de materiais corrosivos (DEUBLEIN *et al.*, 2008). Nesse sentido, conforme supracitado, o biogás oriundo de esgoto apresenta traços de ácido sulfúrico em sua composição, o que pode desencadear na corrosão dos equipamentos necessários para a produção energética (ELFATTAH *et al.*, 2016).

Para remover as impurezas que estão presentes no biogás, utilizam-se os métodos de remoção física, onde a absorção é controlada pelos parâmetros de pressão e temperatura (LOUREIRO *et al.*, 2006; YANG *et al.*, 2003), e remoção química, onde a absorção é dependente das reações de neutralização ácido-base (CHAEMCHUEN *et al.*, 2016). Elfttah *et al.* (2016), indica ainda que a purificação de biogás apresenta potencial para favorecer a redução combinada de compostos indesejados, a exemplo da remoção conjunta de dióxido de carbono e ácido sulfúrico, na etapa de absorção física, quando essa é realizada pela ação de uma solução composta por dietanolamina (DEA) e água.

Com a finalidade de se comprovar o processo de purificação, Pecora (2006) destaca que esse pode ser feito pela redução das concentrações de sulfeto de hidrogênio, gás carbônico e água. Sendo que, quanto mais puro, maior a concentração de metano e, conseqüentemente, maior será o poder calorífico (LIMA, 2005). A Tabela 2 demonstra a comparação entre a composição do biogás gerado e após o processo de purificação. Nota-se, então, a redução dos parâmetros supracitados, ao passo em que o percentual de CH<sub>4</sub> é aumentado.

**Tabela 2** - Composição química do biogás pré e pós processo de purificação

<b>Compostos químicos</b>	<b>% de volume do biogás gerado</b>	<b>% de volume do biogás purificado</b>
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	50 a 80	80,8
<b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	20 a 40	4,07
<b>Sulfeto de Hidrogênio (H<sub>2</sub>S)</b>	1 a 2	0,06
<b>Água (H<sub>2</sub>O)</b>	1 a 2	0,98
<b>Hidrogênio (H<sub>2</sub>)</b>	1 a 2	0,00
<b>Nitrogênio (N<sub>2</sub>)</b>	0,5 a 2,5	13,2
<b>Oxigênio (O<sub>2</sub>)</b>	0,1 a 1	0,89
<b>TOTAL</b>	100	100

Fonte: Adaptado de Pecora (2006).

Diversos são os parâmetros considerados ao se realizar a substituição de um combustível pelo biogás, dentre eles destacam-se a equivalência energética associada ao estudo de viabilidade técnica e econômica. Rosa *et al.* (2016) indicam que o poder calorífico do metano é de  $35,9 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ , ao passo em que o biogás com 60% de  $\text{CH}_4$  apresenta um valor aproximado de  $21,5 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ , evidenciando o seu elevado potencial calorífico. Segundo Lima (2005), o poder calorífico do biogás irá variar em função da concentração de metano, sendo diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a concentração de metano, maior será o poder calorífico do biogás.

Sendo assim, é possível verificar que apenas com a digestão anaeróbia do lodo de uma ETE pode, em muitos casos, produzir biogás suficiente para atender à demanda energética da ETE (METCALF; EDDY, 2003). E, segundo os mesmos autores, esse processo torna-se interessante do ponto de vista econômico e para fins de maximização de eficiência energética. Nesse sentido, Lobato (2011) apresentam diferentes processos e tecnologias para o gerenciamento do biogás:

- Combustão direta, sem recuperação energética: Queimadores abertos ou fechados;
- Combustão direta, com geração de calor: Caldeiras e secadores térmicos;
- Geração combinada ou simples de eletricidade e calor: Motores de combustão interna, turbinas e microturbinas.

A combustão direta com recuperação energética é o método mais simples e eficiente para recuperar a energia do biogás (LOBATO, 2011). Durante a conversão energética do biogás, a energia química é convertida em mecânica, a qual irá ativar o gerador responsável pela sua conversão em energia elétrica (COELHO *et al.*, 2006). Porém, esse processo ainda tem alguns empecilhos (Tabela 3).

**Tabela 3** - Vantagens e desvantagens da utilização de biogás em ETEs

(continua)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de fonte renovável;</li> <li>• Redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escassez de tecnologias nacionais de geração de energia a partir do biogás;</li> <li>• Purificação do biogás</li> </ul>

**Tabela 3 - Vantagens e desvantagens da utilização de biogás em ETEs** (conclusão)

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de cogeração;</li> <li>• Menor emissão de metano;</li> <li>• Créditos de carbono</li> <li>• Maior controle de maus odores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausência de comprovação de viabilidade econômica</li> <li>• Ausência de fiscalização e aplicação da lei pelos danos ambientais causados;</li> <li>• Seu transporte e armazenamento são dificultados em função de suas características;</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Salomon e Lora (2005)

## 2.3 BIODIGESTORES

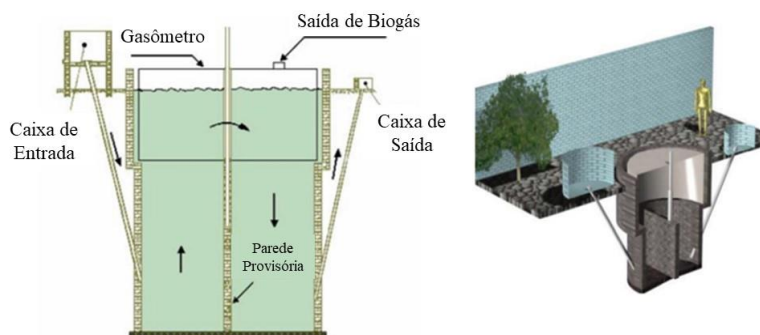
Biodigestor é a estrutura física, podendo ser conhecida como reator, cujo formato é cilíndrico ou prismático, onde as reações químicas têm origem biológica. Cada biodigestor possui características particulares, sendo que no Brasil, segundo Chernicharo (2001), o modelo com fluxo hidráulico contínuo é mais difundido, sendo os mais comuns o indiano, chinês, tubular e o UASB/RALF. Cada modelo será descrito a seguir com as suas principais características e recomendações. É válido ressaltar que no presente estudo, as ETEs avaliadas apresentam o reator do tipo UASB.

### 2.3.1 Biodigestor Indiano

Esse modelo é caracterizado pela presença de sua cúpula em formato de sino, a qual é utilizada como gasômetro, e uma parede central, de forma que o tanque de fermentação é dividido em duas câmaras. Gaspar (2003), justificam a presença da divisória como um meio para que a circulação do material ocorra por todo o interior da câmara de fermentação.

França Junior (2008) destaca que esse tipo de biodigestor apresenta o processo de fermentação mais rápido, uma vez que a temperatura pouco variável do solo é aproveitada, e, conseqüentemente, a ação das bactérias é favorecida (Figura 3). Esse modelo de biodigestor só não apresenta sua utilização de forma mais frequente em função do seu alto custo (FRANÇA JUNIOR, 2008).

Figura 3 - Esquema Biodigestor Indiano

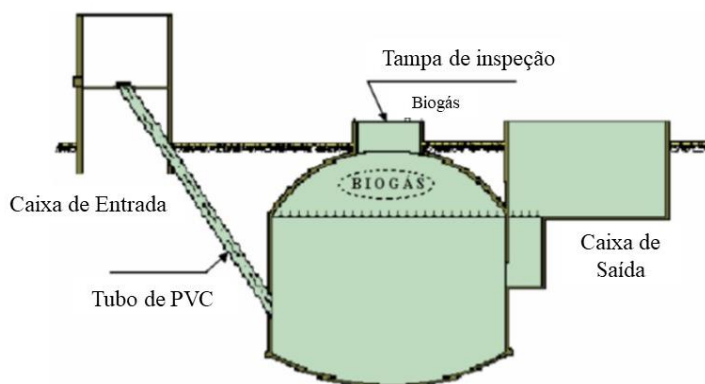


Fonte: Adaptado de PECORA (2006) e FRANÇA JUNIOR (2008).

### 2.3.2 Biodigestor Chinês

Deganutti *et al.* (2008), descrevem o funcionamento desse modelo com base no princípio da prensa hidráulica, de modo que o aumento de pressão no seu interior promove o deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário caso haja descompressão. Segundo França Junior (2008), por ter a sua cúpula construída em alvenaria, o custo desse biodigestor é menor quando comparado aos demais (Figura 4). Andrade *et al.* (2012) ressalta que esse tipo de biodigestor tem a vantagem de poder canalizar o gás produzido, no entanto, é necessário que haja uma boa impermeabilização do tanque, bem como a criação de uma câmara com regulagem onde seja possível trabalhar com baixa pressão.

Figura 4 - Biodigestor modelo chinês



Fonte: Adaptado de PECORA, 2006.

### 2.3.3 Biodigestores tubulares

Também conhecido por *plug-flow*, os biodigestores tubulares possuem entrada contínua de biomassa em uma de suas extremidades, havendo o deslocamento até a extremidade oposta. Nesse processo não há misturas longitudinais e os biodigestores são longos, apresentando uma alta relação entre o seu comprimento e largura, de forma que a dispersão longitudinal é mínima (VON SPERLING, 1996) (Figura 5).

Figura 5 - Biodigestor Tubular com capacidade para 800m<sup>3</sup>.

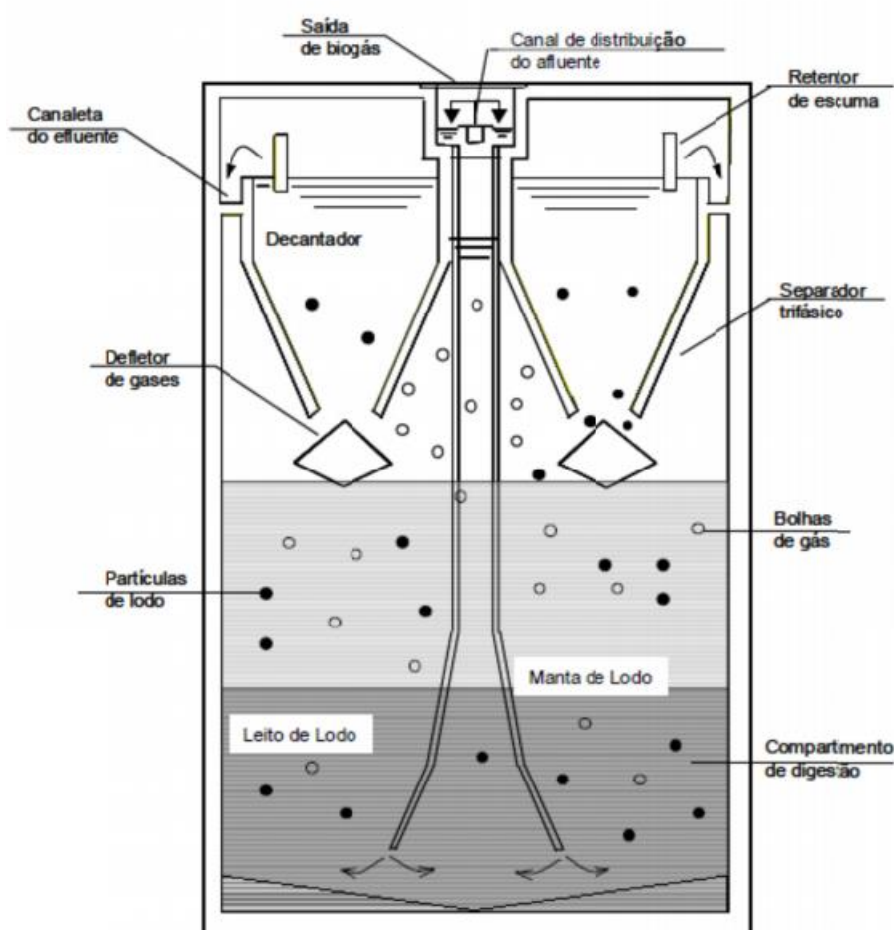
Fonte: FEIDEN *et al.* (2004, p.3).



### 2.3.4 Biodigestor UASB

As ETEs que operam com os Reatores Anaeróbios conhecidos como *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors* (UASB) são utilizados com frequência para o tratamento de efluentes. Segundo Almeida (2016), esses reatores são os modelos mais eficientes para degradação biológica e a sua estrutura física consiste na presença de um tanque Imhoff de fluxo vertical, com câmaras de sedimentação e digestão anaeróbia sobrepostas. Esses reatores são dotados de um sistema onde as fases líquidas, sólidas e gasosas são separadas e o fluxo do esgoto é ascendente (VERSIANI, 2005) (Figura 6).

Figura 6 - Esquema de um biodigestor UASB



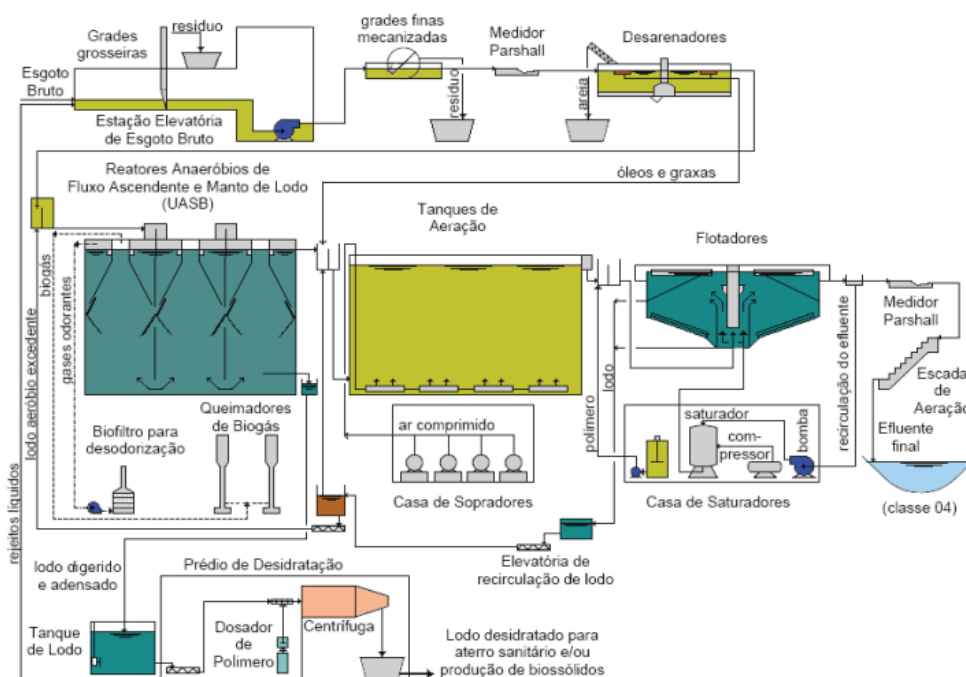
Fonte: VERSIANI (2005, p.12).

No entanto, a instalação desses reatores é viável economicamente em casos em que o seu aquecimento não é necessário (PEROVANO; FORMIGONI, 2011). De acordo com Cavalcanti (2009), a eficiência de remoção da matéria orgânica no

reator irá depender de fatores como: a concentração e composição desse material no afluente; das condições ambientais do reator; e da massa de lodo anaeróbio.

Nesse modelo de biodigestor, o metano produzido é coletado na parte superior, podendo então ser utilizado no reaproveitamento energético com a sua queima (CHERNICHARO, 2008). França Junior (2008) destaca ainda que uma vez que a unidade é fechada, o biogás pode ser acumulado em um gasômetro de forma que possibilita o aproveitamento do alto potencial energético do  $\text{CH}_4$ . A Figura 7 representa como é uma ETE com UASB.

Figura 7 - Esquema de uma ETE com UASB.



Fonte: FRANÇA JUNIOR (2008, p.42).

Antes da alimentação dos reatores UASB, o esgoto bruto deve passar por um tratamento preliminar, composto pelo gradeamento fino, que tem como objetivo remover os sólidos grosseiros, e, posteriormente irá passar por um desarenador, para que haja a remoção de sólidos inertes com elevadas velocidades de sedimentação (ZILOTTI, 2012). Para o tratamento de águas residuárias, a depender da composição, o uso do reator do tipo UASB pode apresentar algumas vantagens e desvantagens (Quadro 1) quando comparado com outros processos aeróbios convencionais.

**Quadro 1** - vantagens e desvantagens do UASB quando comparado aos biodigestores convencionais

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Fácil construção e operação	Mau odor
Não é necessária uma área extensa	Longo intervalo de tempo necessário para a partida
Baixo custo de energia elétrica	É preciso pós-tratamento para fins de suprir as demandas legislativas
Desidrabilidade adequada do lodo	Baixa remoção de nutrientes e patógenos
Possibilidade de reuso do lodo em novos reatores	
Eficaz para remoção de material orgânico	

Fonte: Adaptado de Foresti (2002); Seghezo (2004) *apud* Carvalho (2006).

Acrescenta-se ainda como vantagens à baixa produção de lodo, a remoção satisfatória de DBO/DQO e a possibilidade de rápida reinoculação (CAMPOS, 1999; CHERNICHARO, 1997). Von Sperling (2005) conclui que a eficiência média do reator é de aproximadamente 70%, sendo ineficiente na remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos.

Chernicharo e Stuetz (2008) apontam também alguns aspectos onde seria interessante haver melhorias nos reatores UASB, a exemplo cita-se a emissão de odores e de gases de efeito estufa, a recuperação de nutrientes e eliminação de patógenos, corrosão e acumulação de espuma e, por fim, variação da vazão.

#### 2.4 ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS ASSOCIADOS AO USO DO BIOGÁS COMO FONTE ENERGÉTICA

A geração de energia elétrica a partir do biogás é considerada uma alternativa em função das suas vantagens estratégicas, econômicas e ambientais. Costa (2006) destaca como vantagens estratégicas a geração descentralizada e a proximidade aos pontos de carga, de forma que não há necessidade de investimento em linhas de transmissão. Como vantagens econômicas, o autor considera o uso de combustível disponível no local, associado ao seu baixo custo e a dinamização do

setor de maquinários no país. Por fim, as vantagens ambientais, onde são observados a biomassa como fonte renovável de energia, menor emissão de poluentes e balanço negativo de carbono.

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2006), é previsto um aumento de demanda por energia e suprimentos no mundo numa ordem de 1,6% por ano até 2030. Diante desse cenário é percebido, de uma forma cada vez mais intensa, a busca por fontes energéticas alternativas aos combustíveis fósseis.

Nesse sentido, o reator UASB tem sido considerado um dos melhores processos de tratamento desenvolvidos (AIYUK *et al.*, 2006), sendo que os custos de implantação de uma planta com UASB seguido por tratamento biológico aeróbio proporcionam economias de custo de investimento (CAPEX) de 20 a 50% e de custos operacionais (OPEX) acima de 50% quando comparado com uma planta convencional (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

No entanto, para Gomes *et al.* (2017), o estudo de aproveitamento energético do biogás gerado em estações de tratamento de esgoto deve ser considerado como uma alternativa a longo prazo, ainda que investimentos governais maiores sejam exigidos. Coelho *et al.* (2003) considera o fator econômico como o principal parâmetro a ser observado ao se utilizar o biogás como fonte energética, sendo, posteriormente, observado os benefícios ambientais e sociais.

A European Commission (2001) aponta o uso do biogás para fins de produção energética como uma alternativa interessante para a redução da emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE). Além disso, a crescente preocupação com o uso de energias limpas e com os impactos ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis e do descarte inadequado de resíduos, tem estimulado pesquisas em torno da utilização consciente de dejetos oriundos de estações de tratamento de esgoto (GOMES *et al.*, 2017).

## 2.5 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM UASB E GERAÇÃO DE ENERGIA

O aumento no número de ETEs com reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) tem proporcionado um incremento na geração de biogás e lodo, considerados subprodutos desse sistema de tratamento (ROSA *et al.*, 2016). Nesse sentido, o aproveitamento do biogás como energia tem sido objeto de

estudos que buscam fontes energéticas alternativas. Para Tsagarakis (2007) e Metcalf; Eddy (2003), a principal vantagem da produção de energia em uma ETE é o fato que o biogás produzido é pode ser suficiente para atender toda a demanda energética necessária para a operação da planta.

Porém, de acordo com Lopes (2018), no que tange o aproveitamento energético do biogás gerado em ETEs no país, apenas onze instalações são contabilizadas como geradoras de energia elétrica a partir do biogás, provenientes de reatores UASB, digestores de lodo em sistemas de lodo ativado.

Mensah *et al.* (2019) avaliaram o potencial de aproveitamento energético de biogás através de reatores de UASB para a cidade de Itaúna (MG), possibilitando o planejamento energético para o período de 2018 a 2038. Os autores concluíram que a produção média de metano e de energia total produzida foi de 1.899,4 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup> e 39,3 GWh, respectivamente. Foi calculado um custo total de investimento de R\$1.300.00,00, o que viabiliza a implantação do projeto no município, além disso, o empreendimento se paga no ano 14 (2032) após sua instalação.

Santos *et al.* (2016) avaliaram a viabilidade econômica e o potencial de geração de energia a partir do biogás produzido pelas ETEs com sistema anaeróbico. Os resultados indicaram que há viabilidade econômica para municípios com uma população superior a 300 mil habitantes. Campello *et al.* (2021) verificaram que o payback médio nos municípios foi de 2,61 anos, sendo que esse tempo é menor para cidades com uma população de 50 mil a 150 mil habitantes.

Valente (2015) demonstrou em seus estudos que a viabilidade econômica encontra-se em ETEs que atendam uma população entre 100 mil e 200 mil habitantes, sendo que vazões a partir de 150 l/s já devem ser consideradas para a análise de uso de biogás para geração de energia. O autor complementa que, embora a digestão anaeróbica apresente um custo de investimento alto, em geral ela possui custos inferiores por eletricidade gerada, sendo que para escalas acima de 200 mil habitantes, tanto o custo de investimento como o LCOE (custo nivelado) estão dentro da faixa de 1,2 a 1,6 mil R\$/kW e 144 a 456 R\$/kW, respectivamente.

## 2.6 GERAÇÃO DESCENTRALIZADA DE ENERGIA

A geração descentralizada de energia, ou geração distribuída, contribui não apenas para a redução dos impactos ambientais, contribui para que haja uma menor perda elétrica da transmissão e distribuição, de forma que favorece a confiabilidade

e estabilidade do sistema (SILVEIRA, 2011). Bley Jr (2010) destaca que com a produção descentralizada, não seriam necessárias longas linhas de transmissão, evitando-se, assim, perdas na ordem de 10 a 15% da energia gerada no país.

A geração distribuída é caracterizada por ser a geração de energia localizada próximo ao consumidor final, cuja instalação tem como objetivo o atendimento primário a este, existindo ainda a possibilidade de produção de excedentes energéticos comercializáveis para além do consumidor final (EPE, 2016). Segundo a ANEEL (2019), esse tipo de geração tem crescido no Brasil, sendo a energia solar fotovoltaica a fonte mais utilizada.

Bley Jr (2010) ainda evidencia que em termos regionais, a microeconomia poderia ser favorecida a partir da demanda de serviços de planejamento, instalação, manutenção e comércios de equipamentos, assim como de todo o segmento industrial associado a esse mercado. Além disso, a geração de energia elétrica a partir do biogás oriundo de biodigestores possibilita o surgimento de fontes descentralizadas de energia em pequena escala, essencial para a garantia do desenvolvimento sustentável (ZANONI, 2018).

O aproveitamento energético do biogás, além das vantagens e benefícios já citados anteriormente, ainda possibilita a geração descentralizada de energia (PECORA, 2006). A geração distribuída é regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sob a Resolução Normativa nº 482/2012. O uso do biogás contribui com a melhoria do balanço energético em ETEs, de forma a promover a descentralização da geração, proporcionando à população a possibilidade de atuar como produtor de energia.

De acordo com a COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais), a energia elétrica gerada na ETE pode ser aproveitada pela própria unidade, com um suprimento de até 90% a depender da estrutura da estação. Acrescenta-se ainda, que além de direcionar o gás gerado para um destino ambientalmente correto, a digestão anaeróbica se apresenta como um tratamento eficiente para produção de energia.

Junior (2019) estimou o risco associado a investimentos em unidades de geração distribuída a partir da recuperação do biogás de ETEs. O autor concluiu que, para o caso estudado, a geração distribuída possuía uma margem de risco aceitável, de forma que o investimento é justificado. O autor ainda ressalta que grande parte das ETEs anaeróbicas brasileiras se enquadram como micro e

minigeração distribuída, de forma que é de suma importância a realização de estudos que avaliem a viabilidade técnica-econômica e os riscos de investimento.

### **3 ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS GERADO NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO MUNICÍPIO DE POÇOS DE CALDAS**

Artigo submetido e aceito pela revista Research, Society and Development

#### **Estudo da viabilidade econômica para produção de biogás gerado nas estações de tratamento de esgoto no município de Poços de Caldas**

#### **Economic feasibility study for the production of biogas generated in sewage treatment stations in the municipality of Poços de Caldas**

#### **Estudio de viabilidad económica para la producción de biogas generado en estaciones de tratamiento de aguas residuales del municipio de Poços de Caldas**

Recebido: 00/01/2021 | Revisado: 00/03/2021 | Aceito: 00/04/2021 | Publicado: 10/04/2021

#### **Resumo**

O tratamento e reutilização de efluentes tem ganhado destaque nas pesquisas científicas, visando a redução de impactos ambientais, soluções associadas à escassez de recursos hídricos e produção de energia (biogás) como alternativa aos combustíveis fósseis. O objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de produção de metano e geração de energia no tratamento de esgoto do município de Poços de Caldas (MG), comparando os indicadores econômicos do custo de implantação de uma usina de geração de energia nesses estabelecimentos. Foram selecionadas três Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), sendo que duas possuem reator UASB e uma é composta por um sistema compacto, onde as etapas anaeróbicas e aeróbicas ocorrem no mesmo reator. As amostras do afluente e do efluente foram caracterizadas nos laboratórios do DMAE (ETE 1) e Qualin Serviços LTDA (ETE 2 e 3). Os parâmetros avaliados, através do software probio 1.0, foram a produção de biogás e seu potencial energético, análise técnica-econômica dos custos de implantação de uma usina de geração de energia, custos de investimento e operação, análise energética e a viabilidade econômica. Conclui-se então que, apenas a ETE 1 apresenta viabilidade para instalação de usina de energia a partir do biogás gerado pelo tratamento de esgoto, considerando a sua capacidade de produção energética e o tempo de retorno de investimento.

**Palavras-chave:** Esgoto Sanitário; Produção Energética; Sustentabilidade.

#### **Abstract**

The treatment and reuse of effluents have gained prominence in scientific research. Therefore, reducing environmental impacts, solutions associated with the scarcity of water resources, and energy production (biogas) as an alternative to fossil fuels. The objective of this work was to evaluate the potential of methane production and energy generation in the sewage treatment in the city of Poços de Caldas (MG), comparing the economic indicators of the cost of implementing an energy generation plant in these establishments. Three Sewage Treatment Plants (ETE) were selected. The Córrego D'antas and Contorno have a UASB reactor, while Bortolan is composed of a compact system, where the aerobic and anaerobic parts occur in the same reactor. The influent and effluent samples were characterized in the laboratories of DMAE (ETE 1) and Qualin Serviços LTDA (ETE 2 and 3). The parameters evaluated, using the Probio 1.0 software, were the production of biogas and its energy potential, technical-economic analysis of the costs of implementing a power generation plant, investment and operation costs, energy analysis, and economic feasibility. Therefore, it is concluded that only ETE 1 is viable for installing a power plant from biogas generated by sewage treatment, considering its energy production capacity and the return-on-investment time.

**Keywords:** Energy Production; Sanitary Sewage; Sustainability.

#### **Resumen**



El tratamiento y reutilización de efluentes ha ganado protagonismo en la investigación científica, orientada a la reducción de impactos ambientales, soluciones asociadas a la escasez de recursos hídricos y producción de energía (biogás) como alternativa a los combustibles fósiles. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de producción de metano y generación de energía en el tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Poços de Caldas (MG), comparando los indicadores económicos del costo de implementación de una planta de generación eléctrica en estos establecimientos. Se seleccionaron tres Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (STP), dos de las cuales cuentan con un reactor UASB y una está compuesta por un sistema compacto, donde las etapas anaeróbicas y aeróbicas se llevan a cabo en el mismo reactor. Las muestras de afluentes y efluentes se caracterizaron en los laboratorios de DMAE (ETE 1) y Qualin Serviços LTDA (ETE 2 y 3). Los parámetros evaluados, utilizando el software probio 1.0, fueron la producción de biogás y su potencial energético, análisis técnico-económico de los costos de implementación de una planta de generación eléctrica, costos de inversión y operación, análisis energético y factibilidad económica. Por tanto, se concluye que solo ETE 1 es viable para instalar una central eléctrica a partir de biogás generado por el tratamiento de aguas residuales, considerando su capacidad de producción de energía y el retorno de la inversión.

**Palabras clave:** Aguas Residuales Sanitarias; Producción De Energía; Sustentabilidad

## 1. Introdução

Diante do aumento da população mundial e a crescente demanda por alimentos e água, associados à intensificação da urbanização, o tratamento e reutilização de efluentes tem ganhado destaque nas pesquisas científicas visando a busca por soluções para reduzir os impactos ambientais e os problemas associados à escassez de recursos hídricos. Segundo Calijuri & Cunha (2013), todo produto gerado em instalações hidráulico-sanitárias é denominado por esgoto sanitário, sendo caracterizado por ter em sua composição o predomínio de matéria orgânica, além de nutrientes como o fósforo e nitrogênio, microrganismos patogênicos e outros componentes com potencial tóxico, como é o caso dos fármacos.

Sendo assim, as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) são fundamentais para garantir que a água descartada apresente parâmetros adequados e dentro das normas estabelecidas pela legislação vigente (Resolução do CONAMA nº 430/2011 e Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº1/2008), de forma que não haja prejuízos à saúde humana e ao ambiente.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), aproximadamente 43% de todo esgoto produzido no Brasil em 2015 foi tratado (SNIS, 2017). Grande parte desses resíduos são tratados em reatores de digestão anaeróbica de fluxo ascendente e manta de lodo, denominados de reatores de UASB (Gomes *et al.*, 2017), sendo o lodo e o biogás os dois subprodutos principais gerados durante o processo (Amaral *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, surge a possibilidade de exploração do potencial energético das ETEs através do uso do biogás como fonte primária de energia. A European Commission (2001) destaca que o uso de biogás para fins energéticos é uma forma promissora para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa. Dessa forma, é observado que essa pode ser uma alternativa para minimizar os impactos ambientais, maximizar a eficiência energética e reduzir gastos, constituindo assim um processo sustentável de produção de energia.

Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de produção de metano e geração de energia no tratamento do esgoto no município de Poços De Caldas (MG), comparando os indicadores econômicos do custo de implantação de uma usina de geração de energia nesses estabelecimentos.

## 2. Metodologia

O estudo foi realizado no município de Poços de Caldas (MG), sendo considerado o 15º mais populoso do estado com 166.085 habitantes (IBGE, 2017). Para a implantação da metodologia apresentada foram utilizados os resultados da caracterização físico-química de amostras obtidas pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), onde foi verificado três estações de tratamento de esgoto (ETE) em funcionamento. As análises dos esgotos foram realizadas no laboratório do DMAE para a ETE 1 e na QUALIN SERVIÇOS LTDA – ME para as demais ETEs. As informações referentes à localização, tipo de reator utilizado e aos dados de vazão de cada estação de tratamento de esgoto estão dispostas na tabela 1.

Para os dados de demanda química de oxigênio (DQO) foi feito uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados utilizando o software EXCEL. A pesquisa foi dividida em duas seções, a primeira através de uma modelagem de produção de biogás e energia elétrica e a segunda composta pelas análises técnica-econômicas de custo de implantação de uma usina de geração de energia.

*Tabela 4: Caracterização das Estações de Tratamento de Esgoto avaliadas.*

	Coordenada Geográfica	Reator	Vazão Média e Máxima
<b>ETE 1 – Córrego D'Antas</b>	UTMs 21°44'56''S, 46°36'09''	UASB	Vazão média: 270 L.s <sup>-1</sup> Vazão máx: 350 L.s <sup>-1</sup>
<b>ETE 2 – Rodovia do Contorno</b>	UTMs 21°50'06''S, 46°36'02''O	UASB	Vazão média: 66,88 L.s <sup>-1</sup> Vazão máx: 106,1 L.s <sup>-1</sup>
<b>ETE 3 – Bortolan</b>	UTMs 21°46'42''S, 46°37'35''O.	Tratamento preliminar (Peneira rotativa, duas caixas de areia e calha parshall) e Tratamento secundário (reator Ubox)	

Fonte: Autor (2021).

A estimativa de produção de biogás e da potência energética foi realizada através dos dados de entrada dos valores médios da concentração de DQO total afluente em mg. L<sup>-1</sup> e da vazão média (Q<sub>méd</sub>) em m<sup>3</sup>. dia<sup>-1</sup>. Para isso, foi utilizado o software ProBio 1.0. A modelagem matemática utilizada pelo software, foi proposta por Lobato (2011), que além dos dados de entrada citados acima, considera também a população contribuinte em número de habitantes (Pop) e de esgoto por habitante (QPC) em mg/L. São verificados ainda a concentração de SO<sub>4</sub> (CSO<sub>4</sub>) em mg/L, eficiência de remoção de DQO (EDQO) e de redução de SO<sub>4</sub> (ESO<sub>4</sub>) em porcentagem.

O sistema permite que sejam calculados também os coeficientes de produção de lodo (Y) em kgSV/kgDQOrem e de DQO-LODO (Ksólidos) em kgDQO-LODO/kgDQOrem, temperatura operacional do reator (T) em graus celsius, fator de supersaturação de CH<sub>4</sub> na fase líquida (Fs), perda de CH<sub>4</sub> na fase gasosa com o gás residual (pw) em porcentagem e outras perdas de CH<sub>4</sub> na fase gasosa (po). Além disso, foram adotadas as seguintes constantes: Constante universal dos gases (R) – 0,08206 atm.L/mol.k; DQO correspondente a um mol de CH<sub>4</sub> (KDQO) – 64 gDQO/mol; DQO utilizada na redução de sulfato – 0,667gDQO/gSO<sub>4</sub>; poder calorífico decorrente da combustão do metano – 9,9 kWh/Nm<sup>3</sup>.

A modelagem ainda estima três cenários: conservador, típico e otimista. para a determinação desses cenários de produção, o programa apresenta parâmetros a serem assumidos de acordo com o cenário escolhido, conforme descrito pelo quadro 1. Por fim, foi calculado a potência elétrica disponível nos sistemas de acordo com Valente (2015). Para facilitar na escolha do motor-gerador e o contato com fornecedores, foi determinado um rendimento típico de 38% (Brasil, 2015a).

*Quadro 2: Parâmetros de cálculo d eestimativa de produção de biogás, de acordo com o cenário.*

Parâmetro	Unidade	Cenário conservador	Cenário típico	Cenário otimista
Concentração de SO <sub>4</sub> no afluente (CSO <sub>4</sub> )	mg. L <sup>-1</sup>	20	15	10

Eficiência de remoção de DQO (EDQO)	%	60	65	70
Eficiência de redução de SO <sub>4</sub> (ESO <sub>4</sub> )	%	80	75	70
Coef. de produção de lodo (Y)	kgSV/kgDQOrem	0,15	0,15	0,15
Coef. de produção DQO-lodo (Ksólidos)	kgDQO-lodo/kgDQOrem	0,213	0,213	0,213
Temperatura operacional reator (T)	°C	25	25	25
Fator de supersaturação de CH <sub>4</sub> na fase líquida (Fs)	-	1,7	1,35	1
Perda de CH <sub>4</sub> na fase gasosa com o gás residual (pw)	%	7,5	5	2,5
Outras perdas de CH <sub>4</sub> na fase gasosa (po)	%	7,5	5	2,5

Fonte: Adaptado ProBio (2015).

Para o estudo da viabilidade econômica e análise de custos, foi feito um orçamento no dia 01/06/2021 com a empresa ERBR. De acordo com a ERBR, não foi encontrado um sistema compatível e viável para a ETE 3 (Bortolan), pois o potencial gerado do biogás não satisfaz o consumo do moto-gerador, o que inviabilizaria todo o sistema. Dessa forma, foram feitas as análises econômicas, portanto, das ETEs 1 (Córrego D'Antas), e 2 (Rodovia do contorno), no qual a ERBR apresentou um orçamento. O estudo de viabilidade econômica do sistema proposto iniciou com o levantamento dos custos de implantação (CAPEX – Capital Expenditure), e de operação e manutenção (OPEX – Operation Expenditure).

A partir da estimativa de potência elétrica disponível, concentração de metano no biogás, produção normalizada de biogás e carga atual instalada em cada unidade de tratamento de esgoto, foi simulado pela ERBR o funcionamento de motor-geradores em diferentes regimes de trabalho. Assim, foram dimensionados aqueles equipamentos que produziram o máximo de energia com a melhor relação custo-benefício. Para parâmetros envolvendo os consumos de energia elétrica de cada ETE, utilizou-se os Relatórios de Contas de Energia Elétrica por Unidade Consumidora disponibilizada pelo (DMAE, 2021), os quais apresentam valores de consumo médio entre os meses de janeiro de 2021 e junho de 2021. Optou-se por utilizar apenas os últimos 6 meses, por representarem mais fielmente as condições atuais das ETE's.

O saldo energético mensal foi calculado, então, pela diferença entre a média do consumo mensal de energia de cada ETE e sua produção mensal de biogás. Enquanto o autossuprimento é dado pela relação entre produção e consumo de energia em cada unidade consumidora. Finalmente, para calcular os custos envolvidos nesta análise, utilizou-se valores de tarifa do mês de junho de 2021 (DME, 2021) na classificação B3-Demais Classes (Comercial, Industrial e Outros) de T=0,52554 R\$/kWh. Dessa forma, o custo mensal médio atual com consumo de energia elétrica foi calculado para cada unidade com dados disponibilizados pelo DMAE, e assim calculado a economia mensal após o aproveitamento energético de biogás

Por fim, para a verificação da viabilidade econômica dos sistemas de aproveitamento de biogás, montou-se um fluxo de caixa para cada ETE, contabilizando o consumo, custos, despesas e a produção sem levar em conta a inflação durante o tempo de retorno. Com o auxílio do software excel, foi montado uma Tabela com o tempo de retorno do investimento de cada

estação de tratamento.

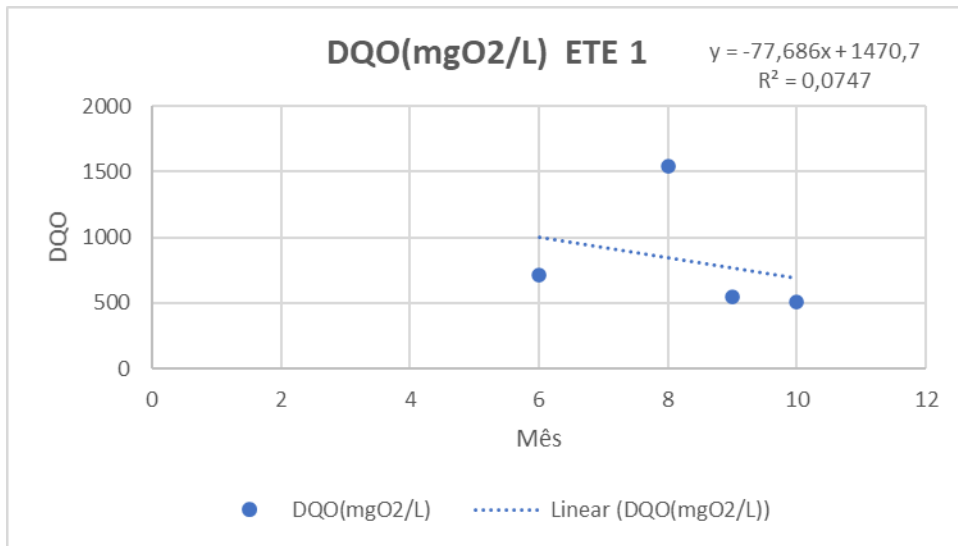
### 3. Resultados e Discussão

A média dos resultados de cada ETE em relação aos parâmetros físicos e químicos estão dispostos na tabela 2. O gráfico 1 indica o ajuste linear dos valores de DQO para a ETE 1, sendo determinado para o mês de julho o valor de 926,86  $\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ , porém, em favor da segurança foi utilizado a média de 829,75  $\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$  como parâmetro de entrada. Para a ETE 2, esses valores foram calculados para o mês de abril, resultando em 443,70  $\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$  (Gráfico 2). Por fim, a ETE 3 para o mês de abril resultou em 656,15  $\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ , no entanto, como esse valor está abaixo da média encontrada de 676,15  $\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ , o último valor foi considerado como parâmetro de entrada em favor da segurança (Gráfico 3). É possível perceber que a ETE 1 apresenta uma vazão superior as demais e, conseqüentemente, uma maior carga de DQO.

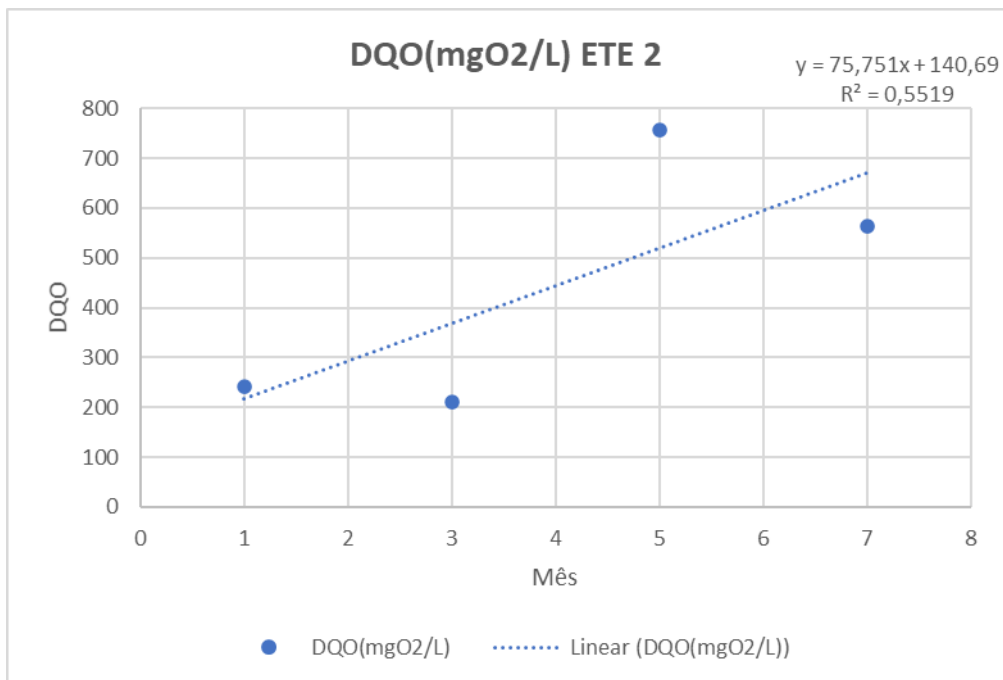
*Tabela 5: Parâmetros físicos e químicos de entrada de esgoto bruto nas estações de tratamento de esgoto.*

PARÂMETROS	UNIDAD E	RESULTA DO ETE 1	RESULTA DO ETE 2	RESULTA DO ETE 3
<b>Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO</b>	$\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$	554,7	174,93	408,86
<b>Demanda Química de Oxigênio - DQO</b>	$\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$	829,75	443,70	676,15
<b>Sólidos Sedimentáveis</b>	$\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$	10,5	62	2,25
<b>Sólidos em Suspensão</b>	$\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$	510,35	-	-
<b>Nitrogênio Total</b>	$\text{mgN}\cdot\text{L}^{-1}$	42	-	-
<b>Fósforo Total</b>	$\text{mgP}\cdot\text{L}^{-1}$	2,6	-	-
<b>Vazão Média</b>	$\text{L/s}$ e $\text{m}^3/\text{dia}$	270 e 2332,8	66,88 e 5778,43	22,2 e 1918,08
<b>Vazão Máxima</b>	$\text{L/s}$ e $\text{m}^3/\text{dia}$	350 e 3024,0	106,1 e 9167,04	30,55 e 2639,5

Fonte: Autor (2021)



*Gráfico 1: Análise estatística por mínimos quadrados de DQO da ETE 1.*



*Gráfico 2: Análise estatística por mínimos quadrados de DQO da ETE 2.*

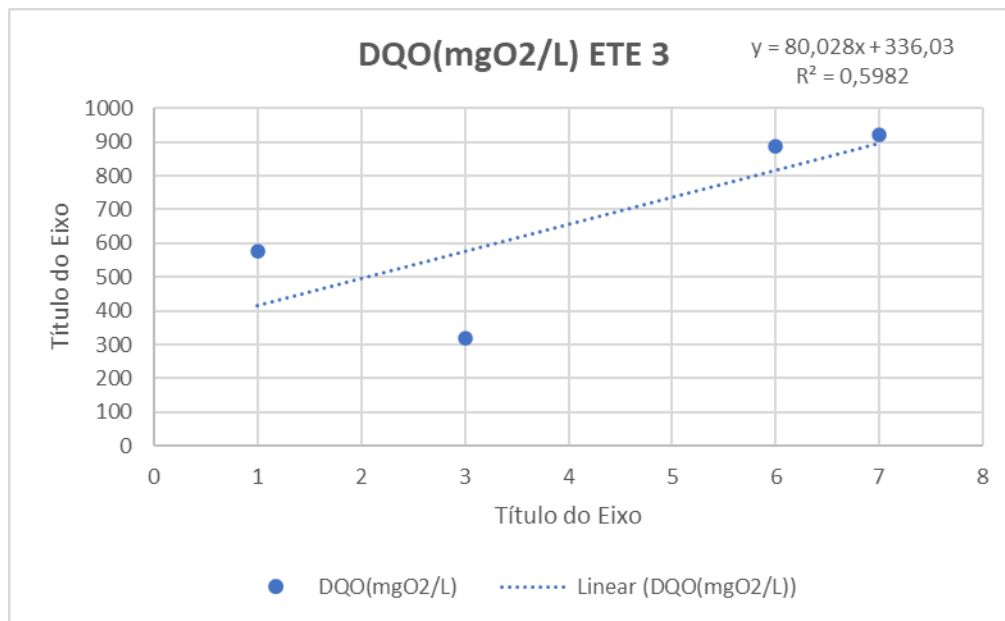


Gráfico 3: Análise estatística por mínimos quadrados de DQO da ETE 3.

Os valores de DQO e de vazão supracitados foram aplicados ao software ProBio 1.0, havendo a estimativa da produção de biogás e outros parâmetros ligados a conversão de DQO nos reatores UASB. Foram feitas simulações considerando os três cenários disponibilizados pelo software (pessimista, típico e otimista). As relações unitárias de produção de metano, biogás e de energia apresentaram, na maioria das vezes, valores abaixo das relações unitárias mínimas determinadas no estudo de Lobato (2011) para cada cenário de produção em exceção da ETE 1(Córrego D'Antas), que possuem valores bem próximos dos limites máximos.

Avaliando a proporção de CH<sub>4</sub> no biogás, através da estimativa gerada, nota-se que, todas as estações apresentam proporções acima de 60% de CH<sub>4</sub> no biogás, valor esperado para o reator UASB, sendo que a ETE 1 foi a que apresentou maior valor (71,1%), seguida da ETE 2 (68,8%) e ETE 3 (68,6%). Na produção de biogás, as estações 2 e 3 se encontraram na média, com valores entre 268,7 e 550,7 m<sup>3</sup>/dia e 74,8 e 164, m<sup>3</sup>/dia respectivamente. A estação 1 apresentou-se em torno dos limites máximos, com uma produção diária em m<sup>3</sup> de 2.616 para cenários conservadores e de 4.495 para o cenário otimista.

A produção de biogás torna-se interessante para a ETE também do ponto de vista ambiental, uma vez que existem diversos subsídios e linhas de crédito para esse tipo de projeto, a exemplo do BNDES, Caixa Econômica Federal e Banco Mundial (AHK, 2013; CEPEA, 2012). Esse tipo de incentivo surge a partir da necessidade de desenvolvimento de fontes de energia alternativas às fósseis e que sejam sustentáveis.

Em relação aos motores-geradores, com base nos dados de produção de biogás, a empresa ERBR estabeleceu para a ETE 1 o modelo ER-BR GSCA420 e para a ETE 2 foi selecionado o ER-BR GMWM120. É válido ressaltar que para a ETE 3 a quantidade de biogás mínima necessária para o funcionamento do menor motor é insuficiente e, portanto, inviabilizado o uso de motor-gerador. Em todas as ETEs foram definidas pela ERBR um painel de controle modular eletrônico, microprocessado e programável, dotado de instrumentação digital RMS com capacidade avançada de medição, comando, controle e comunicação do motor/gerador, interface com operador, informações de controle, diagnóstico e operação incorporados ao conjunto motogerador. Além disso, o controlador é projetado com as funções de proteção e controle para gerador, com circuitos internos de medição das três fases, disponibilizando em seu display de LCD todas as informações de alarme e grandezas elétricas do grupo motogerador e da rede elétrica.

Assim como o controlador eletrônico foi definido um painel igual para ambas as estações. Nesse painel inclui Relé montado em painel com pintura epóxi e disjuntor de conexão ABB motorizado com bobina de abertura e fechamento, carregador de bateria, NO-BREAK, "DPS-classe1", "TP's" e "TC's" para isolamento galvânico e proteções das entradas de

tensão e corrente. Foram definidos como equipamento de monitoramento o ERBR 4.0 - MÓDULO IOT (Internet of things). A sua principal função é o monitoramento remoto on-line das funções e produção do grupo gerador, armazenados em nuvem por 24 meses. Os dados são armazenados em relatórios diários, mensais, anuais ou por intervalo de período desejado. O monitoramento dos parâmetros do motor se dá por rotação, pressão do óleo, pressão do turbo, aceleração, temperatura da água e sonda lambda, bem como do alternador e o envio de relatórios de produção, alarmes e eventos.

A filtragem do H<sub>2</sub>S auxilia no aumento do tempo de vida útil dos equipamentos, eliminação de odores e propõe melhorias à qualidade do biogás. Nesse contexto, para a ETE 1 foi estabelecido o filtro ERBR/SFP Secagem do Biogás 3,5 HP/5CV com unidade condensadora 3°C a 5°C em ponto de orvalho. Já para a ETE 2, foi definido o filtro ERBR/SFP secagem do Biogás 2,0 HP/3CV com unidade condensadora 3°C a 5°C em ponto de orvalho. Em ambas as estações (ETE1 e ETE2) foi considerado um abrigo de aproximadamente 53m<sup>2</sup> feito de container com cobertura de estrutura metálica e telhas em fibrocimento.

Em relação aos custos de investimento, a ETE 1 apresentou um CAPEX de R\$934.33,31, valor superior ao da ETE 2, cujo CAPEX foi R\$446.070,31. Os custos de manutenção foram de R\$60.467,96 e R\$21.967,38, para as ETEs 1 e 2, respectivamente. Associado a esse valor, foram acrescentados os custos de monitoramento remoto online para ambas as estações. Dessa forma, é possível perceber que o custo total anual da ETE 1 (R\$70.467,96) é superior ao da ETE 2 (R\$31.967,38), o que pode ser justificado pelo seu tamanho.

A análise de investimento é um fato decisivo para auxílio na tomada de decisão, de forma a relacionar-se às projeções das condições futuras econômicas (Pelissari *et al.*, 2011). Outro ponto a ser considerado associa-se ao uso do biogás oriundo dessas ETEs como alternativa em momentos de crise energética. Nicolini (2016) observou em seu estudo que a energia oriunda do processo de digestão anaeróbia, não apenas servia como medida de redução de gases causadores do efeito estufa (GEE), mas também como alternativa a possíveis ineficiências das usinas hidrelétricas.

O uso de ETEs pelo Brasil, com foco na recuperação do biogás, pode se constituir como uma fonte de energia alternativa. Para Chernicharo *et al.* (2006), os custos de implementação de uma planta UASB seguido por tratamento biológico aeróbio podem proporcionar economias no investimento (CAPEX) de 20 a 50% e de OPEX acima de 50% ao se comparar com uma planta convencional.

A análise energética envolveu informações oriundas da determinação dos motor-geradores, das informações energéticas sobre as estações de tratamento e das informações de tarifas e impostos pagos pelo (DME, 2021). De acordo com o quadro 2 a produção mensal de energia da ETE 1 é superior à ETE 2, assim como a potência do motor dimensionado pelo fabricante.

*Quadro 3: Potência e produção de energia das ETEs 1 e 2.*

Unidade		ETE 1 (Corrego D'antas)	ETE 2 (Rodovia do contorno)
Potência elétrica disponível	kW	230	75
Grupo gerador recomendado pelo fornecedor	-	GSCA420 420 kVA / 260 kWe (PICO)	GMWM120 120 Kva / 75 kWe
Potência gerada em base load com a concessionária de energia	kW	250	75

<b>Consumo de biogás com 55% de CH4</b>	m <sup>3</sup> /h	145	57
<b>Produção normalizada de biogás</b>	Nm <sup>3</sup> /d	3226.2	369,7
<b>Horas de operação diária com potência máxima</b>	h	22	6,5
<b>Produção diária de energia</b>	kWh	5500	487,5
<b>Produção mensal de energia</b>	kWh/mês	165000	14625

Fonte: Autor (2021).

Tsagarakis (2007) e Metcalf & Eddy (2003), evidenciam que a principal vantagem da produção de energia em uma ETE é o fato que o biogás produzido é suficiente para atender toda a demanda energética necessária para a operação da planta. Dessa forma, a análise energética se torna fundamental para avaliar a viabilidade da ETE em termos de produção de biogás.

Valente (2015) demonstrou em seus estudos que a viabilidade econômica encontra-se em ETEs que atendam uma população entre 100 mil e 200 mil habitantes, sendo que vazões a partir de 150 l/s já devem ser consideradas para a análise de uso de biogás para geração de energia. No presente estudo, a ETE 1 apresenta uma vazão média de 270L/s, mais uma vez sendo reforçada a sua viabilidade econômica. O autor complementa que, embora a digestão anaeróbica apresente um custo de investimento alto, em geral ela possui custos inferiores por eletricidade gerada, sendo que para escalas acima de 200 mil habitantes, tanto o custo de investimento como o LCOE (custo nivelado) estão dentro da faixa de 1,2 a 1,6 mil R\$/kW e 144 a 456 R\$/kW, respectivamente.

Acrescenta-se como vantagem, além do retorno econômico e da economia que essas usinas podem proporcionar, a possibilidade de geração descentralizada e próxima aos pontos de recarga, a possibilidade de venda de créditos de carbono, geração de empregos e menor emissão de metano, conseqüentemente, menores prejuízos ambientais (Salomon & Lora, 2005). Para o cálculo do crédito de carbono são utilizados os dados relativos à produção e potência de energia produzida pelas ETEs. Nesse estudo, foi observado que para a ETE 1, cuja potência e o tempo de operação são superiores, o crédito de carbono que pode ser obtido é superior à ETE 2. Como a ETE 3 não apresentou viabilidade energética, não foi realizado o seu cálculo de crédito de carbono.

A ETE 1 apresentou um total de carbono evitado de 22.082,5 tCO<sub>2</sub> eq por ano, o que totaliza em Certificado de Emissões Evitadas (CEE), considerando o valor de CEE de US\$10,00 e o tempo de vida útil da planta, segundo dados de Pecora (2006), teria-se um total de US\$2.208.250,00. Já para a ETE 2 esse valor seria de US\$577.703,75. Dessa forma, fica evidente que o uso energético do biogás oriundo das ETEs influencia positivamente o município, não apenas benefícios administrativos, mas também possibilita a geração descentralizada de energia elétrica, bem como retorno financeiro em termos de crédito de carbono (Pecora, 2006).

De acordo com Oliveira e Domingues (2011), ao se enquadrarem no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do protocolo de Kyoto, as receitas oriundas do crédito de carbono, pode, muitas vezes, ser determinante para a viabilidade de execução de projetos como esse. Acrescenta-se ainda estudos como de Silva (2015), em que foi constatado a redução na emissão



de CO<sub>2</sub> em ETE através do aproveitamento de biogás para geração de energia. Porém, ressalta-se que o estudo do aproveitamento energético do biogás oriundo de ETEs deve ser considerado como uma alternativa a longo prazo e com maiores investimentos governamentais (Gomes *et al.*, 2017).

Com base nas avaliações realizadas observa-se que para a ETE 1 o período de retorno (payback) do investimento seria de 25 meses (Gráfico 4), já para a ETE 2, esse tempo está estimado em 221 meses (Gráfico 5). Campello *et al.* (2021), demonstraram em seus estudos que, a média de payback nos municípios onde o investimento foi viável foi de 4.49 anos para uma população entre 150 mil e 250 mil habitantes. Dessa forma, nota-se que o período necessário de retorno pela ETE 1 torna a sua instalação viável. Savi (2019) avaliou o potencial de geração de energia a partir do biogás produzido em uma ETE em Criciúma (SC), obtendo um tempo de payback de 21 meses, concluindo que o investimento é significativamente atrativo. Esse tempo de retorno se assemelha ao da ETE 1, corroborando com os resultados encontrados nesse estudo e indicando a viabilidade de instalação e de aproveitamento do biogás como fonte energética.

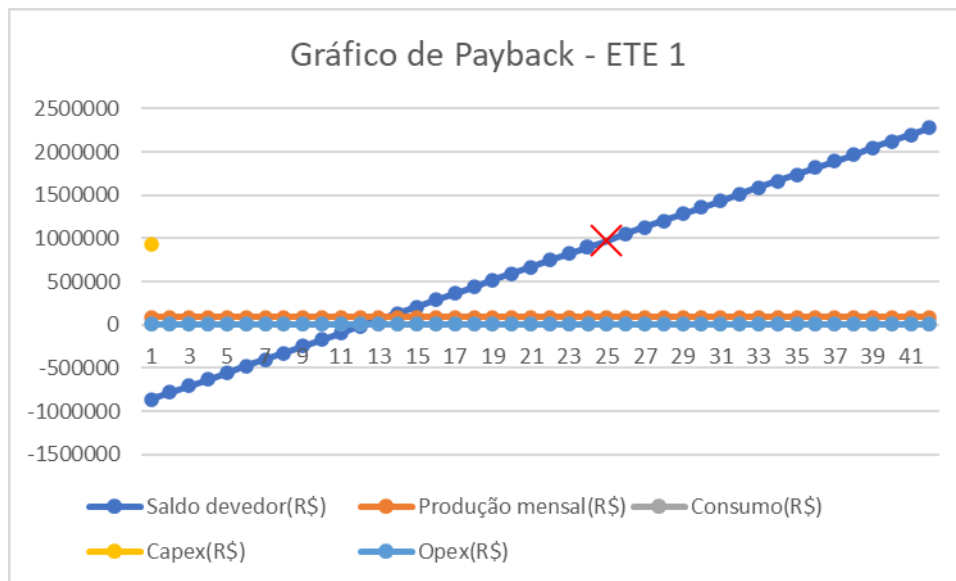


Gráfico 4: Payback descontado da ETE 1.

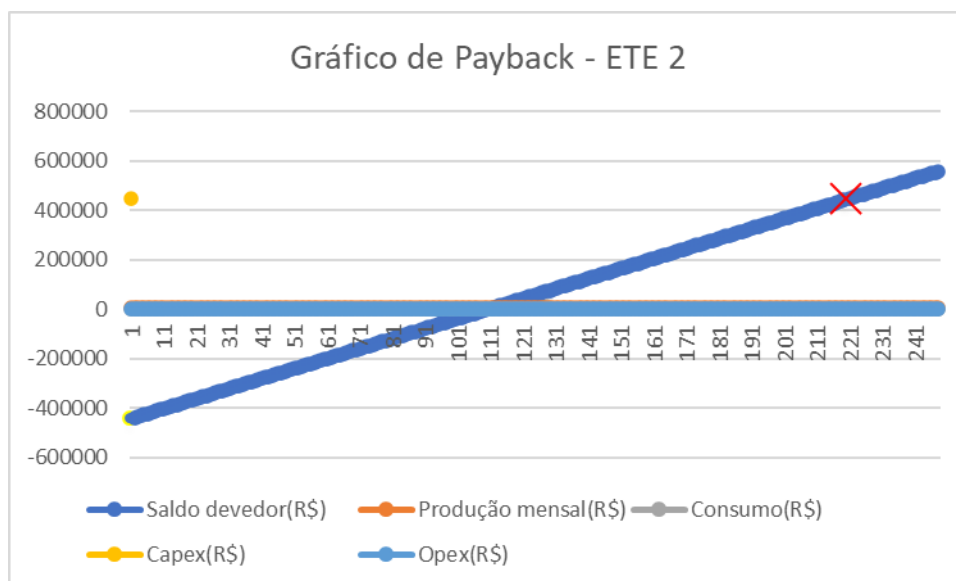


Gráfico 5: Payback descontado da ETE 2.

Nesse mesmo sentido, Santos *et al.* (2016) avaliaram a viabilidade econômica e o potencial de geração de energia oriunda do biogás de ETEs com sistemas anaeróbios, indicando que há uma viabilidade econômica para municípios com uma população superior a 300 mil habitantes.

#### 4. Conclusão

Com base nos resultados encontrados é possível concluir que:

- Apenas a ETE 1 apresenta viabilidade para instalação de usina de energia a partir do biogás gerado pelo tratamento de esgoto, considerando a sua capacidade de produção energética e o tempo de retorno de investimento;
- Há possibilidade de uso de créditos de carbono como forma de aumentar as receitas do projeto, tornando-o ainda mais viável do ponto de vista econômico e ambiental;
- Há a possibilidade de sua utilização em casos de crise energética, em que as hidrelétricas não demonstrem sua capacidade de produção máxima.
- A biomassa oriunda dos esgotos sanitários possui potencial para serem empregados na produção de biogás e sua posterior conversão em energia elétrica nas ETEs;
- Para que o uso do biogás seja de fato amplamente aplicado, são necessárias políticas públicas que incentivem esse tipo de projeto.

Estudos adicionais são necessários para que projetos de manejo sejam elaborados e executados com maior eficiência, garantindo que os propósitos de sustentabilidade estejam sendo atingidos e que os benefícios desses sistemas possam, de fato, melhorar a qualidade de vida e do ambiente ao qual a sociedade está inserida.

#### Referências

- AHK. (2013). Energias Renováveis – Biogás. AHK – Câmara de Comercio e Indústria Brasil-Alemanha. <http://ahkbusiness.de/pt/energias-renovaveis/biogas/#finanzierung>.
- Amaral, K.G.C. *et al.* (2019) Sustainability assessment of sludge and biogas management in wastewater treatment plants using the LCA technique. *Ambiente & Água*, 14(5), e.2371.
- Campello, L.D. *et al.* (2021) Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 2614-2629.
- Calijuri, M.C.; Cunha, D.G.F. Engenharia ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- CEPEA (2012). Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Estatísticas e informações sobre o mercado de carbono. [www.cepea.esalq.usp.br](http://www.cepea.esalq.usp.br).
- Chernicharo, C.A.L. *et al.* (2006) Post-Treatment Options for the Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater. *Reviews In Environmental Science And Bio/technology*, 5(1), 73-92.
- Beasil. (2011). Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N° 430, de 2011. 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.
- European Commission (2001) Environmental pressure indicators for the EU. Office for official publications of the European Communities. Luxembourg, 2001.
- Gomes, G.V. *et al.* (2017) Estudo da produção de energia elétrica a partir do biogás com e sem purificação de estação de tratamento de esgoto. *The Journal of Engineering and Exact Science*, 3(7), 899-919.
- Lobato, L. C. D. S. (2011) Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico. Belo Horizonte: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA).
- Metcalf & Eddy. (2003) Wastewater Engineering: Treatment, disposal, reuse. 4. ed. New York: McGraw-Hill International Editions, 1848p.
- Nicolini, D.R.W. (2016) Produção de biogás a partir do tratamento de efluentes sanitários. MBA Gestão ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 44f.
- Oliveira, W.R. & Domingues, E.D. (2011) Energia Elétrica e Créditos de Carbono: uma Proposta de Aproveitamento Energético do Biogás Gerado em Estações de Tratamento de Esgoto: Estudo de Caso. *Ciências Exatas Tecnologia*, 10(1), 61-67.
- PECORA, V. Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – estudo de caso. São Paulo: Universidade de São Paulo USP, 153p. 2006.

Pelissari, A.S. *et al.* (2011) Competências gerenciais: um estudo em pequenas empresas de confecções. *Revista de Administração*, 17(1), 149-180.

Salomon, K., R. & Lora, E. E. S (2009) Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass e Bioenergy*, 33, 1101-1107.

Santos, I.F.S.S. *et al.* (2016) Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment Plants in Brazil: An assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*, 126, 504-514.

Savi, V.G. (2019) Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir de biogás produzido na Estação de Tratamento de Esgoto(ETE) Santa Luzia (Criciúma/SC). Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá. 92f.

Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento – SNIS (2017) Diagnóstico dos serviços de água e esgotos. Site institucional.

Tsagarakis, K.P. (2007) Optimal number of energy generators for biogas utilization in wastewater treatment facility. *Energy Conversion and Management*, 38, 2694-2698.

Valente, V. B. (2015) Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 182f.

.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As crescentes preocupações ambientais associadas às novas demandas sociais têm estimulado a busca por modelos energéticos sustentáveis, nesse sentido, pesquisas como essa se tornam essenciais para entender de que forma o biogás produzido pelas estações de tratamento de esgoto pode ser utilizado e aplicado dentro dos cenários e do contexto da população em questão.

De acordo com os resultados obtidos nesse trabalho é possível concluir:

- a) Apenas a ETE 1 apresenta viabilidade para instalação de usina de energia a partir do biogás gerado pelo tratamento de esgoto, considerando a sua capacidade de produção energética e o tempo de retorno de investimento;
- b) Há possibilidade de uso de créditos de carbono como forma de aumentar as receitas do projeto, tornando-o ainda mais viável do ponto de vista econômico e ambiental;
- c) Há a possibilidade de sua utilização em casos de crise energética, em que as hidrelétricas não demonstrem sua capacidade de produção máxima.
- d) A biomassa oriunda dos esgotos sanitários possui potencial para serem empregados na produção de biogás e sua posterior conversão em energia elétrica nas ETEs;
- e) Como recomendação para futuros trabalhos, sugere-se a continuidade desse estudo para que o uso do biogás seja de fato amplamente aplicado. Além disso, são necessárias políticas públicas que incentivem esse tipo de projeto.

## REFERÊNCIAS

- AIYUK, S. *et al.* Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates: a review. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 97, p. 2225–224, 2006.
- ALMEIDA, L.I.J. **Potencial de produção de biogás e energia elétrica a partir da remoção da matéria orgânica oriundo de tratamento de esgotamento sanitário na ETE norte**. 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas - TO, 2016.
- AMARAL, K.G.C. *et al.* Sustainability assessment of sludge and biogas management in wastewater treatment plants using the LCA technique. **Ambiente & Água**, v.14, n.5, e.2371, 2019.
- ANDRADE, H. O. *et al.* Aspectos teóricos na produção de biogás e biofertilizante pelo mecanismo de biodigestão e geração de energia elétrica limpa através de um gerador específico. *In*: CONNEPI - CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 6., **Anais [...]**. Palmas, 2012.
- BILOTTA, P.; ROSS, B.Z.L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n.2, p. 275-282, 2016
- BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução N° 430, de 2011. 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.
- CAMPELLO, L.D. *et al.* Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, p. 2614-2629, 2021.
- CARVALHO, K.Q. **Resposta dinâmica de reator de UASB em escala piloto submetido a cargas orgânicas e hidráulicas cíclicas: modelos matemáticos e resultados experimentais**. 2006. 222f. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos – SP, 2006.
- CAVALCANTI, P. F. F. **Aplicação de reatores UASB e lagoas de polimento no tratamento de esgoto doméstico**. 1. ed. João Pessoa: Gráfica Santa Marta, 2009. 172p.
- CALIJURI, M.C.; CUNHA, D.G.F. **Engenharia ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- CHARMCHUEN, S. *et al.* From biogas to biofuel: Materials used for biogas cleaning to biomethane. **Chembioeng Reviews**, [s.l.], v.3, n.6, p.250-265, 2016.
- CHERNICHARO, C. A. L. *et al.* Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Reviews In Environmental Science And Biotechnology**, [s.l.], v. 14, n. 4, p.649-679, 21 set. 2015.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbios**. Vol. 5. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2008.

CHERNICHARO, C.A.L.; STUETZ, R.M. Energy Recovery from Biogas in Anaerobic Wastewater Treatment Plants. 2008. *In*: CHERNICHARO, C.A.L. **Limitações e Possíveis Melhorias Futuras no Projeto, na Construção e na Operação de Reatores UASB Tratando Esgotos Domésticos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2008. Relatório final de atividades referente a pós-doutorado.

CHERNICHARO, C.A.L. **Pós-tratamento de efluentes anaeróbios**. Projeto PROSAB. 544p. Belo Horizonte, 2001.

COELHO, S. T. *et al.* Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás proveniente do Tratamento de Esgoto utilizando um Grupo gerador de 18 kW. *In*: V CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 02 Junho de 2006; site do CENBIO – Centro Nacional de referência em Biomassa.

COELHO, S.T. *et al.* **Programa de uso racional de energia e fontes alternativas – PUREFA**. *In*: CONGRESSO INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ICTR, 1, 2003, São Paulo. Biodigestor modelo UASB. São Paulo: SP, 2003. 20 p.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto**. 2006.194p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2006.

DEGANUTTI, R. *et al.* **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Bauru-SP, 2008.

DENG, Y. *et al.* Biogas as sustainable energy source in China. Regional development strategy application and decision making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 294-303, 2014.

DEUBLEIN, D. *et al.* Biogas from waste and renewable resources: An introduction. **Wiley-VCH**, p. 7-23, 2008.

ELFATTAH, T.A. *et al.* Utilization of Aspen HYSYS simulation to determine the optimum absorber working pressure needed to achieve more than 0.99 methane purity. **International Journal of Information Research and Review**, v.3, p. 1739-1744, 2016.

EUROPEAN COMMISSION. **Environmental pressure indicators for the EU**. Office for official publications of the European Communities. Luxembourg, 2001.

FEIDEN, A. *et al.* **Avaliação da eficiência de um biogestor tubular na produção de biogás a partir de águas residuárias de suinocultura**. *In*: V ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2004, Campinas.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de**

**biossólidos.** UEL - Universidade Estadual de Londrina, p.91, 2000.

FRANÇA JUNIOR, A. T. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto.** 2008. 148p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira -SP, 2008.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: Um estudo de caso na região de Toledo-PR.** 2003. 119p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

GODOY JÚNIOR, E. *et al.* Miniestação de tratamento de esgoto e reuso de águas associada ao sistema de cogeração energética no aproveitamento do biogás produzido. *In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 4, 2004, Natal. **Anais[...]** Natal: [s.n.], 2004. CD-ROM.

GOMES, G.V. *et al.* Estudo da produção de energia elétrica a partir do biogás com e sem purificação de estação de tratamento de esgoto. **The Journal of Engineering and Exact Science**, v.3, n.7, p. 899-919, 2017.

HERNÁNDEZ-PADILLA, F. *et al.* Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2140-2153, 2017.

IEA. **World energy outlook 2006.** International Energy Agency. Paris, 2006.

ISSA, C.G. **Testes ecotoxicológicos para avaliação do potencial impacto ambiental em corpos receptores por efluente de Estação de Tratamento de Esgoto.** 2019. 69p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos -SP, 2019.

LIMA, F.P. **Energia no tratamento de esgoto: análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás.** 139p. 2005. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2005.

LOBATO, L. C. D. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico.** 2011. 187p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2011.

LOPES, L.S. **Avaliação do potencial de recuperação energética do lodo e biogás provenientes de reatores uasb tratando esgoto doméstico no estado do Paraná.** 2018. 131p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2018.

LOUREIRO, J.M. *et al.* Combined and hybrid adsorbents: Fundamentals and applications. **Springer Science & Business Media**, 2006.

MENSAH, J.H.R. *et al.* Potencial de aproveitamento energético de biogás através de reatores UASB: estudo de caso em Itaúna, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 6, n.14, p. 609-621, 2019.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1980 p.

METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment, disposal, reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill International Editions, 2003. 1848p.

MORGENROTH, E.; KOMMEDAL, R.; HARREMOËS, P. Process and modeling of hydrolysis of particulate organic matter in anaerobic wastewater treatment – a review. **Water Science Technology**, v. 45, n. 6, p. 25-40, 2002.

NOYOLA, A. *et al.* **Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales**. 1. ed. México, 2013. 140 p.

NOYOLA, A. *et al.* Treatment of biogás produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. **Reviews in environmental Science and Biotechnology**, v. 5, p. 93-114, 2006.

ROLLEMBERG, S.L.S. *et al.* Tecnologia de lodo granular aeróbio no tratamento de esgoto doméstico: oportunidades e desafios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.25, n.3, p. 439-449, 2020.

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

RYCKEBOSCH, E. *et al.* Techniques for transformation of biogás to biomethane. **Biomass and Bioenergy**, v.35, p. 1633-1645, 2011.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – estudo de caso**. 2006. 153p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2006.

PEROVANO, T.G.; FORMIGIONI, L.P.A. **Geração de Energia a partir de subprodutos do tratamento de esgoto sanitário**. 2011. 101p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2011.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de Geração de Energia Elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa & Energia**, v.2, n.1, p.57-67, 2005.

SANTOS, I. F. S. *et al.* Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: An assessment of feasibility and potential. **Journal of Cleaner Production**, v.126, p.504–514, 2016.

SEGHEZZO, L. **Anaerobic Treatment of domestic wastewater in subtropical regions**. Wageningen: Wageningen University, 2004. 190 p.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos**. Site institucional, 2017.



SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS – SNIRH. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**. Site Institucional, 2017.

TOLEDO, F.H.S.F.; VENTURIN, N. DIAS, T.C. O uso de biosólidos no setor florestal. **Enciclopédia Biosfera**, v.8, n.15, p. 2275-2294, 2012.

TSAGARAKIS, K.P. Optimal number of energy generators for biogas utilization in wastewater treatment facility. **Energy Conversion and Management**, v. 38, p. 2694-2698, 2007.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. “**Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente**”, Epgraf, Campina Grande, 240 p. 1994.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. 2015. 182f. Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2015.

VAN HAANDEL, A.C.; VAN DER LUBBE, J. **Handbook biological wastewater treatment: design and optimization of activate sludge systems**. Londres: IWA Publishing, 2012.

VAN LIER, J. B. *et al.* Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 14, p. 681–702, 2015

VERSIANI, B. M. **Desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais tratando esgotos sanitários do campus da UFRJ**. 2005. 88f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, 4ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2014.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte, UFMG. v.2. 211p. 1996.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

YANG, R.T. **Adsorbents: Fundamentals and Applications**. John Wiley & Sons, Hoboken, 2003.

ZILOTTI, H.A.R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. 2012. 52p. Dissertação (Mestrado) - UNIOESTE, Cascavel, PR, 2012.