

**INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE**  
**Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação**  
**Mestrado Profissional em Tecnologia e Ambiente**



**Dissertação**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS SUBPRODUTOS GERADOS EM UMA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS**

**FERNANDA AMARAL GOIS**

**Araquari, 07 de abril de 2022**

**FERNANDA AMARAL GOIS**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS SUBPRODUTOS GERADOS EM UMA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Tecnologia e Ambiente do Instituto Federal Catarinense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área de concentração: Ciências Ambientais).

**Orientador:** Claudemir Marcos Radetski, Dr.

**Araquari, abril de 2022**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática do ICMC/USP, cedido ao IFC e  
adaptado pela CTI - Araquari e pelas bibliotecas do Campus de Araquari e Concórdia.

G616a Gois, Fernanda Amaral  
Aproveitamento energético dos subprodutos gerados  
em uma estação de tratamento de esgotos sanitários /  
Fernanda Amaral Gois; orientador Claudemir Marcos  
Radetski. -- Araquari, 2022.  
75 p.

Dissertação (mestrado) - Instituto Federal  
Catarinense, campus Araquari, , Araquari, 2022.

Inclui referências.

1. Biogás. 2. Lodo. 3. Reatores Anaeróbios. 4.  
Recuperação energética. 5. Esgoto. I. Radetski,  
Claudemir Marcos. II. Instituto Federal Catarinense.  
. III. Título.

**FERNANDA AMARAL GOIS**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS SUBPRODUTOS GERADOS EM UMA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Ambiente, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, Instituto Federal Catarinense.

**Data da Defesa: 07/04/2022**

**Banca examinadora:**

**Prof. Dr. Claudemir Marcos Radetski (Orientador)**

**Doutor em Toxicologia Ambiental pela Universidade de Metz (França)**

**Instituição de vínculo: Instituto Federal Catarinense (IFC) *campus* Araquari**

**Prof. Dr. Cleder Alexandre Somensi**

**Doutor em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI**

**Instituição de vínculo: Instituto Federal Catarinense (IFC) *campus* Araquari**

**Dra. Bianca Coelho Machado**

**Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC**

**Instituição de vínculo: Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN)**



---

*Emitido em 07/04/2022*

**DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS - CAMPUS ARAQUARI Nº 004/2022 - CCPGTA (11.01.02.31)**  
**(Nº do Documento: 2)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 12/04/2022 10:52)*

CLAUDEMIR MARCOS RADETSKI

ASSINANTE EXTERNO

CPF: 586.249.379-49

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.ifc.edu.br/documentos/> informando seu número: **2**  
, ano: **2022**, tipo: **DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS - CAMPUS ARAQUARI**, data de emissão: **12/04**  
**/2022** e o código de verificação: **8a55510a4b**

**Dedico este trabalho à Deus e a minha família**

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por ter me proporcionado chegar até aqui.

Agradeço a minha família por todo o apoio e pela compreensão frente os momentos de ausência, em especial aos meus pais. Vocês são minha base, meus exemplos de vida, as pessoas que sempre me concederam apoio nos momentos de maior dificuldade e vibraram comigo nos momentos das maiores conquistas. Sem vocês eu não estaria aqui hoje! Amo vocês!

Ao meu namorado e amigo! Djonatan, você esteve ao meu lado durante toda trajetória, foi o meu apoio desde o início e me auxiliou nas coletas e viagens. Muito obrigado por todos esses anos juntos e por ter me dado alegrias diárias, minhas calopsitas desastradas!

Não posso deixar de agradecer ao Professor Claudemir Marcos Radetski, que exerceu o papel de orientador, me auxiliou durante toda a elaboração deste trabalho e conseguiu me guiar muito bem, com incentivo durante todas as trocas de e-mail!

Agradeço também a todos os professores que contribuíram para minha formação. Em especial ao professor Cleder Alexandre Somensi que além de ter aceitado fazer parte da minha banca, foi a pessoa que me recebeu inicialmente no processo de seleção e auxiliou na obtenção das análises de biogás.

Agradeço a CASAN por autorizar a aplicação deste trabalho no sistema de esgotamento sanitário de Indaial e aos amigos da Companhia que trabalham na Estação de Tratamento de Esgoto, pelo auxílio durante o preparo e a coleta de amostras para a elaboração deste trabalho.

Agradeço em especial a Engenheira da CASAN, Bianca Coelho Machado, que prontamente aceitou meu convite para ser membro externo da banca, uma grande profissional representando a Companhia.

Aos meus amigos da Casan. Em especial ao Vinicius, que não mediu esforços para me auxiliar na obtenção de equipamentos para realizar análises no laboratório da Casan.

Agradeço ao Laboratório de Cromatografia da FURB pela parceria na realização das análises de cromatografia gasosa, em especial a Luana Curbani e a Luana Chiarello, que gentilmente e de maneira muito prestativa me auxiliaram durante todo o processo destas análises.

Agradeço ao Prof. Renan Testolin e sua disponibilização para me encontrar no pátio da Univali, me entregando alguns equipamentos para análise e explicação de funcionamento.

Para finalizar, agradeço de forma geral a todos os meus amigos! Todos que fazem ou fizeram parte da minha vida pessoal e acadêmica. Mesmo não mencionados aqui, saibam que vocês fizeram diferença e guardo cada um de vocês no meu coração.

Muito Obrigada!

***“Ambiente limpo não é o que mais se limpa e sim o que menos se suja”***

***Chico Xavier***

## Resumo

GOIS, Fernanda Amaral. **Aproveitamento energético dos subprodutos gerados em uma Estação de Tratamento de esgotos sanitários**. 2022. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Ambiente, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, Instituto Federal Catarinense, Araquari, 2022.

Estações de tratamento de esgoto, usualmente, possuem fluxogramas de tratamento com Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente. O tratamento de efluentes a partir destes sistemas anaeróbios resultam na geração de subprodutos, como lodo e biogás, nas estações de tratamento de esgoto (ETEs). A escolha de alternativas mais interessantes na perspectiva de gerenciamento destes pode resultar na autossuficiência energética das estações, os quais apresentam potenciais de aproveitamento energético, seja pelo uso individual ou combinado para a geração de energia ou calor, conferindo benefícios no âmbito social, ambiental e econômico, segundo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Diante disto, este trabalho teve como objetivo contribuir com a avaliação do potencial energético do biogás, do lodo desaguado e com o estudo de alternativas de aproveitamento energético desses subprodutos gerados em uma ETE localizada em Indaial (SC). Para isto, foi realizado caracterização do potencial energético do lodo (avaliação do poder calorífico, análise imediata e elementar), bem como avaliação energética do biogás (caracterização qualitativa e quantitativa). Para o biogás foi proposto dois cenários de aproveitamento energético, sendo avaliado no primeiro cenário o uso prioritário do biogás para realizar a secagem térmica do lodo desidratado, enquanto para o segundo foi avaliado a cogeração de energia com o uso prioritário do biogás em motor de combustão interna e secagem térmica do lodo com gases de exaustão liberados pelo motor. Dentre os principais resultados, pode-se apontar que o biogás apresenta viabilidade técnica e ambiental para emprego como fonte de energia, tendo apresentado potencial energético de  $1.462,06 \text{ Kwh.d}^{-1}$ . Ambos os cenários propostos apresentaram economia em relação aos custos atuais. O primeiro cenário demonstrou uma redução de 63,5% da massa de lodo destinada ao aterro e economia de R\$ 29.551,06 em relação ao transporte e disposição deste. Já o segundo cenário se destacou visto que além de apresentar redução na massa de lodo a ser disposta em aterro sanitário, indicou suprimento de eletricidade de 83,17% do consumo da estação, levando a economia total de R\$ 143.378,92. No que tange ao quesito ambiental, o aproveitamento energético do biogás indicou que pode ser evitado a emissão de 642,14 toneladas de  $\text{CO}_2 \text{ eq}$  ao ano, vindo ao encontro com a redução de gases do efeito estufa e geração de créditos de carbono. O potencial energético apresentado pelo lodo foi de  $432,52 \text{ Kwh.d}^{-1}$ , o qual corresponde a um poder calorífico de fração sólida volátil do lodo de  $2,53 \text{ Kwh.kg}^{-1}$ , representando que apesar de ser um potencial energético menor do que o encontrado para o biogás, pode-se utilizar o lodo na combustão para produção de energia elétrica ou a partir da cogeração com outros combustíveis. Ainda, considerando 50% de rendimento na transformação do potencial energético do lodo em energia elétrica, é possível atingir uma economia próxima a R\$ 62.359,00 anual.

**Palavras-chave:** biogás; lodo; reator UASB; recuperação energética; esgoto.

## Abstract

GOIS, Fernanda Amaral. **Energy usages of by-products generated in waster sewage treatment plant.** 2022. 75p. Dissertation (Master degree in Science) - Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Ambiente, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, Instituto Federal Catarinense, Araquari, 2022.

Sewage treatment plants usually have treatment flowcharts with an Upflow Anaerobic Reactor. The treatment of effluents from these anaerobic systems results in the generation of by-products, such as sludge and biogas, in sewage treatment plants (ETEs). The choice of more interesting alternatives from the perspective of managing these, can lead to energy self-sufficiency of the stations, which have potential for energy use, either by individual or combined use for the generation of energy or heat, providing benefits in the social, environmental and economic, according to the Sustainable Development Goals. Therefore, this work aimed to contribute to the assessment of the energy potential of biogas, dewatered sludge and to the study of alternatives for the energy use of these by-products generated in an ETE located in Indaial (SC). For this, characterization of the energy potential of the sludge was carried out (assessment of calorific value, immediate and elemental analysis), as well as energy assessment of the biogas (qualitative and quantitative characterization). For biogas, two scenarios of energy use were proposed, being evaluated in the first scenario the priority use of biogas to perform the thermal drying of the dehydrated sludge, while for the second, the cogeneration of energy with the priority use of biogas in a combustion engine was evaluated and thermal drying of the sludge with exhaust gases released by the engine. Among the main results, it can be pointed out that biogas presents technical and environmental feasibility for use as an energy source, having presented an energy potential of  $1,462.06 \text{ Kwh.d}^{-1}$ . Both proposed scenarios showed savings in relation to current costs. The first scenario showed a reduction of 63.5% of the sludge mass destined to the landfill and savings of R\$ 29,551.06 in relation to its transport and disposal. The second scenario stood out since, in addition to presenting a reduction in the mass of sludge to be disposed of in a sanitary landfill, it indicated an electricity supply of 83.17% of the station's consumption, leading to a total savings of R\$ 143,378.92. Regarding the environmental aspect, the energy use of biogas indicated that the emission of 642.14 tons of  $\text{CO}_2$  eq per year can be avoided, coming in line with the reduction of greenhouse gases and the generation of carbon credits. The energy potential presented by the sludge was  $432,52 \text{ Kwh.d}^{-1}$ , which corresponds to a calorific value of the volatile solid fraction of the sludge of  $2,53 \text{ Kwh.kg}^{-1}$ , representing that despite being a lower energy potential than that found for biogas, sludge can be used in combustion to produce electricity or from cogeneration with other fuels. Also, considering a 50% yield in the transformation of the energy potential of the sludge into electrical energy, it is possible to achieve savings close to R\$ 62.359,00 per year.

**Keywords:** biogas; sludge; UASB reactor; energy recovery; sewage

## Lista de Figuras

Figura 1	Etapas de Tratamento ETE Nações.....	24
Figura 2	Ponto de amostragem biogás e seringa utilizada para coleta.....	25
Figura 3	Cenários propostos para aproveitamento energético do biogás.....	30
Figura 4	Filtro prensa da ETE Nações.....	45
Figura 5	Fluxograma das etapas para caracterização do lodo.....	45
Figura 6	Coleta e amostragem lodo de esgoto.....	46
Figura 7	Analisador de Umidade Halógeno.....	47

## Lista de Gráficos

Gráfico 1	Composição Imediata do lodo.....	51
Gráfico 2	Composição elementar do lodo.....	55

## Lista de Quadros

Quadro 1	Metodologias para análise imediata.....	47
Quadro 2	Metodologia Ensaio PCS.....	48

## Lista de Tabelas

Tabela 1	Características da ETE Nações.....	24
Tabela 2	Equações empregadas no programa computacional ProBio 1.0.....	26
Tabela 3	Equações utilizadas no cálculo de emissão de metano evitada.....	29
Tabela 4	Cálculos utilizados para avaliação do potencial energético.....	31
Tabela 5	Estatística descritiva dos dados de monitoramento da Estação de Tratamento de Esgoto ETE Nações.....	32
Tabela 6	Composição do biogás da Estação de Tratamento de Esgoto ETE Nações	33
Tabela 7	Dados de entrada e valores considerados para cálculo do potencial energético.....	34
Tabela 8	Valores de produção de metano apresentados no programa computacional para a ETE Nações.....	35
Tabela 9	Resultados apresentados no programa computacional para a ETE Nações.....	36
Tabela 10	Resultado das variáveis calculadas e emissão de metano evitada.....	37
Tabela 11	Parâmetros utilizados na avaliação do potencial energético.....	38
Tabela 12	Estimativa do potencial energético na ETE Nações.....	39
Tabela 13	Estatística descritiva dos resultados da análise imediata do lodo.....	51
Tabela 14	Estatística descritiva dos resultados de composição elementar do lodo..	54
Tabela 15	Resultado da análise experimental do PCS do lodo.....	56
Tabela 16	Estatística descritiva dos resultados de PCS do lodo obtidos a partir de correlação.....	57
Tabela 17	Poder calorífico superior de lodo de esgoto encontrados na literatura....	58
Tabela 18	Poder calorífico superior de biomassas utilizadas frequentemente com fins energéticos encontrados na literatura.....	59
Tabela 19	Estatística Descritiva das emissões gasosas e materiais particulados.....	60

### **Lista de Abreviaturas e Siglas**

BRS	Bactéria Redutoras de Sulfato
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
C	Carbono
CF	Percentual de Carbono Fixo
CO	Carga Orgânica
DQO	Demanda Química de Oxigênio
E	Eficiência
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FC	Fator de Capacidade
H	Hidrogênio
IFC	Instituto Federal Catarinense
K	Coeficiente produção de lodo
MCI	Motor de Combustão Interna
MV	Percentual de Material Volátil
O	Oxigênio
P	Pressão
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PE	Potência Elétrica
POP	População
Q	Vazão
QPC	Contribuição per capita de esgoto
SC	Santa Catarina
T	Temperatura
TC	Percentual de Cinzas
TS	Teor de sólidos
U	Umidade

UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor
V	Volume
Y	Coeficiente produção de sólidos

## SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E ESTADO DA ARTE .....	17
1.1	Reator UASB no tratamento de esgoto sanitário.....	17
1.2	Subprodutos gerados e seu reaproveitamento .....	18
1.3	Definição do problema .....	20
2	OBJETIVOS.....	21
2.1	Geral .....	21
2.2	Específicos .....	21
3	AValiação DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO NA ETE NAÇÕES .....	22
3.1	Introdução .....	22
3.2	Materiais e Métodos .....	23
3.2.1	Local de Estudo .....	23
3.2.2	Caracterização do biogás, produção de energia e emissão de metano evitada	25
3.2.3	Cálculo do balanço energético da ETE .....	29
3.3	Resultados e Discussão.....	32
3.3.2	Emissão de Gases do Efeito Estufa evitada .....	36
3.4	Conclusão .....	40
4	ESTUDO DAS POSSIBILIDADES DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA BIOMASSA E AValiação DAS EMISSÕES GASOSAS .....	42
4.1	Introdução .....	42
4.2	Materiais e Métodos .....	44
4.2.1	Área de Estudo.....	44
4.2.2	Coleta das amostras e Caracterização do lodo.....	46
4.2.3	Análise Imediata.....	47
4.2.4	Análise Elementar .....	48

4.2.5	Poder Calorífico Superior e Potencial Energético .....	48
4.2.6	Avaliação das emissões gasosas e materiais particulados .....	50
4.3	Resultados e Discussão.....	50
4.3.1	Análise Imediata.....	50
4.3.2	Análise Elementar .....	54
4.3.3	Poder Calorífico Superior .....	56
4.3.4	Avaliação das emissões gasosas e materiais particulados .....	60
4.4	Conclusão .....	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
6	REFERÊNCIAS.....	69

## **1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E ESTADO DA ARTE**

### **1.1 Reator UASB no tratamento de esgoto sanitário**

O Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e manta de lodo, denominado Reator UASB do inglês “*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*” é uma unidade de tratamento anaeróbio com objetivo primordial de remoção da matéria orgânica carbonácea ou dissolvida em águas residuais (LOBATO, 2011). Esta unidade consiste em um tanque em que o esgoto a ser tratado entra nos fundos do reator e passa em fluxo ascendente por um leito e por uma manta de lodo anaeróbia que ocupa parte deste tanque. Ao passar por esta manta, favorecida pelo contato e mistura intensiva do substrato (esgoto sanitário e matéria orgânica) com a biomassa (lodo), ocorre a biodegradação da matéria orgânica presente na água residual, e conseqüentemente origina subprodutos como lodo que precisa ser retirado do fundo do reator e biogás. A parte superior do reator possui um separador trifásico, onde é possível a separação das fases líquidas (efluente tratado), gasosas (biogás) e sólidas (lodo) provenientes do tratamento (VAN HAANDEL; VAN DER LUBBE, 2012 e BRASIL, 2015).

Atualmente, reatores UASB configuram-se como a principal tendência de tratamento de esgotos no Brasil, tanto como unidades únicas de tratamento ou seguidas de tratamento complementar (CHERNICHARO *et al.*, 2018a). Em torno de 40% das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) das regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil empregam reator UASB como parte de seu tratamento, permitindo afirmar que o país possui o maior parque de reatores anaeróbios do mundo entre as tecnologias para tratamento de esgoto sanitário (CHERNICHARO *et al.*, 2018b).

Custos de estações de tratamento de esgoto com Reator UASB (anaeróbio), seguido por unidade de tratamento complementar aeróbio, geram economias em investimento em torno de 20 a 50% e de operação acima de 50%, quando comparados a plantas de tratamento com lodos ativados (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

Sendo assim, trata-se de sistemas com simplicidade operacional e baixo custo quando comparados a processos aeróbios convencionais ou físico-químicos. Ainda, a concentração de biomassa presente no reator bem como a idade (tempo) que o lodo permanece dentro deste é tipicamente elevada, o que reduz sua geração, e leva a possibilidade de descartar o lodo excedente diretamente para o sistema de desaguamento devido a encontrar-se adensado e digerido (CHERNICHARO *et al.*, 2018b).

## 1.2 Subprodutos gerados e seu reaproveitamento

Sistemas anaeróbios de tratamento de efluentes resultam na geração de subprodutos, como lodo e biogás. O lodo residual é considerado um resíduo semissólido, o qual requer disposição final adequada conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Além disso, a respectiva política prevê que apenas os rejeitos podem ser encaminhados para aterros sanitários, ou seja, o lodo deve passar por etapas de tratamento e recuperação viáveis economicamente, antes de ser encaminhado à destinação em aterro sanitário (VALENTE, 2015), o que representa um custo operacional significativo para as prestadoras de serviços de saneamento, principalmente devido aos custos de transporte e deposição final deste subproduto (PEDROZA *et al.*, 2010).

Por sua vez, o biogás é o subproduto resultante do processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica presente no efluente (CETESB, 2006), sendo de grande destaque a possibilidade associada de aproveitamento energético, através da geração de energia pela coleta do biogás, visto este ser um subproduto rico em metano (BRASIL, 2016).

Em geral a escolha do destino final para esses subprodutos leva em consideração alternativas locais e já disponíveis nas estações de tratamento de esgotos, como disposição em aterro sanitário ou queima do biogás (ROSA *et al.*, 2016), visto que os recursos investidos em tratamento de esgoto não abrangem soluções para seus subprodutos, negligenciando frequentemente seus destinos.

O gerenciamento do lodo é uma atividade complexa e de alto custo, que pode comprometer em partes os benefícios ambientais e sanitários de uma planta de tratamento de esgoto sanitário (ANDREOLI *et al.*, 2001), sendo que a disposição final do lodo em aterros sanitários ainda é a opção mais utilizada (BRINGHENTI *et al.*, 2018).

Apesar de ser realizado em alguns países, no Brasil a recuperação energética do metano, principal constituinte do biogás, ainda é incipiente. Grande parte dos aterros

sanitários e estações de tratamento de esgoto atualmente visam a redução de impactos ambientais evitando a emissão de gases com maior potencial de contribuir para o efeito estufa, como é o caso do metano e para isto promovem a queima do mesmo transformando-o em CO<sub>2</sub>, menos pernicioso que o metano (LOBATO, 2011).

O biogás permite duas alternativas de aproveitamento, seja através da produção de energia térmica, seja através da geração da energia elétrica (ANDREOLI *et al.*, 2003). Existe a possibilidade de associar as duas alternativas, sendo que a escolha da melhor alternativa deve considerar os fatores econômicos, sociais e ambientais (CHERNICHARO *et al.*, 2018). Ao se fazer o aproveitamento deste combustível nas estações, também se promove a redução nos custos operacionais da mesma.

Conforme resultados de medições de biogás em reatores anaeróbios do projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS), o teor médio de metano no biogás proveniente de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário varia entre 70 e 81% (BRASIL, 2016), cujo poder calorífico inferior é de aproximadamente 10 kWh/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (MORAN *et al.*, 2010). As características e composição química do biogás são os fatores que viabilizarão ou limitarão seu aproveitamento energético. Há várias técnicas disponíveis para purificação do biogás, todavia, as exigências frente à qualidade do biogás irão variar conforme sua aplicação (RASI *et al.*, 2011 apud DA SILVA, 2017).

A utilização do biogás para a secagem térmica do lodo proveniente da própria ETE é vista como uma alternativa muito interessante, posto que, leva a redução do volume e a higienização do material, conseqüentemente reduzindo custos atrelados ao transporte e destinação final do lodo, o qual também pode ser utilizado como combustível depois de seco (BRASIL, 2015).

A escolha de alternativas mais interessantes na perspectiva de gerenciamento do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto pode levar a autossuficiência energética das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) (HOUDKOVA *et al.*, 2008). Devido a mudança de paradigma, associada à sustentabilidade energética, o lodo até então caracterizado como um material passível de aterro sanitário, passar a ser visto como uma fonte energética após passar pelo tratamento e secagem, dentre as etapas de gerenciamento do lodo (COURTAUD *et al.*, 2010).

### 1.3 Definição do problema

O biogás é composto por grande concentração de gás metano ( $\text{CH}_4$ ), o qual possui potencial de aquecimento 28 vezes maior que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no que tange ao efeito estufa (IPCC, 2014 apud BRASIL, 2016), sendo este um fator preocupante que origina a necessidade de desenvolvimento de sistemas sustentáveis de tratamento de esgoto, através de gerenciamento integrado dos subprodutos gerados no processo - biogás e lodo excedente - otimizando os seus benefícios e minimizando os impactos negativos deles decorrentes (LOBATO, 2011). Alternativas que propiciem sua coleta e reaproveitamento, com objetivo de mitigar impactos ambientais e oferecer soluções energéticas sustentáveis são essenciais. Sua utilização entra em consenso com conceitos de produção mais limpa, eficiência ambiental e energética, além de promover ações para economia de baixo carbono, podendo ser utilizado para geração de energia elétrica, secagem de lodo gerado nas ETEs, ou até mesmo ser empregado como combustível veicular, industrial ou residencial (BRASIL, 2015). O interesse na produção de energia limpa, a necessidade de pesquisa referente à utilização de resíduos produzidos e a busca incessante em melhorias ambientais são os fatores que justificam estudos que propõem o uso destes subprodutos gerados em reatores UASB como fonte de energia renovável em uma ETE. Simplesmente realizar a queima do biogás antes de lançá-lo para a atmosfera ou o descarte do lodo em aterros sanitários, desperdiça o potencial energético desses subprodutos e seus eventuais benefícios econômicos, sociais e ambientais.

Nesse contexto, surge a pergunta problema: É possível realizar aproveitamento energético do lodo e biogás, subprodutos provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto doméstico estudada?

Assim, este trabalho tem como objetivo contribuir com a avaliação do potencial energético do biogás e do lodo desaguado e com o estudo de alternativas de aproveitamento energético desses subprodutos em uma ETE. Com relação aos indicadores dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), os Objetivos 7, 11, 12 e 13 são contemplados no presente trabalho visando benefícios econômicos, sociais e ambientais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Quantificar, caracterizar e avaliar o potencial energético dos subprodutos lodo e biogás gerados no tratamento de esgotos domésticos pelo reator UASB da ETE Nações em Indaial e elencar fatores técnicos, econômicos, ambientais e sociais, bem como avaliar as emissões gasosas relacionados ao processo de reaproveitamento destes subprodutos.

### **2.2 Específicos**

Estimar a produção de lodo e biogás gerados na Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário no bairro Nações em Indaial SC;

Caracterizar aspectos físico-químicos dos sub-produtos (composição, poder calorífico);

Avaliar o potencial energético do biogás gerado na ETE Nações para produzir energia elétrica para consumo próprio da estação e/ou vapor para secagem do lodo;

Elencar fatores técnicos, econômicos, ambientais e sociais para verificar a relevância ou não do aproveitamento energético destes subprodutos;

Apresentar as possibilidades de aproveitamento energético da biomassa por processos térmicos;

Avaliar as emissões gasosas durante processo térmico de combustão do lodo.

### 3 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO NA ETE NAÇÕES

#### 3.1 Introdução

O tratamento de efluentes domésticos através de reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (Reatores UASB) está tendo uma grande aplicação nas últimas décadas, principalmente em países da América Latina, com destaque para o Brasil (LOBATO, 2011; ROSA *et al.*, 2018). A notoriedade destes reatores se dá devido a simplicidade construtiva, baixo custo operacional e capacidade de suportar altas cargas orgânicas (CAMPOS, 1999).

O tratamento de efluentes através deste sistema tem resultado no incremento da geração de subprodutos como o biogás e lodo (ROSA *et al.*, 2016), os quais apresentam potenciais de aproveitamento energético, seja pelo uso individual ou combinado para a geração de energia ou calor em benefício da própria estação, conferindo maior autonomia energética e benefícios no âmbito social, ambiental e econômico (ROSA, 2013).

No cenário ambiental o aproveitamento energético do biogás e lodo leva a uma redução no potencial de poluição do meio ambiente, visto que o biogás é composto por grande concentração de gás metano (CH<sub>4</sub>), cerca de 28 vezes mais danoso que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), no que tange ao efeito estufa (COELHO *et al.*, 2006; IPCC, 2013). Assim é de interesse em eliminar este tipo de emissão atmosférica.

No que se refere ao uso do biogás, o aproveitamento energético ainda é muito incipiente no Brasil, sendo que a maioria das estações de tratamento de efluentes apenas coleta e queima este subproduto em *flare* (queimadores) (ROSA *et al.*, 2016), ocasionando emissão de gases do efeito estufa menos perniciosos que o metano.

Em reatores tratando efluentes domésticos, estes apresentam concentrações de metano (CH<sub>4</sub>) de 70 a 80% (NOYOLA *et al.*, 2006), onde o biogás com 60% de CH<sub>4</sub> apresenta um poder calorífico de 21,5 MJ.Nm<sup>-3</sup>, correspondendo a cerca de 70% do poder calorífico do gás natural (ROSA *et al.*, 2016).

Conforme Salomon e Silva Lora (2009), as principais vantagens da produção de energia elétrica pelo uso do biogás são:

1. geração descentralizada de energia, próximo da fonte consumidora;
2. possibilidade de lucro adicional devido à produção e à comercialização de energia, de acordo com as regras do sistema regulador do mercado de energia elétrica;
3. redução no consumo de eletricidade suprida externamente;
4. potencial de uso em processos para a cogeração de eletricidade e calor; e
5. redução das emissões de metano, que é um gás do efeito estufa.

Além disso, a digestão anaeróbia, como a que ocorre em Reatores UASB, configura-se como um tratamento prático para degradar e estabilizar lodo de esgoto primário, convertendo, de forma sustentável, resíduos em energia.

Sendo assim, frente à preocupação com os impactos ambientais oriundos da emissão de poluentes na atmosfera, o descarte inadequado de resíduos e diante do aumento no consumo e nos custos de energia para suprir um sistema de tratamento de efluentes, destaca-se a relevância em uma concepção e operacionalidade de estações com o intuito de maximizar eficiência energética e reduzir gastos no tratamento de esgoto (METCALF & EDDY, 2003; GOMES *et al.*, 2017).

## **3.2 Materiais e Métodos**

### **3.2.1 Local de Estudo**

A unidade-caso foi definida como a Estação de Tratamento de Esgoto Nações, integrante de um sistema de esgotamento sanitário operado pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), localizado no município de Indaial/SC. A ETE foi dimensionada para tratamento de 55 L/s, onde atualmente opera com vazão média de 23 L/s e tem passado por aumento gradual para chegar a 40 L/s desde novembro/2021.

A estação apresenta fluxograma simplificado, compreendendo unidades de tratamento preliminar (gradeamento, desarenador e caixa de gordura) e unidades de tratamento biológico, anaeróbio e aeróbio em sequência (reator UASB e biofiltro aerado submerso), conforme representado no fluxograma abaixo.

Figura 1 – Etapas de Tratamento ETE Nações



Fonte: CASAN, 2018.

O biogás gerado no reator UASB, atualmente é queimado antes de ser lançado à atmosfera, desperdiçando assim seu potencial energético. Já o lodo proveniente das descargas de fundo do reator UASB é encaminhado para uma estação elevatória de recalque e posteriormente a um filtro prensa, onde é desidratado, seguindo após para descarte em aterro sanitário.

Na Tabela a seguir são apresentadas as principais características da ETE Nações.

Tabela 1 – Características da ETE Nações

Características	Reator UASB	Biofiltro Aerado Submerso
População atendida (hab)		14.147
Vazão (L/s)	23 (55)	23 (55)
Número de Unidades	1 (2)	4 (8)
Tipo	Retangular	Retangular
Dimensões (m)	20 x 20	4 x 4
Profundidade (m)	5	3,15
Volume útil (m <sup>3</sup> )	2.000,00	50,40
Desidratação do lodo		Filtro-prensa

( ) Valores indicados entre parênteses referem-se ao final de plano

Fonte: A Autora, 2021.

### 3.2.2 Caracterização do biogás, produção de energia e emissão de metano evitada

Apesar das tomadas de decisões relacionadas ao gerenciamento e aproveitamento energético de biogás necessitarem ser pautadas em medições, estas muitas vezes não são possíveis (POSSETTI *et al.*, 2018), devido principalmente ao alto custo para aquisição dos equipamentos disponíveis no mercado para medição da produção do biogás (DUARTE *et al.*, 2018).

Diante deste fato, a produção volumétrica de biogás foi quantificada através de modelos matemáticos de estimativa, levando em consideração um período de novembro de 2020 a novembro de 2021.

Durante o período de outubro de 2021 a novembro de 2021 também foram coletadas 4 amostras de biogás em duplicata (em um intervalo de 15 dias entre cada amostra), por meio de seringas plásticas equipadas com válvulas de três vias, em um ponto anterior ao queimador de gases, onde foi posicionado um registro para realizar a mesma.

Figura 2 – Ponto de amostragem biogás e seringa utilizada para coleta



Fonte: A Autora, 2021.

Tais amostras foram encaminhadas para realização da caracterização do biogás, por meio do método de cromatografia, utilizando-se um cromatógrafo à gás com detector de

ionização por chama e condutividade térmica (cromatógrafo Shimadzu GC-FID-TCD modelo GC-17, com gás de arraste argônio), sendo determinadas as concentrações de: CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> presentes no biogás gerado no reator UASB.

A fim de se realizar caracterização quantitativa do biogás bem como análise de seu potencial energético, foi utilizado o programa computacional ProBio 1.0, pautado em um modelo matemático proposto por Lobato *et al.* (2012), para estimativa da produção de biogás em reatores UASB, que leva em consideração todas as rotas de perdas de metano dentro de um reator UASB.

Na Tabela abaixo são apresentadas as equações detalhadas que são empregadas no programa computacional, a fim de cálculo das parcelas envolvidas no balanço de massa da DQO e do potencial de recuperação de energia.

Tabela 2 – Equações empregadas no programa computacional ProBio 1.0

Parcelas	Equações	Observações
Estimativa da carga orgânica aplicada no reator	$CO = Q_{\text{méd}} \times DQO_{\text{afluente}}$ ou $CO = Pop \times QPC \times DQO_{\text{afluente}}$	CO: Carga orgânica afluente (kg.d <sup>-1</sup> ) Q <sub>méd</sub> : Vazão média de esgoto (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ) DQO <sub>afluente</sub> : concentração de DQO total afluente (KgDQO.m <sup>-3</sup> ) Pop: População contribuinte (hab) QPC: Contribuição per capita de esgoto (m <sup>3</sup> .hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> )
Estimativa da massa diária de DQO removida no sistema	$DQO_{\text{remov}} = CO \times E_{DQO}$	DQO <sub>remov</sub> : massa diária de DQO removida no sistema (kgDQO.d <sup>-1</sup> ) CO: Carga orgânica afluente (kg.d <sup>-1</sup> ) E <sub>DQO</sub> : eficiência de remoção de DQO (%)
Estimativa da massa diária de DQO utilizada pela biomassa	$DQO_{\text{lodo}} = DQO_{\text{remov}} \times Y \times K_{STV_{\text{lodo}}}$	DQO <sub>lodo</sub> : massa diária de DQO convertida em biomassa (kgDQO <sub>lodo</sub> .d <sup>-1</sup> ) YDQO: Coeficiente de produção de sólidos no sistema (kgDQO <sub>lodo</sub> .kgDQO <sub>remov</sub> <sup>-1</sup> ) K <sub>STV<sub>lodo</sub></sub> : coeficiente de produção de lodo (KgDQO <sub>lodo</sub> .KgSTV <sup>-1</sup> )
Estimativa da carga de sulfato convertida em sulfeto	$CO_{SO_4 \text{ convertida}} = Q_{\text{méd}} \times CSO_4 \times E_{SO_4}$	CO <sub>SO<sub>4</sub>convertida</sub> : carga de SO <sub>4</sub> convertida em sulfeto (kgSO <sub>4</sub> .d <sup>-1</sup> ) CSO <sub>4</sub> : concentração média de SO <sub>4</sub> no afluente (kgSO <sub>4</sub> .m <sup>-3</sup> ) E <sub>SO<sub>4</sub></sub> : eficiência de redução de sulfato (%)
Estimativa da massa diária de DQO utilizada na redução de sulfato	$DQO_{SO_4} = CO_{SO_4} \times K_{DQO-SO_4}$	DQO <sub>SO<sub>4</sub></sub> : DQO utilizada pelas BRS na redução do sulfato (kgDQO <sub>SO<sub>4</sub></sub> .d <sup>-1</sup> ) KDQO-SO <sub>4</sub> : DQO consumida na redução de sulfato - 0,667 kgDQO SO <sub>4</sub> .kgDQO SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>

(continuação)

Parcelas	Equações	Observações
Estimativa da massa diária de DQO convertida em metano	$DQO_{CH_4} = DQO_{remov} - DQO_{olodo} - DQO_{SO_4}$ $Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4} \times R \times (273 + T)}{P \times K_{CH_4} \times 1.000}$	<p><math>DQO_{CH_4}</math>: massa diária de DQO convertida em metano (<math>kgDQO_{CH_4}.d^{-1}</math>)</p> <p><math>Q_{CH_4}</math>: produção volumétrica teórica de metano (<math>m^3.d^{-1}</math>)</p> <p>R: constante dos gases (<math>0,08206 atm.L.mol^{-1}.K^{-1}</math>)</p> <p>T: temperatura operacional do reator (<math>^{\circ}C</math>)</p> <p>P = pressão atmosférica (1 atm)</p> <p><math>K_{CH_4}</math> = DQO correspondente a um mol de <math>CH_4</math> (<math>0,064 kgDQO.mol^{-1}</math>)</p>
Estimativa das perdas de metano	$Q_w = Q_{CH_4} \times p_w$ $Q_o = Q_{CH_4} \times p_o$ $Q_L = Q_{CH_4} \times p_L$	<p><math>Q_w</math>: perda de metano na fase gasosa, com o gás residual (<math>m^3.d^{-1}</math>)</p> <p><math>p_w</math>: percentual de perda de metano na fase gasosa, com o gás residual (%)</p> <p><math>Q_o</math>: outras perdas de metano na fase gasosa (<math>m^3.d^{-1}</math>)</p> <p><math>p_o</math>: percentual de outras perdas de metano na fase gasosa (%)</p> <p><math>Q_L</math>: perda de metano na fase líquida, dissolvido no efluente (<math>m^3.d^{-1}</math>)</p> <p><math>p_L</math>: perda de metano na fase líquida, dissolvido no efluente (<math>kg.m^{-3}</math>)</p>
Estimativa da produção real e normalizada de metano	$Q_{REAL CH_4} = Q_{CH_4} - Q_w - Q_o - Q_L$ $Q_N REAL CH_4 = \frac{Q_{REAL CH_4} \times 273}{273 + T}$	<p><math>Q_{REAL CH_4}</math>: produção real de <math>CH_4</math> disponível para recuperação de energia (<math>m^3.d^{-1}</math>)</p> <p><math>Q_N REAL CH_4</math>: produção normalizada real de <math>CH_4</math> disponível para recuperação de energia (<math>Nm^3.d^{-1}</math>)</p>
Estimativa da produção de biogás	$Q_{biogás} = \frac{Q_N REAL CH_4 \times 100}{C_{CH_4}}$	<p><math>Q_{biogás}</math>: produção de biogás (<math>Nm^3.d^{-1}</math>)</p> <p><math>C_{CH_4}</math>: teor de metano (<math>CH_4</math>) presente no biogás (%)</p>
Estimativa do potencial químico disponível	$PE_{REAL CH_4} = Q_N REAL CH_4 \times E_{CH_4}$	<p><math>PE_{REAL CH_4}</math>: potencial químico disponível (<math>kWh.d^{-1}</math> ou <math>MJ.Nm^{-3}</math>)</p> <p><math>E_{CH_4}</math>: energia calorífica decorrente da combustão do <math>CH_4</math> (<math>9,9 kWh.Nm^{-3}</math> ou <math>35,9 MJ.Nm^{-3}</math>)</p>
Estimativa de geração de energia elétrica e térmica	$PE_{Elétrica} = PE_{REAL CH_4} \times \eta$ $PE_{Térmica} = PE_{REAL CH_4} \times \eta$	<p><math>PE_{Elétrica}</math>: potencial de geração de energia elétrica (<math>kWh.d^{-1}</math> ou <math>MJ.Nm^{-3}</math>)</p> <p><math>PE_{Térmica}</math>: potencial de geração de energia térmica (<math>kWh.d^{-1}</math> ou <math>MJ.Nm^{-3}</math>)</p> <p><math>\eta</math>: eficiência de conversão do potencial químico disponível em energia elétrica ou térmica (%)</p>

Fonte: Adaptado de Possetti *et al.* (2021) apud Lobato *et al.* (2012).

Todavia, como são necessários muitas vezes dados nem sempre disponíveis, o ProBio 1.0 estabeleceu uma série de valores pré-determinados, retirados de literatura especializada, a fim de facilitar o processo de estimativa.

Conforme Possetti *et al.* (2021), esses valores retirados de literatura especializada são apresentados de acordo com os três cenários de estimativas considerados - os mesmos adotados por Lobato *et al.* (2012), que acarretam diferentes potenciais de aproveitamento energético, a saber:

Pior cenário: esgoto mais diluído, com maior concentração de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de  $\text{CH}_4$ , acarretando um menor potencial energético.

Melhor cenário: esgoto mais concentrado, com menor concentração de  $\text{SO}_4^{2-}$ , elevada eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de  $\text{CH}_4$ , acarretando um maior potencial energético do biogás.

Cenário típico: estimativa é realizada considerando valores intermediários entre o pior e melhor cenário.

O emprego do maior número de dados de entrada reais, obtidos durante o monitoramento da ETE estudada, leva a uma estimativa de produção de biogás com menores desvios estatísticos. Quando não foi possível a obtenção de dados, considerou-se para a avaliação, dados de entrada do cenário típico.

Em relação ao lodo, foi monitorado a taxa de produção de lodo processado, pelo período de 1 ano, entre novembro de 2020 a novembro de 2021, sendo que sua quantificação ocorreu através da pesagem das caçambas de estocagem de lodo desaguado, antes do envio para o aterro sanitário. Já os dados referentes ao custo para disposição deste resíduo no aterro foram retirados do banco de dados da CASAN.

### **3.2.2.1 Emissão de metano evitada**

A emissão de metano evitada com a recuperação de energia do biogás foi determinada pelo método do *Intergovernmental Panel on Climate Change*, que dispõe de diretrizes para inventários de gases de efeito estufa (IPCC, 2006). As equações utilizadas no cálculo são relacionadas na tabela abaixo.

Tabela 3 – Equações utilizadas no cálculo de emissão de metano evitada

Parcelas	Equações	Observações
Emissão de CH <sub>4</sub>	$ECH_4 = F_E \times (DQO_{remov} - DQO_{lodo}) - RCH_4$	<p>ECH<sub>4</sub>: emissão de metano CH<sub>4</sub> (KgCH<sub>4</sub>·d<sup>-1</sup>)</p> <p>F<sub>E</sub>: fator de emissão (0,20 KgCH<sub>4</sub>.KgDQOremov<sup>-1</sup>)</p> <p>DQOremov: massa diária de DQO removida no sistema (kgDQO.d<sup>-1</sup>)</p> <p>DQOlodo: massa diária de DQO convertida em biomassa (kgDQOlodo.d<sup>-1</sup>)</p> <p>RCH<sub>4</sub>: CH<sub>4</sub> removido no aproveitamento energético (KgCH<sub>4</sub>·d<sup>-1</sup>)</p>
Equação dos gases ideais	$P \times V = \frac{m \times R \times (T + 273)}{MM \text{ CH}_4}$	<p>P: Pressão atmosférica (1 atm)</p> <p>V: produção real normalizada de CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>)</p> <p>m: produção mássica de CH<sub>4</sub> (KgCH<sub>4</sub>·d<sup>-1</sup>)</p> <p>R: constante dos gases (0,08206 atm.L.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</p> <p>T: temperatura operacional do reator (°C)</p> <p>MM CH<sub>4</sub>: massa molecular de CH<sub>4</sub> (16 g.mol<sup>-1</sup>)</p>

Fonte: Adaptado de IPCC (2006).

### 3.2.3 Cálculo do balanço energético da ETE

O cálculo do balanço energético na ETE refere-se à diferença entre a demanda energética da estação e o potencial energético dos subprodutos gerados na mesma, biogás e lodo.

A demanda energética relaciona-se ao consumo de eletricidade para manter toda a operação do sistema, como iluminação, consumo administrativo e laboratorial, operação do filtro prensa, bombas e demais equipamentos.

Por sua vez, o potencial energético está atrelado à energia que pode ser gerada mediante o aproveitamento energético do biogás gerado na estação.

#### 3.2.3.1 Demanda energética da ETE

A maior demanda energética da estação de tratamento de esgoto Nações concentra-se na Estação Elevatória de Esgoto existente na entrada da estação de tratamento, a qual é responsável por encaminhar todo o efluente bruto que chega à estação até o tratamento preliminar da mesma.

A demanda energética da ETE foi obtida a partir de dados de consumo de energia elétrica, fornecidas através do relatório operacional de esgoto, do banco de dados operacionais da CASAN, para os meses de novembro de 2020 a novembro de 2021.

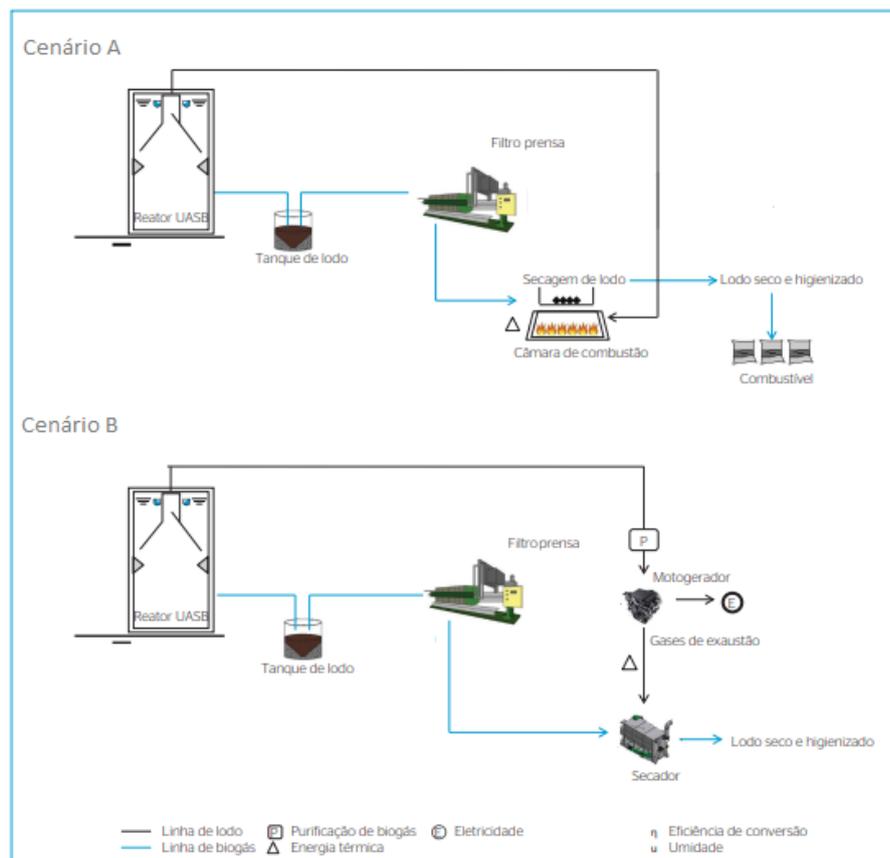
### 3.2.3.2 Potencial Energético do biogás gerado na ETE Nações e proposta de aproveitamento energético

No presente estudo foram considerados dois cenários para proposta de aproveitamento energético do biogás na ETE Nações:

Cenário A - Secagem térmica: uso prioritário do biogás em câmara de combustão, com objetivo de geração de calor para secagem térmica do lodo desidratado, pós filtro-prensa.

Cenário B - Cogeração de energia: uso prioritário do biogás em motor de combustão interna (MCI) com o objetivo de geração de eletricidade e posterior aproveitamento do calor dos gases de exaustão do motor para realizar a secagem térmica do lodo desidratado, pós filtro-prensa. O desenho esquemático de ambos os arranjos pode ser visualizado na figura abaixo.

Figura 3 – Cenários propostos para aproveitamento energético do biogás



Fonte: Adaptado de ROSA et al. (2016).

Para realizar a avaliação do potencial energético nos cenários definidos foram utilizados parâmetros obtidos mediante a caracterização do lodo e biogás, bem como realizado os cálculos apresentados na Tabela a seguir.

Tabela 4 – Cálculos utilizados para avaliação do potencial energético

Parcelas	Equações	Observações
Estimativa do potencial químico disponível	$PE_{REAL\ CH_4} = Q_N\ REAL\ CH_4 \times E_{CH_4}$	PE REAL CH <sub>4</sub> : potencial químico disponível (kWh·d <sup>-1</sup> ou MJ·Nm <sup>-3</sup> ) E <sub>CH<sub>4</sub></sub> : energia calorífica decorrente da combustão do CH <sub>4</sub> (9,9 kWh·Nm <sup>-3</sup> ou 35,9 MJ·Nm <sup>-3</sup> )
Estimativa de geração de energia elétrica e térmica	$PE\ Elétrica = PE\ REAL\ CH_4 \times \eta$ $PE\ Térmica = PE\ REAL\ CH_4 \times \eta$	PE Elétrica: energia elétrica (kWh·d <sup>-1</sup> ou MJ·Nm <sup>-3</sup> ) PE Térmica: energia térmica (kWh·d <sup>-1</sup> ou MJ·Nm <sup>-3</sup> ) η: eficiência de conversão do potencial químico disponível em energia elétrica ou térmica (%)
Potência Elétrica Instalada	$P = PE\ Elétrica \div H$	P: potência elétrica instalada (kW) H: Regime de geração de energia (h)
Energia Elétrica anual gerada	$E\ El_{ano} = (PE\ Elétrica \times FC \times 365\ dias) \div 1000$	E Elétrica ano: Energia elétrica anual gerada (Kw/h.ano <sup>-1</sup> ) FC = Fator de capacidade ao longo do ano referente ao número de horas do ano em operação descontado pausas para manutenção
Autossuprimento energética da ETE	$A = (E\ El_{ano} \div E\ Cons_{ano}) \times 100$	A: Autossuprimento energético da estação (%) E Cons <sub>ano</sub> : Energia elétrica média consumida (kWh.ano <sup>-1</sup> )
Volume de água no lodo pós-centrifuga	$V_{água} = V_{lodo} \times U_{lodo}$	V <sub>água</sub> : Volume de água no lodo, pós-centrifuga (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ) V <sub>lodo</sub> : Volume de lodo, pós-centrifuga (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ) U <sub>lodo</sub> : Teor de umidade no lodo pós-centrifuga (%)
Volume de água removida no lodo pós-secagem	$V_{água\ remov} = PE\ Térmica \div E\ evap$	V <sub>água remov</sub> : Volume de água removida no lodo pós-secagem (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ) E evap: Energia necessária para evaporar 1m <sup>3</sup> de água
Umidade do lodo pós-secagem	$U_{lodo\ seco} = (V_{água} - V_{água\ remov}) \div V_{água}$	U <sub>lodo seco</sub> : Teor de umidade do lodo pós-secagem (%)
Volume de lodo pós-secagem	$V_{lodo\ seco} = V_{lodo} \times V_{relativo}$	V <sub>lodo seco</sub> : Volume de lodo seco, pós-secagem (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ) V <sub>relativo</sub> : Constante definida a partir da umidade do lodo
Massa de lodo anual evitada para aterro	$V_{evitado} = ((V_{lodo} - V_{lodoseco}) \times \rho_{lodo} \times 365) \div 1000$	V <sub>evitado</sub> : Volume de lodo evitado (t.ano <sup>-1</sup> ) ρ <sub>lodo</sub> : densidade do lodo (kg.m <sup>-3</sup> )

Fonte: Adaptado de Valente, 2015.

### 3.3 Resultados e Discussão

#### 3.3.1 Análise quantitativa e qualitativa do biogás da ETE Nações

A partir do tratamento e da análise estatística dos dados coletados no período mensurado, foi possível definir a vazão média de esgoto afluyente no período analisado, resultado em uma vazão média de 23,93 L/s, com uma Demanda Química de Oxigênio afluyente média de 515 mg/L. Os resultados da análise estatística realizada podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 – Estatística descritiva dos dados de monitoramento da Estação de Tratamento de Esgoto ETE Nações

Parcelas	Unidade	N dados	Média	Mediana	Mínimo	Máximo
População contribuinte	hab		14.147			
Contribuição per capita	$m^3 \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1}$	12	0,1497	0,1452	0,1009	0,2309
Vazão de Esgoto	$(m^3 \cdot d^{-1})$	12	2.067,60	2.009,76	1.398,48	3.144,96
DQO afluyente	$(mg \cdot L^{-1})$	12	515,00	481,00	290,00	802,00
DQO efluyente UASB	$(mg \cdot L^{-1})$	12	146,58	129,50	78,00	325,00
Eficiência remoção DQO	%	12	70,26	71,37	49,31	84,95
DBO afluyente	$(mg \cdot L^{-1})$	12	229,74	248,05	128,50	306,15
DBO efluyente	$(mg \cdot L^{-1})$	12	27,55	25,96	16,50	42,81
Sulfato afluyente	$(mg \cdot L^{-1})$	12	44,48	40,08	26,00	80,00
pH UASB	pH a 25°C	14	7,09	7,04	6,62	7,63
Temperatura Reator	°C	14	23,93	23,68	20,85	27,25

Fonte: Elaboração da Autora, 2021.

Em relação a caracterização do biogás pode-se observar na Tabela 6, que a concentração média de metano no biogás foi de 85,32 %, indicando que esta se encontra na situação típica para reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico (LOBATO, 2011), tendo atingido também concentrações consideradas como sendo a melhor situação. As concentrações de dióxido de carbono e oxigênio também se encontram dentro da composição volumétrica típica encontrada em biogás produzido em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico.

Tabela 6 – Composição do biogás da Estação de Tratamento de Esgoto ETE Nações

Parcelas	Unidade	N dados	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Situação Típica
CH <sub>4</sub>	%	4	85,32	85,90	79,03	90,46	60 a 85 (Lobato, 2011).
CO <sub>2</sub>	%	4	8,86	8,99	7,77	9,67	5 a 15 (Lobato, 2011).
O <sub>2</sub>	%	4	n.d.*	n.d.*	n.d.*	n.d.*	Traços (Lobato, 2011).
N <sub>2</sub>	%	4	n.d.*	n.d.*	n.d.*	n.d.*	10 a 25** (Lobato, 2011).

\*n.d. – não identificado

\*\* elevada fração de nitrogênio no biogás de reatores anaeróbios quando ocorre deve-se ao N<sub>2</sub> dissolvido no esgoto doméstico

Fonte: Elaboração da Autora, 2021.

Para a estimativa da produção de biogás média utilizando o programa computacional ProBio 1.0 foram lançados como dados de entrada os dados obtidos na ETE, apresentados na Tabela anterior. Para as informações em que não havia dados de entrada reais foram utilizados valores default do programa computacional, retirados de literatura especializada, considerando o cenário típico.

Conforme os dados obtidos a campo de Eficiência de remoção de DQO ( $E_{DQO}$ ), concentração de sulfato no afluente ( $SO_4^{2-}$ ) e teor de metano no biogás (C CH<sub>4</sub>), a ETE se enquadrou no cenário considerado “melhor” dentre os citados anteriormente, segundo os dados do modelo matemático. Desta maneira, realizou-se a análise no programa considerando este cenário para os valores default do programa computacional. Todos os dados de entrada e valores default utilizados no programa computacional estão descritos na tabela a seguir.

Tabela 7 - Dados de entrada e valores considerados para cálculo do potencial energético

Parâmetros	Unidade	Cenários			Referências
		Pior	Típico	Melhor	
População contribuinte (Pop)	hab	14.147			Casan (2021)
Contribuição per capita de esgoto (QPC)	L · hab <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup>	149,70			Casan (2021)
Vazão média de esgoto (Qméd)	m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup>	2.117,80			Casan (2021)
Concentração de DQO afluente (DQOafluente)	kgDQO · m <sup>-3</sup>	0,515			Casan (2021)
Eficiência esperada de remoção de DQO (EDQO)	%	70,26			Casan (2021)
Concentração de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> no afluente (C SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) para valores de DQO elevadas (> 500mg · L <sup>-1</sup> )	kg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> · m <sup>-3</sup>	0,08	0,06	0,04	Singh & Viraghavan (1996); Glória et al. (2008); Metcalf & Eddy (2016)
Concentração de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> no afluente (C SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	kg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> · m <sup>-3</sup>	0,044			Casan (2021)
Eficiência de redução de sulfato (E SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	%	80	75	70	Souza (2010)
Coefficiente de produção de sólidos (Y)	kgSTV · kgDQOrem <sup>-1</sup>	0,25	0,20	0,15	Lobato (2011); Andreoli et al. (2001); Lobato et al. (2018)

(continuação)

Parâmetros	Unidade	Cenários			Referências
		Pior	Típico	Melhor	
Coefficiente de produção de lodo (K <sub>STV-DQO</sub> )	kgDQO/lodo·kgSTV <sup>-1</sup>	1,42			Hoover & Porges (1952)
Temperatura operacional do reator (T)	°C	23,93			Casan (2021)
Perda de CH <sub>4</sub> dissolvido no efluente tratado (pL)	%	40	30	20	Singh et al. (1996); Souza & Chernicharo (2011); Paula (2019)
Perda de CH <sub>4</sub> na fase gasosa com o gás residual (pw)	%	7,5	5,0	2,5	Souza & Chernicharo (2011)
Outras perdas de CH <sub>4</sub> na fase gasosa (po)	%	7,5	5,0	2,5	Souza & Chernicharo (2011)
Teor de CH <sub>4</sub> no biogás (C CH <sub>4</sub> )	%	85,32			Autora (2021)

Fonte: Adaptado de Possetti *et al.* (2021)

Após análise no programa computacional, obteve-se os seguintes resultados.

Tabela 8– Valores de produção de metano apresentados no programa computacional para a ETE Nações

Parâmetros	Unidade	Resultado
Produção normalizada de biogás	Nm <sup>3</sup> /d	172,05
Produção normalizada de metano	Nm <sup>3</sup> /d	146,80
Energia química disponível	kWh/d	1.462,06

Fonte: Elaboração da Autora, 2021.

Com base nas relações unitárias e modelo matemático proposto por Lobato (2011), foi possível correlacionar as relações volumétricas e energéticas unitárias resultantes do programa computacional.

Tabela 9 – Resultados apresentados no programa computacional para a ETE Nações

Parâmetros	Unidade	Pior situação	Situação típica	Melhor situação	ProBio 1.0
Volume de metano produzido	NL/hab.d	6,8	10,2	13,7	10,37
	Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> esgoto tratado	0,0422	0,0642	0,0813	0,07
	Nm <sup>3</sup> /kgDQO remov.	0,1134	0,1583	0,196	0,19
Volume de biogás	NL/hab.d	9,8	13,6	17,1	12,16
	Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> esgoto tratado	0,0603	0,0856	0,1016	0,08
	Nm <sup>3</sup> /kgDQO remov.	0,162	0,2111	0,245	0,22
Energia produzida	kWh/m <sup>3</sup> esgoto tratado	0,4	0,6	0,8	0,7
	kWh/kgDQO removida	1,1	1,6	2,0	1,90
	kWh/hab.d	0,068	0,1019	0,1364	0,10
	KWh/hab.ano	24,9	37,2	49,8	36,5

Fonte: Adaptado de Lobato, 2011.

Nota-se que as relações unitárias obtidas através do programa computacional se encontram próximas as relações unitárias da situação típica (LOBATO, 2011), indicando que a ETE apresenta uma boa conversão de DQO em biogás, porém também indica que a estação possui condição de aumentar um pouco mais seu potencial de geração de biogás, a fim de atingir a melhor situação. O valor teórico de geração de biogás esperado para a ETE, considerando a situação típica no modelo matemático e a relação unitária de volume de biogás por vazão de esgoto, foi de 181,28 Nm<sup>3</sup>/d enquanto no programa computacional foi de 172,05 Nm<sup>3</sup>/d.

### 3.3.2 Emissão de Gases do Efeito Estufa evitada

Para o cálculo da emissão de metano evitada na ETE Nações através do reaproveitamento energético do biogás, foram utilizadas as equações relacionadas com a emissão de metano apresentadas na tabela 3, e os dados obtidos durante a caracterização do biogás, por meio de cálculos no programa computacional Pro Bio 1.0.

Tabela 10 – Resultado das variáveis calculadas e emissão de metano evitada

Parâmetros	Unidade	Valores Obtidos
Produção real normalizada de metano	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	146,80
Massa de DQO removida no sistema (DQOremov)	KgDQOremov.d <sup>-1</sup>	766,30
Massa de DQO convertida em biomassa (DQOloado)	KgDQOloado.d <sup>-1</sup>	163,20
CH <sub>4</sub> removido no aproveitamento energético (RCH <sub>4</sub> )	KgCH <sub>4</sub> .d <sup>-1</sup>	96,40
Emissão total de CH <sub>4</sub> (ECH <sub>4</sub> sem recuperação do biogás)	KgCH <sub>4</sub> .d <sup>-1</sup>	120,62
Emissão total de CH <sub>4</sub> (ECH <sub>4</sub> com recuperação do biogás)	KgCH <sub>4</sub> .d <sup>-1</sup>	24,22

Fonte: Elaboração da Autora, 2021.

Verificou-se que a emissão evitada de metano através de implantação de sistema de recuperação energética seria de 96,40 KgCH<sub>4</sub>/d. Sendo assim, a recuperação energética do biogás produzido na ETE é capaz de reduzir a emissão de metano (atualmente queimado em *flare*) de 120,62 KgCH<sub>4</sub>/d para 24,22 KgCH<sub>4</sub>/d, ou seja, redução de aproximadamente 80%.

Além disso, através de cálculo estequiométrico da reação de combustão do metano ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ), sabe-se que 16g CH<sub>4</sub>/mol são consumidos enquanto 44g CO<sub>2</sub>/mol são liberados. Assim, estimasse que a combustão de 96,40 KgCH<sub>4</sub>/d (RCH<sub>4</sub>), resulte na formação de massa de CO<sub>2</sub> de 265,10 kgCO<sub>2</sub>/d.

Tendo o conhecimento que o aproveitamento energético do biogás promove a redução de emissão de gases do efeito estufa (GEEs), visto que a combustão do CH<sub>4</sub> para produzir energia pode reduzir a tonelada de CO<sub>2</sub> lançado para a atmosfera e que o potencial de aquecimento global do CH<sub>4</sub> é 21 vezes superior ao CO<sub>2</sub> (IPCC, 2013), pode-se verificar que a massa de CO<sub>2</sub> que corresponde à emissão evitada de metano seria de 2024,40 kgCO<sub>2</sub>/d.

Tem-se assim que a redução estimada na emissão de GEEs seria de 1759,30 kgCO<sub>2</sub>/d ou 642,14 ton/ano (subtraindo-se do valor anterior a massa de CO<sub>2</sub> formada durante a reação de combustão do metano).

Nota-se então que o aproveitamento do biogás na ETE representa um benefício ambiental, que vem de encontro com a mitigação de emissões originárias da decomposição da matéria orgânica presente no esgoto bruto e que contribuem para o efeito estufa.

### 3.3.3 Estimativa do potencial energético do biogás da ETE Nações

Os dados de entrada utilizados para estimativa do potencial energético estão apresentados na Tabela abaixo.

A estimativa do potencial energético indicou resultados positivos para ambos os cenários, sugerindo desta forma a necessidade de estudos mais detalhados com fornecedores de equipamentos para aproveitamento energético.

Tabela 11 – Parâmetros utilizados na avaliação do potencial energético

Parâmetro	Notação	Unidade	Valor	Fonte
Potencial Calorífico inferior metano	PCI <sub>CH4</sub>	KWh.m <sup>-3</sup>	9,96	Valente (2015)
Teor de CH <sub>4</sub> no biogás	C <sub>CH4</sub>	%	85,32	Autor
Eficiência de conversão - secagem térmica	η	%	85	Valente (2015)
Eficiência de conversão - cogeração	η	%	39	Valente (2015)
Energia necessária para evaporar 1m <sup>3</sup> de água	E <sub>evap</sub>	kWh.m <sup>-3</sup> H <sub>2</sub> O	1000	Valente (2015)
Regime de geração	H	h	24	Adotado
Fator de Capacidade anual	FC	%	90	Adotado
V relativo	V <sub>relativo</sub>	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	0,38	Andreoli <i>et al.</i> (2001)
Energia consumida na ETE	E <sub>ETE</sub>	MWh.ano <sup>-1</sup>	173,25	Casan (2021)
Custo transporte e disposição lodo	T <sub>lodo</sub>	R\$.t	745,88	Casan (2021)
Custo médio energia e impostos	T <sub>el</sub>	R\$.Kwh <sup>-1</sup>	0,79	Casan (2021)
Teor de sólidos secos (pós-centrífuga)	TS <sub>lodo</sub>	%	36,15	Autor
Teor de umidade lodo (pós-centrífuga)	U <sub>lodo</sub>	%	63,85	Autor
Densidade do lodo	ρ	Kg.m <sup>-3</sup>	1050	Valente (2015)

Fonte: Elaboração da Autora, 2021.

No caso do cenário A, que prevê exclusivamente a secagem térmica do lodo gerado na estação, seria possível realizar a secagem térmica de 100% do volume de lodo gerado na estação. Com essa secagem, seria possível obter um lodo com umidade final de 10% e a redução da massa de lodo a ser enviada para aterro seria de 63,5%. Isto resultaria em uma economia com transporte e disposição de lodo em aterro de R\$ 29.551,06 ao ano.

Em relação ao cenário B, que leva em consideração a cogeração, ter-se-ia um autossuprimento de aproximadamente 83,17% da energia elétrica, o que representaria uma economia anual de R\$ 113.827,86. Além disso, com o aproveitamento dos gases de exaustão do motor de combustão interna, seria possível secar todo o volume de lodo gerado na estação, até obter uma umidade final de 10%, e conseqüentemente também reduziria a massa de lodo a ser enviada para aterro em 63,5%. Gerando uma economia total de R\$ 143.378,92 ao ano.

Cabe destacar, que ao realizar-se a secagem térmica do lodo processado no filtro-prensa, além de reduzir os custos para disposição final, obtêm-se maior controle sanitário deste subproduto, possibilitando inclusive a utilização deste como um bio-sólido ou fertilizante agrícola, podendo evitar seu envio para aterro industrial e gerar receita para a companhia. O comparativo entre os cenários propostos pode ser visualizado na tabela abaixo.

Tabela 12 – Estimativa do potencial energético na ETE Nações

Parâmetros	Unidade	Cenário A Secagem Térmica	Cenário B Cogeração
<b>Geração de Energia na ETE Nações</b>			
Produção diária média normalizada de Biogás	Nm <sup>3</sup> /dia	172,05	172,05
Energia Disponível no Biogás	kWh/dia	1.462,06	1.462,06
Regime de Geração	h/dia	---	12
Eficiência Elétrica Considerada para o Moto Gerador	%	---	0,30
Potência Elétrica Instalada	kW	---	36,55
Geração Anual de Energia Elétrica com o Biogás	MWh/ano	---	144,09
Eletricidade Consumida pelo Secador Térmico	MWh/ano		
Energia Anual consumida na ETE Nações	MWh/ano	173,25	173,25
Autossuprimento Energético	%	---	83,17
<b>Secagem térmica do lodo gerado</b>			
Volume de Lodo Gerado na Estação (pós - filtro prensa)	m <sup>3</sup> /dia	0,16	0,16
Massa de Lodo Gerado na Estação (pós - filtro prensa)	t/dia	0,17	0,17
Massa de Lodo Gerado na Estação (pós - filtro prensa)	t/ano	62,40	62,40
Rendimento térmico do queimador	%	---	39
Volume de Lodo Gerado na Estação (pós - secagem)	m <sup>3</sup> /ano	17,83	17,83
Sólidos Totais no Lodo (pós - secagem)	%	90	90
Massa de Lodo evitado para aterro	ton/ano	39,62	39,62
Redução de massa de lodo destinado ao aterro no ano	%	63,5	63,5
<b>Análise preliminar dos cenários propostos</b>			
Cenários Propostos	Unidade	Secagem Térmica	Cogeração
Economia em relação ao consumo de energia elétrica atual	R\$/ano	---	113.827,86
Economia em relação ao transporte e disposição de lodo no aterro	R\$/ano	29.551,06	29.551,06
Economia Total Anual	R\$/ano	29.551,06	143.378,92

Fonte: Elaboração da Autora, 2021.

### 3.4 Conclusão

Pode-se concluir que o quantitativo de biogás teórico gerado na ETE Nações se enquadra na situação típica para reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, obtendo-se valores similares tanto no programa computacional quanto no modelo matemático proposto por Lobato. O que também indica a necessidade de instalação de um medidor de vazão de gás, caso se objetive o aproveitamento energético do mesmo, a fim de monitorar a geração em tempo real deste sub-produto.

A concentração de metano no biogás da ETE Nações também se encontra dentro dos valores típicos reportados, todavia apresentou uma concentração considerada na melhor situação com uma média de 85%, indicando que ocorre uma boa conversão da demanda química de oxigênio em metano no reator UASB da estação. As concentrações dos demais gases também se encontram dentro dos valores típicos para reatores UASB tratando esgoto doméstico, sendo útil o monitoramento de gás sulfídrico (não realizado neste trabalho) para análise da necessidade de tratamento de gases, caso se deseje realizar seu aproveitamento.

No que tange a avaliação do potencial energético, ambos cenários apresentaram uma economia em relação aos custos operacionais da estação, com destaque para o cenário B, no qual apresentou uma maior redução de custos com energia elétrica e destinação final de lodo desaguado.

O biogás gerado na ETE apresentou um potencial energético de 1.462,06 KWh/dia, e sua utilização através de um sistema de cogeração, apresentado no cenário B, resultaria na geração de 144,09 MWh/ano, levando a um autossuprimento energético de 83,17%, e conseqüentemente uma economia em relação ao consumo de energia elétrica de R\$ 113.827,86 ao ano (considerando o valor de R\$ 0,79 por KWh).

Além disso, devido ao processo de cogeração, seria passível realizar a secagem do lodo gerado na estação, reduzindo assim o volume a ser transportado e disposto em aterro, levando a uma economia de R\$ 29.551,06 ao ano. Assim, o cenário de aproveitamento energético do biogás, poderia levar a uma economia total anual de R\$ 143.378,92.

A análise das emissões de gases evitados devido ao aproveitamento energético do biogás, propiciaram resultados de CO<sub>2</sub> eq evitado de 642,14 toneladas ao ano. Esta emissão evitada, além de representar um benefício ambiental efetivo, vem ao encontro com a redução de gases do efeito estufa e pode proporcionar ainda geração de créditos de carbono na planta de aproveitamento energético do biogás, que resultam em certificados de

emissões evitadas, os quais podem ser utilizados dentro da própria companhia por meio de estratégias de sustentabilidade, projetos de impacto socioambiental, valorização de imagem e engajamento de acionistas; ou atrelar o valor comercial existente (cada tonelada de CO<sub>2</sub> não emitida a atmosfera ou reduzida, gera um crédito de carbono). Toda essa ação vem de encontro com benefícios sociais, somado aos ambientais, posto que, geralmente os recursos obtidos com a comercialização de créditos de carbono ou redução de emissão voluntária, acabam sendo investidos em desenvolvimento para a comunidade local.

Por fim, as características do biogás gerado na ETE Nações, indicam que há potencial para aproveitamento energético deste, sugerindo assim a necessidade de estudos mais detalhados simulando a geração de energia elétrica e secagem térmica do lodo, e principalmente avaliação dos custos envolvidos para realizar a implantação de tecnologias para aproveitamento energético do biogás. Tais estudos forneceriam maiores subsídios para análise de viabilidade econômica e ambiental em relação ao aproveitamento energético, permitindo definir a melhor alternativa dentre os cenários propostos.

## **4 ESTUDO DAS POSSIBILIDADES DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA BIOMASSA E AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS**

### **4.1 Introdução**

O gerenciamento do lodo de estações de tratamento de efluente é um problema atual devido a grande quantidade gerada deste resíduo por dia. A administração e o gerenciamento deste resíduo estão inclusive contido na Agenda 21 estabelecida na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992, demonstrando a grande importância social, econômica e ambiental do gerenciamento do lodo das ETEs (LEE & SANTOS, 2011).

A busca por alternativas viáveis para disposição final do lodo retrata uma necessidade, devendo-se buscar formas de minimização da produção, maximização do reuso e reciclagem e promoção do tratamento e disposição final ambientalmente adequada (ANDREOLLI, 2006).

Dentre algumas alternativas de aproveitamento e disposição final deste resíduo pode-se citar a disposição em aterros sanitários (alternativa comumente utilizada); o reuso industrial (fabricação de tijolos, produção de cimento); a incineração; a recuperação de solos (recuperação de áreas degradadas e de mineração) e o uso agrícola e florestal (compostagem, fertilizante e solo sintético) (LAZZARI, 2018).

Além das alternativas citadas, o lodo de esgoto tem sido objeto de estudos para utilização da biomassa com fonte de energia renovável, uma vez que possui propriedades de combustível, semelhantes às principais biomassas já utilizadas para este fim, como os resíduos agrícolas e de madeiras (COUTO *et al.*, 2004).

As tecnologias para conversão desta biomassa em fonte de energia e consequente aproveitamento da biomassa, se apresentam através da queima do lodo por meio dos processos térmicos de combustão direta ou processos termoquímicos de gaseificação e pirólise da biomassa (ADÃO, 2006; WERLE & WILK, 2010), proporcionando a minimização de impactos ambientais por meio da destinação final adequada e trazendo vantagens econômicas na produção de calor, eletricidade e até mesmo biocombustíveis.

A combustão é um dos métodos mais antigos para produção de energia. Atualmente a maior parcela da energia consumida no mundo, cerca de 85%, é proveniente do processo de combustão (VAMVUKA & ZOGRAFOS, 2004). Além disso, trata-se de um processo que apresenta maior simplicidade operacional, menores exigências para preparo do lodo e possibilidade de aplicação em ETEs de diferentes portes (ROSA *et al.*, 2015).

Esse processo se configura por uma reação exotérmica muito rápida entre o combustível e oxidante, acompanhada da liberação de calor. Normalmente o carbono, hidrogênio e enxofre são os elementos químicos responsáveis pela liberação do calor, sendo que quando ocorre a oxidação completa da fração orgânica destes combustíveis a gases, está ocorrendo a denominada combustão completa (DE CARVALHO & MCQUAY, 2007).

Por sua vez, a gaseificação é uma série de processos químicos e térmicos sequenciais, ocorrendo em atmosfera com quantidade de oxigênio reduzida e temperatura aproximada de 1000°C, em que o conteúdo de carbono do lodo é transformado em gases combustíveis e cinzas (BATISTELLA, 2015). Quando utilizado este processo para geração de eletricidade e calor, assimila-se muito tecnicamente ao processo de combustão direta devido ao uso do gás de síntese (*syngas*), que é possível de ser reaproveitado nas dependências da ETE (ROSA *et al.*, 2015).

Já a pirólise é mais simples e um antigo processo de conversão de um combustível, usualmente lenha, em outro de melhor qualidade e energia, como o carvão. Consiste em um processo de aquecimento do material inicial, na quase ausência de ar, até ocorrer a retirada do material volátil, gerando um produto com densidade energética duas vezes maior do material inicial (ANEEL, 2005). Dependendo das condições no qual ocorre a pirólise, há formação de três produtos: líquido (líquido da pirólise ou alcatrão/bioóleo constituído na fase oleosa); sólido (um carvão vegetal de biomassa) e gás (mistura de gases, nos quais se destacam o CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>) (SANTOS, 2012).

Em reatores UASB, o descarte de lodo deve ser realizado periodicamente a fim de evitar seu acúmulo no reator e ocasionar perda excessiva de sólidos, e embora este já se encontre estabilizado, é necessário realizar etapas de desidratação, ou até mesmo higienização para fins agrícolas, devido a presença de patógenos. Diante disto, a secagem térmica do lodo surge como uma alternativa para se alcançar a redução de umidade deste subproduto, reduzindo os custos de transporte e destinação final, além de possibilitar complementarmente a higienização do mesmo. Além disso, pode-se estar utilizando como

combustível para a secagem térmica, o biogás proveniente da recuperação energética de processos anaeróbios, corroborando ainda mais na redução de custos operacionais (LOBATO,2011).

Apesar da biomassa ser considerada a melhor alternativa sustentável para substituição de combustíveis fósseis no setor energético, ela apresenta diversos impactos ambientais que devem ser considerados. Um dos principais impactos negativos está relacionado à poluição atmosférica através das emissões gasosas geradas durante a queima da biomassa nos processos de combustão, gaseificação e pirólise (SANTOS, 2012).

Os poluentes emitidos durante o processo de combustão da biomassa, estão relacionadas com suas propriedades, sendo que os poluentes passíveis de serem formados durante a queima de qualquer combustível orgânico são: materiais particulados (fumaça, fuligem e cinzas); óxidos de enxofre ( $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ ); monóxido de carbono (CO); dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e óxidos de nitrogênio (NO,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NO}_2$ ) (GARCIA, 2002).

## **4.2 Materiais e Métodos**

### **4.2.1 Área de Estudo**

As amostras de biomassa estudadas, foram obtidas na Estação de Tratamento de Esgoto Nações, na cidade de Indaial – SC.

Trata-se de lodo produzido durante o tratamento anaeróbio por Reator UASB, que passa por um sistema de desidratação em filtro prensa, antes de ser encaminhado ao aterro sanitário, disposição final utilizada atualmente, conforme mostrado na Figura 1. A Figura 4 mostra o filtro-prensa, última etapa no tratamento do lodo gerado na ETE Nações.

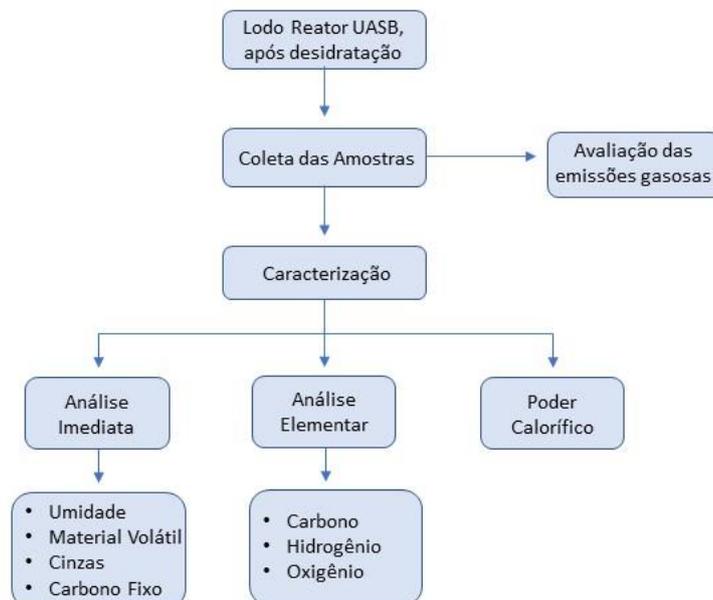
Figura 4 – Filtro prensa da ETE Nações



Fonte: A Autora, 2021.

A Figura 5 abaixo, apresenta o fluxograma das etapas empregadas para a caracterização do lodo proveniente do tratamento de esgoto doméstico. As etapas foram descritas na sequência.

Figura 5 – Fluxograma das etapas para caracterização do lodo



Fonte: Elaboração da Autora, 2022.

#### 4.2.2 Coleta das amostras e Caracterização do lodo

A taxa de produção de lodo processado, foi monitorada pelo período de 1 ano, entre novembro de 2020 a novembro de 2021. A quantificação do lodo ocorreu através da pesagem das caçambas de estocagem de lodo desaguado, antes do envio para o aterro sanitário.

Para a caracterização do lodo foi realizado nos meses de novembro e dezembro de 2021 e janeiro de 2022, foram coletados pedaços de placas de lodo desidratado no filtro prensa, os quais foram misturadas para a realização das análises de interesse: análise imediata, análise elementar e poder calorífico superior. Além disto foi analisado a emissão gasosa e de materiais particulados provenientes da queima do lodo.

A coleta de uma amostra representativa do lodo estudado foi efetuada conforme descreve a norma ABNT NBR 10007/2004 (Amostragem de resíduos sólidos). O amostrador utilizado para coleta das amostras foi uma pá tipo jardineiro e o recipiente para o acondicionamento da amostra foram sacos plásticos.

Figura 6 – Coleta e amostragem lodo de esgoto



Fonte: A Autora, 2021.

De acordo com a norma ABNT NBR 10004, o lodo proveniente do tratamento de esgoto doméstico é um resíduo não perigoso, pertencente a classe IIA. Para amostragem foram usados equipamentos de proteção individual, de tal forma que se evite contaminação por patógenos e/ou contaminantes que podem estar presentes no lodo.

### 4.2.3 Análise Imediata

A determinação da umidade foi realizada com uso do equipamento Analisador de Umidade Halógeno (modelo ID200, marca MARTE), conforme os procedimentos estabelecidos no manual de instruções do equipamento, sendo a secagem realizada em uma temperatura de 105 °C por 60 min. Após esse tempo e com a massa da amostra constante, o equipamento apresentava na tela o teor de umidade da amostra que estava em análise.

Figura 7 – Analisador de Umidade Halógeno



Fonte: A autora, 2021.

As demais composições imediatas foram determinadas por laboratório externo, através das metodologias descritas abaixo.

Quadro 1 – Metodologias para análise imediata

Parâmetros	Unidade Medida	Metodologia
Cinzas (STF)	%	SMEWW, 23ª Edição, Método 2540 B e E
Sólidos totais voláteis	%	SMEWW, 23ª Edição, Método 2540 B e E

Fonte: Elaboração da Autora, 2021.

Como a determinação do teor de carbono fixo é uma medida indireta, inicialmente obteve-se o percentual de material volátil e de cinzas da amostra, determinando-se em seguida o teor de Carbono Fixo a partir da Equação abaixo:

$$CF = 100 - (MV + TC)$$

Onde:

MV - Percentual de material volátil

TC - Percentual de cinzas

#### 4.2.4 Análise Elementar

A composição elementar do lodo, que determina a porcentagem da massa que representa um elemento químico foi obtida por meio de correlações com a análise imediata encontradas na literatura de Parikh (2007) utilizando-se as fórmulas abaixo, posto que não havia equipamentos disponíveis para realização destas análises de forma experimental.

$$C (\%) = 0,637(CF) + 0,455(MV)$$

$$H (\%) = 0,052(CF) + 0,062(MV)$$

$$O (\%) = 0,304(CF) + 0,476(MV)$$

Onde:

C - Percentual de carbono

H - Percentual de hidrogênio

O - Percentual de Oxigênio

CF - Percentual de carbono fixo

MV - Percentual de material volátil

#### 4.2.5 Poder Calorífico Superior e Potencial Energético

A determinação experimental do poder calorífico superior em resíduo foi realizada por laboratório externo em uma amostra, através da metodologia descrita abaixo, a qual fez uso de uma bomba calorimétrica para determinação do calor de combustão do resíduo.

Quadro 2 – Metodologia Ensaio PCS

Parâmetros	Unidade Medida	Metodologia
Poder Calorífico Superior (PCS)	MJ/Kg	ASTM D-240

Fonte: Elaboração da Autora, 2021.

Além disso, a fim de obter maiores informações a respeito do poder calorífico superior do lodo, realizou-se a determinação do poder calorífico por meio de correlação com a análise imediata do lodo. Utilizou-se a equação desenvolvida por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005), na qual considerou 450 tipos de biomassa e obteve erro absoluto de 3,74%.

$$PCS = (0,3536 \times CF) + (0,1559 \times MV) - (0,0078 \times TC)$$

Onde:

PCS - Poder calorífico superior (MJ/Kg)

MV - Percentual de material volátil (%)

CF - Percentual de carbono fixo (%)

TC - Percentual de cinzas (%)

Para avaliação do potencial energético do lodo, verificou-se a quantidade de lodo desidratado gerado na estação pelo período de um ano, através das pesagens das caçambas e aplicou-se os resultados obtidos na seguinte equação, que fornece então o valor do potencial energético em MJ/ano.

$$PE \text{ lodo} = P \text{ lodo} \times PCI$$

Onde:

PE lodo - Potencial energético do lodo (MJ/ano)

P lodo - Produção de lodo desidratado (Kg/ano)

PCI - Poder calorífico inferior do lodo (MJ/kg)

Normalmente, o poder calorífico superior é em média 10% maior que o poder calorífico inferior, e isto depende do teor de hidrogênio contido no combustível (PADILHA *et.al*, 2019). Como o cálculo do potencial energético leva em consideração o poder calorífico inferior, e não o superior (obtido de maneira experimental), torna-se necessário conhecer o PCI da amostra.

O valor do poder calorífico inferior pode ser calculado segundo a equação de Kollmann (1968) apud Souza (2010), o qual correlaciona o PCI, com o PCS e percentual de H contido na amostra.

$$PCI = PCS - ((600 \times 9.H) / 100)$$

Onde:

PCI - Poder calorífico inferior do lodo (Kcal/Kg)

PCS - Poder calorífico superior do lodo (Kcal/Kg)

H - Teor de hidrogênio (%)

#### **4.2.6 Avaliação das emissões gasosas e materiais particulados**

Para determinação dos gases gerados na queima da biomassa, 20 g de amostra de lodo processado no filtro-prensa foram secas através de radiação infravermelha a 105°C até massa constante. As amostras secas foram colocadas em cadinho de porcelana e levadas em forno mufla, da marca QUIMIS modelo Q318M25T, para serem queimadas a 530°C por 20 minutos, considerados após sua estabilização nesta temperatura.

A medição dos gases e partículas ocorreu através de equipamentos portáteis posicionados onde ocorria a saída dos gases da queima. Os gases SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre) e NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio) foram medidos através do detector multigás portátil da marca VENTIS, modelo MX4. Para análise do CO (monóxido de carbono) foi utilizado o medidor portátil da marca INSTRUTHERM, modelo CO-6000. Por sua vez, a análise de material particulado PM<sub>2.5</sub> (partículas com diâmetro de 2,5 micrômetros), PM<sub>10</sub> (partículas com diâmetro de 2,5 a 10 micrômetros) e CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), foi realizada através do detector de qualidade de Ar da marca TEMTOP, modelo P1000.

### **4.3 Resultados e Discussão**

#### **4.3.1 Análise Imediata**

A composição imediata do lodo desidratado em filtro prensa proveniente do reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) da ETE Nações obtida através das análises estão apresentadas na Tabela e gráfico abaixo.

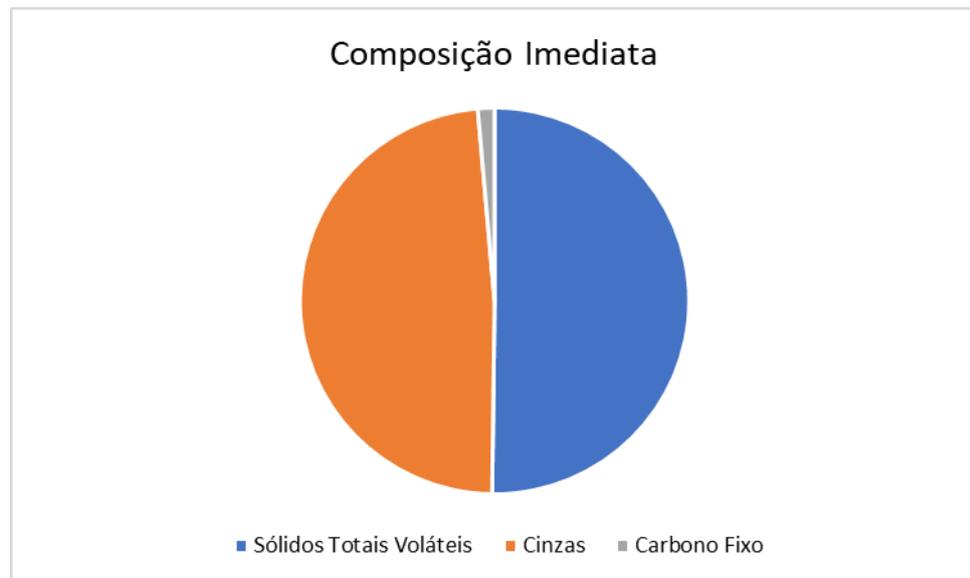
Tabela 13 – Estatística descritiva dos resultados da análise imediata do lodo

Estatística	Umidade (%)	Sólidos Totais Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo*
Número de Amostras	11	6	6	6
Média	68,24	50,21	48,43	1,38
Mediana	67,30	52,19	47,05	1,03
Máximo	78,00	53,77	60,70	6,00
Mínimo	64,50	39,30	41,18	0,00
Desvio Padrão	0,04	0,05	0,06	2,31
Coeficiente de Variação	5,80	10,94	13,50	1,68

\*o percentual de carbono fixo nas amostras foi obtido através de cálculo

Fonte: Elaboração da Autora, 2022.

Gráfico 1 – Composição Imediata do lodo



Fonte: Elaboração da Autora, 2022.

A partir da análise da Tabela 13 e Gráfico 1, nota-se que as amostras de lodo apresentaram um percentual de sólidos totais voláteis e cinzas próximo, enquanto o teor de carbono fixo foi consideravelmente baixo se comparado aos demais parâmetros analisados na composição da biomassa. Por sua vez, o teor de umidade médio apresentado ficou em torno de 68%, um percentual um pouco maior em relação aos demais parâmetros analisados.

#### **4.3.1.1 Umidade**

A determinação da umidade é de grande importância para análise do potencial energético de uma biomassa. A quantidade de água presente na amostra está relacionada diretamente ao processo de combustão, visto que a primeira etapa de combustão consiste na evaporação da água presente no combustível e diante disto, quanto maior a umidade, maior será a energia requerida (BORGES, 2008).

Altos teores de umidade são prejudiciais à queima da biomassa e influi de forma negativa para a viabilização de utilização do lodo para geração de energia. O teor de umidade é inversamente proporcional ao poder calorífico da biomassa, ou seja, quanto maior a presença de umidade, menor será a energia liberada durante sua queima, o que pode conduzir a necessidade de secagem prévia da biomassa antes de seu aproveitamento (BRAND, 2010).

O teor de umidade encontrado para o lodo desidratado da estação de tratamento de esgoto Nações, de 68,24% pode ser considerado alto em relação à totalidade da massa da amostra, porém está próximo ao encontrado por Rosa *et al.*, (2016) que foi uma média de 58,7%, ao analisar o lodo desidratado gerado em uma estação de tratamento de esgoto doméstico.

Todavia, grande parte das biomassas utilizadas nos processos de combustão, possuem um limite de 65% de umidade para conseguir autossustentar sua queima, sendo que acima deste valor, a energia liberada pela combustão é insuficiente para eliminar a água e produzir calor (KLAUTAU, 2008). Desta forma, entende-se que é imprescindível a secagem do lodo da ETE previamente a sua queima ou até mesmo que ocorra uma melhoria no processo de desidratação através do filtro prensa já existente, a fim de reduzir a umidade do lodo para que o processo de aproveitamento energético seja satisfatório.

#### **4.3.1.2 Sólidos Totais Voláteis**

A verificação do teor de voláteis para análise do potencial energético da biomassa, é pertinente em virtude de o material volátil desenvolver um papel fundamental na ignição do combustível. Com a volatilização dos compostos químicos presentes na biomassa, estes se combinam com o oxigênio presente no ar promovendo as reações da combustão (BRAND, 2010).

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 13, verifica-se que os sólidos totais voláteis apresentaram um resultado médio de 50,21%. Dados encontrados na literatura apontaram valores de 42,9% para lodo desidratado de reator UASB, após passagem do lodo pelo filtro prensa (ROSA *et.al*, 2016), o qual se aproxima muito do valor encontrado. Outros valores encontrados foram de 60,78% para lodo de reator UASB-leito e de 43,97% para lodo de reator UASB-manta (LAZZARI, 2018), o que indica que os valores encontrados nesta pesquisa foram próximos ao teor de voláteis característico para lodo anaeróbio de estações de tratamento de esgoto doméstico.

#### **4.3.1.3 Cinzas**

O teor de cinzas é outra análise de grande relevância para verificação do potencial energético do lodo, posto que as cinzas se constituem de todo o material que não queima durante o processo de combustão (teoricamente são substâncias inorgânicas presentes na biomassa), logo, altos teores de cinzas implicam na redução da eficiência do processo, pois fazem parte da massa do combustível, contudo não participam do processo de combustão (BRAND, 2010).

O lodo apresentou um teor de cinzas médio de 48,43%, constatando-se que quase metade da biomassa não participa do processo de combustão. O teor de cinzas encontrado na literatura para lodo desidratado de reator UASB após filtro prensa foi de 53,3% (ROSA *et al.*, 2016), um pouco acima do encontrado nesta pesquisa, indicando que o lodo de esgoto analisado nesta pesquisa possui uma maior fração de massa que participa do processo de combustão e conseqüente liberação de energia. Além destes, Lazzari (2018) encontrou teores de cinza de 24,32% para lodo de reator UASB – leito e 48,16% para lodo de reator UASB – manta, resultado próximo ao encontrado.

#### **4.3.1.4 Carbono Fixo**

A última propriedade estudada relacionada à composição imediata da biomassa, refere-se ao teor de carbono fixo. A quantidade de carbono fixo é obtida subtraindo-se da porcentagem da biomassa, os valores de material volátil e cinzas e caracteriza a duração de queima da biomassa. Desta maneira, quanto maior o teor de carbono fixo, mais lenta será a queima da biomassa, o que resulta em um maior tempo de residência desta no equipamento

de combustão, aumentando a durabilidade e rendimento energético do combustível (BRAND, 2010; VIERA, 2012; PIRES, 2013).

A Tabela 13 mostra que o teor de carbono fixo encontrado foi em média 1,38%, o que representa um baixo teor para o lodo de esgoto doméstico, proveniente de reator UASB, após desidratação. O valor encontrado se assemelha com os valores presentes na literatura, que aponta um teor de 3,8% para lodo desidratado também gerado em um reator UASB de uma estação de tratamento de esgoto doméstico (ROSA *et al.*, 2016).

#### 4.3.2 Análise Elementar

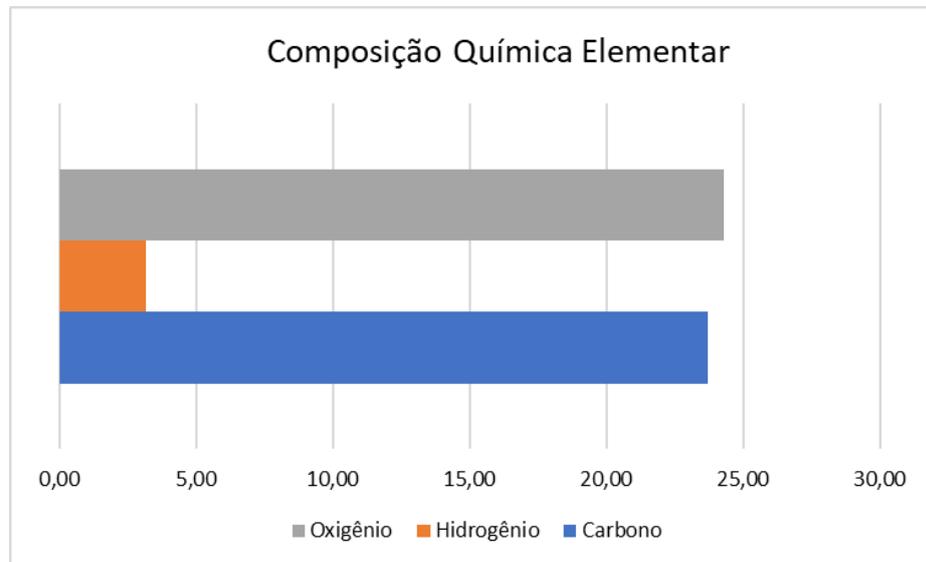
A composição química elementar das amostras de lodo analisadas, obtidas por meio dos resultados da análise imediata, são apresentadas na Tabela 14 e no Gráfico 2.

Tabela 14 – Estatística descritiva dos resultados de composição elementar do lodo

Estatística	Composição Elementar		
	C (%)	H (%)	O (%)
Número de Amostras	6		
Média	23,72	3,18	24,31
Mediana	24,26	3,27	25,01
Máximo	27,75	3,59	27,07
Mínimo	17,88	2,44	18,71
Desvio Padrão	3,23	0,39	2,90
Coefficiente de Variação	13,61	12,33	11,93

Fonte: Elaboração da Autora, 2022.

Gráfico 2 – Composição elementar do lodo



Fonte: Elaboração da Autora, 2022.

A partir da análise da tabela e gráfico, verifica-se que o lodo de esgoto do presente estudo apresentou maior concentração de oxigênio, com um percentual médio de 24,31%, seguido pela concentração de carbono média de 23,72%. Já o hidrogênio apresentou um valor médio de 3,18%, este notadamente menor que os demais compostos.

A fração de carbono e hidrogênio auxiliam positivamente no poder calorífico superior da biomassa, visto que contribuem na energia liberada durante o processo de queima, enquanto a concentração de oxigênio atua negativamente (BORGES, 2008; POKORNA *et al.*, 2009). Baseado nisso, infere-se que a análise elementar está ligada diretamente ao poder calorífico, de modo que quanto maior for a proporção de oxigênio e hidrogênio com relação ao carbono, menor será o poder calorífico da biomassa (MCKENDRY, 2002), sendo que as amostras de lodo analisadas apresentaram uma concentração média de oxigênio e hidrogênio somadas maior que de carbono, o que pode interferir negativamente no poder calorífico do lodo.

Todavia, a concentração de carbono encontrada para as amostras está entre 18% e 50%, valor considerado como o esperado a ser encontrado em massa seca de lodo (CORREIA, 2009). Além disto, ao analisar lodo proveniente de reator UASB disposto em leito, Lazzari (2018) encontrou os valores para concentração de carbono, hidrogênio e oxigênio de 28,67%, 4,20% e 39,43% respectivamente. Já Rosa *et al.* (2016), ao analisar lodo desidratado

gerado em uma ETE com reator UASB, encontrou valores de 19,8% para carbono, 3,6% para hidrogênio e 20,5% para oxigênio. Sendo assim, ambos apresentaram resultado semelhante ao encontrado na presente pesquisa, inclusive em relação a concentração de carbono levemente mais baixa que a concentração de oxigênio, indicando normalidade em relação aos resultados obtidos na presente pesquisa.

#### 4.3.3 Poder Calorífico Superior

Quando se trata de avaliação do potencial energético de uma biomassa, o poder calorífico desta é a principal propriedade a ser analisada. Uma vez que, o poder calorífico trata-se da quantidade de energia liberada pelo combustível (biomassa), na forma de calor, durante a combustão completa da mesma (BRAND, 2010). Desta maneira, quanto maior seu valor, mais apreciado é o combustível para ser utilizado com o intuito de geração de energia térmica.

Esta propriedade está intrinsecamente vinculada ao teor de umidade do combustível. Altos teores de água presentes na biomassa resultam em baixo poder calorífico, perdas de energia, baixa ignição, baixa durabilidade e menor tempo de secagem (GARCIA, 2010).

O poder calorífico superior, o qual foi analisado neste estudo, é uma medida que não leva em consideração as perdas de energia provenientes da evaporação da água presente no combustível (DIONIZIO, 2017). Deste modo, trata-se de uma quantificação do calor liberado pela queima, o qual considera que a água proveniente da combustão esteja em estado líquido, ou seja, que o calor de vaporização da água de constituição seja recuperado (GARCIA, 2010).

A Tabela 15 apresenta o resultado obtido de poder calorífico superior do lodo desidratado da ETE Nações com a análise experimental que foi realizada por amostragem única.

Tabela 15 – Resultado da análise experimental do PCS do lodo

Análise Experimental	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)
Lodo desidrato reator UASB	9,12 ± 1,06

Fonte: Elaboração da Autora, 2022.

Por sua vez, a Tabela 16 apresenta os resultados obtidos de poder calorífico superior do lodo desidratado, obtidos pela equação de Parikh, a qual utiliza os teores de carbono fixo, voláteis e cinzas para a determinação desta propriedade.

Tabela 16 – Estatística descritiva dos resultados de PCS do lodo obtidos a partir de correlação

Estatística	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)
Número de Amostras	6
Média	7,93
Mediana	8,07
Máximo	9,92
Mínimo	5,65
Desvio Padrão	1,37

Fonte: Elaboração da Autora, 2022.

De acordo com as tabelas anteriores, nota-se que a análise experimental retornou um resultado muito próximo aquele obtido através da equação de correlação com a análise elementar do lodo. O resultado do PCS obtido através da análise experimental apresentou baixa variação comparado a média do PCS obtido através da correlação, indicando assim que os resultados obtidos em ambas as análises estão dentro da normalidade, e que a obtenção de dados a partir da correlação com a análise elementar retorna resultados próximos a realidade.

A fim de análise e comparação dos resultados obtidos, são apresentados na Tabela 17 valores de poderes caloríficos superiores encontrados na literatura para biomassas da mesma atividade da pesquisa, ou seja, lodo de esgoto.

Tabela 17 – Poder calorífico superior de lodo de esgoto encontrados na literatura.

Biomassa	Poder Calorífico Superior (MJ/Kg)	Referência
Lodo de ETE doméstico - Reator UASB, desidratado após filtro prensa	8,7 ± 1,2	ROSA <i>et al.</i> (2016)
Lodo de ETE doméstico – Reator UASB, disposto em leito de secagem	9,75 ± 0,84	LAZZARI (2018)
Lodo de Digestor Anaeróbio para estabilização de resíduo sólido -desidratado	16,2 ± 0,7	SILVA (2011)
Lodo de ETE doméstico – sistema de lodos ativados, leito de secagem	20,1 ± 0,6	BORGES (2008)
Lodo de ETE doméstico – sistema de lodos ativados após desidratação	12,69	MÂNICA (2015)
Lodo de esgoto digerido anaeróbio	12,79	ANDREOLI, VON SPERLING; FERNANDES (2001 apud VIEIRA <i>et al.</i> , 2011).

Fonte: Elaboração da Autora, 2022.

Percebe-se que os valores oscilam entre 8 e 20 MJ/Kg. Por mais que se trate da mesma biomassa, proveniente do mesmo tipo de atividade, essa variância não é incomum, uma vez que o poder calorífico superior está relacionado a presença de matéria orgânica na biomassa. Além disto, as características dos efluentes variam em cada região, conforme o clima, as condições socioeconômicas e principalmente o sistema e a eficiência do tratamento empregado na mesma, influenciando assim na diferença dos resultados obtidos no presente trabalho em comparação com as bibliografias analisadas.

Cabe destacar que os resultados obtidos por Rosa *et al.* (2016) de 8,7 ± 1,2 MJ/Kg e Lazzari (2018) de 9,75 ± 0,84 se trataram dos valores que mais se assemelham aos resultados obtidos na pesquisa realizada na ETE Nações, de 9,12 ± 1,06 MJ/Kg, através da análise experimental. Isso se deve possivelmente ao fato de ambas terem sido efetuadas em uma estação de tratamento de esgoto doméstico que aplica o mesmo sistema de tratamento, compreendendo Reator UASB, sendo que a biomassa passou por sistema de desidratação com filtro prensa ou por redução de umidade através de leito de secagem.

A fim de obter-se uma comparação da dimensão dos resultados obtidos, são apresentados na Tabela 18 o poder calorífico superior de outras biomassas já utilizadas em outros estudos de reaproveitamento energético.

Tabela 18 – Poder calorífico superior de biomassas utilizadas frequentemente com fins energéticos encontrados na literatura

Biomassa	Poder Calorífico Superior (MJ/Kg)	Referência
Bagaço de cana em briquete	14,5	ARAUTERM (2008 apud BORGES 2008)
Carvão Vegetal	29,7	OLIVEIRA; SANTOS (2009)
Madeira (25 a 30% umidade)	14,6	OLIVEIRA; SANTOS (2009)
Cavaco	20,8	VIRMOND et al. (2011)

Fonte: Elaboração da Autora, 2022.

Nota-se que o PCS do lodo, encontrado através da análise experimental, apresentou um resultado correspondente à praticamente 63% do PCS do bagaço de cana e da madeira úmida, biomassas estas utilizadas frequentemente com fins energéticos.

Por fim, ao analisar a produção de lodo desidratado na estação, pelo período de um ano, observou-se que a produção média foi de 62.400 Kg/ano, o que resulta em um potencial energético do lodo de 569.088 MJ/ano ou 157,87 MWh/ano. Pode-se entender que o lodo apresenta um potencial energético próximo a um quarto do potencial energético do biogás da ETE que foi de 533 MWh/ano.

#### 4.3.4 Avaliação das emissões gasosas e materiais particulados

Na Tabela 19 são apresentadas as emissões gasosas geradas durante a queima do lodo estudado.

Tabela 19 – Estatística descritiva das emissões gasosas e materiais particulados

Estatística	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	PM10 (ug/m <sup>3</sup> )	PM2.5 (ug/m <sup>3</sup> )
Número de amostras	5					
Média	29,40	1231,80	0,10	0,06	>999,9	>999,9
Mediana	31,00	1248,00	0,00	0,00	>999,9	>999,9
Máximo	35,00	1503,00	0,50	0,20	>999,9	>999,9
Mínimo	22,00	829,00	0,00	0,00	>999,9	>999,9
Desvio Padrão	5,08	226,72	0,20	0,08	0,00	0,00
Coefficiente de Variação	17,29	18,41	200,00	133,33	0,00	0,00

Fonte: Elaboração da Autora, 2021.

Analisando-se estatisticamente os resultados, nota-se que as amostras em geral apresentaram resultados homogêneos, exceto para os gases NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>. Tais gases apresentaram uma variação maior, visto que houve detecção de NO<sub>2</sub> em apenas 1 amostra analisada, e de SO<sub>2</sub> em apenas 2 amostras realizadas, entre um total de 5 amostragens.

Avaliando-se separadamente a quantidade emitida de gases, observa-se uma alta concentração de dióxido de carbono em relação a de monóxido de carbono. As baixas concentrações de monóxido de carbono encontradas podem indicar que houve uma boa combustão do lodo e pouca perda energética durante a queima desta biomassa, visto que o monóxido de carbono se trata de um combustível e é indicador da eficiência da queima, assim como são as fuligens.

Resultado este diferente do obtido em outras pesquisas que analisaram emissões gasosas durante a combustão de lodo. Borges (2008), ao analisar as emissões gasosas originadas durante a combustão de lodo de esgoto doméstico, detectou alta concentração de monóxido de carbono (216 ppm), comparado a concentração de dióxido de carbono (192 ppm), sendo que se atribuiu este resultado a combustão incompleta e a influência negativa da carga inorgânica contida nas amostras.

Em relação aos gases NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, as baixas concentrações encontradas em detrimento aos demais gases, demonstra que há menor concentração de elementos nitrogênio e

enxofre nas amostras de lodo estudadas. Este mesmo comportamento também foi identificado por Borges (2008), que não detectou a presença destes gases durante a combustão das amostras de lodo doméstico.

Ao se verificar os resultados de materiais particulados, é notório as altas concentrações, tanto das partículas finas menores que 2,5 micrômetros, quanto das partículas maiores de até 10 micrômetros. Ambas apresentaram concentração acima dos limites quantificáveis pelo equipamento, sendo  $>999,99 \text{ ug/m}^3$ , o que indica um nível de MP em desacordo com as normas ambientais de emissão ou presença de material particulado na atmosfera (CONAMA, 2006, 2011, 2018).

Todavia, estes resultados obtidos servem apenas como um indicativo qualitativo preliminar das emissões gasosas. Devido a necessidade de maior controle das condições operacionais da combustão, para continuidade deste trabalho, sugere-se a instalação da infraestrutura necessária para condução de um processo de combustão com maior controle das condições operacionais, além da inclusão da medição da concentração de  $\text{O}_2$  para correção de concentração e verificação se atende aos padrões de emissão contidos nas resoluções pertinentes à emissões atmosféricas de fontes fixas (CONAMA 2006, 2011).

Apesar de não existir padrões aplicáveis pelo CONAMA, tampouco por outras legislações, para monitoramento específico de emissões gasosas durante o processo de combustão de lodo, pode-se realizar uma análise comparativa dos resultados com os padrões de emissão estabelecidos na Resolução CONAMA nº 382/2006 e CONAMA nº 436/2011, para CO e  $\text{NO}_2$  gerados por processo de calor a partir da combustão externa de bagaço de cana-de-açúcar. Para isso, é necessário a informação referente a concentração de  $\text{O}_2$  durante a queima, dado este que deve ser obtido em futuras pesquisas, para ter-se então uma base para análise dos padrões de emissões indicados nas legislações vigentes.

Então, a partir destes conhecimentos será possível afirmar se há necessidade de implantação de um sistema para controle de emissões gasosas, informação fundamental para determinação de viabilidade econômica na utilização deste tipo de biomassa como combustível.

#### 4.4 Conclusão

Através da caracterização e análise do poder calorífico superior do lodo proveniente do sistema de tratamento de esgoto doméstico com reator UASB, após passar por desidratação em filtro prensa, foi possível analisar o potencial energético desta biomassa.

Pela análise dos resultados evidenciou-se um lodo com poder calorífico superior igual a  $9,12 \pm 1,06$  MJ/Kg. Embora este valor esteja muito próximo a valores encontrados em outras pesquisas utilizando a mesma biomassa, ao comparar este resultado com o poder calorífico superior de outras biomassas comumente utilizadas como combustível é evidente que o lodo apresentou menor potencial energético.

A fim de contribuir para a questão do uso energético do lodo, realizou-se também a caracterização imediata deste. As amostras apresentaram valores de umidade em torno de 68%, e devido a altos teores de umidade ser prejudiciais ao processo de combustão, foi possível concluir que há necessidade de secagem do lodo previamente a sua queima ou até mesmo realização de melhorias no processo de desidratação através do filtro prensa já existente, a fim de reduzir a umidade do lodo caso objetive-se realizar o reaproveitamento energético desta biomassa.

Em relação ao teor de material volátil, identificou-se que aproximadamente 50% da biomassa corresponde ao material volátil, o qual é uma parcela orgânica da biomassa e representa a parcela mais rica em termos energéticos. Já as cinzas apresentaram um valor médio de 48%, e trata-se de substâncias inorgânicas. A quantificação e caracterização destes materiais são de grande importância a fim de determinar-se como realizar o gerenciamento deste resíduo, que é um produto do processo de combustão.

No que se refere a avaliação das emissões gasosas, verificou-se que apesar de não existir legislações aplicáveis para monitoramento de emissões gasosas provenientes da combustão do lodo, é de extrema importância a realização destas análises com maior controle das condições operacionais, além de inclusão da medição de oxigênio a fim de poder realizar definição dos controles ambientais necessários das emissões gasosas geradas durante o processo de combustão, sendo que o tipo de controle necessário irá determinar custos de projeto e operação de uma planta para aproveitamento energético.

Por fim conclui-se que um resíduo que normalmente proporciona gastos as plantas da estação, pode agregar a operação da mesma e se tornar viável para a geração de energia.

O potencial energético apresentado pelo lodo foi de 157.872 KWh/ano, o qual corresponde a um poder calorífico da fração sólida volátil do lodo de 2,53 KWh/kg, representando que se pode utilizar o lodo na combustão para produção de energia elétrica, ou a partir da cogeração com outros combustíveis.

Ainda, o potencial energético encontrado, considerando 50% de rendimento na transformação de energia elétrica (ALMEIDA, 2008 apud SANTOS, 2012) poderia retornar geração de energia na ETE em torno de 78.936 KWh/ano. Considerando-se o valor de R\$ 0,79/KWh, aplicado pela companhia de energia elétrica que realiza o fornecimento de energia na estação de tratamento de esgoto, o potencial energético passível de obtenção durante um processo de combustão do lodo, para utilização na própria estação representa uma economia próxima a R\$ 62.359,00 anual.

A realização do aproveitamento energético do lodo reduz o volume final a ser disposto em aterro sanitário, que possui vida útil e segue disposição cada vez mais restrita nas grandes cidades, proporciona diminuição do seu impacto ambiental, redução de custos operacionais, acarreta recuperação de energia, além de possibilitar a utilização dos sólidos resultantes do processo na agricultura.

O estudo para definição de alternativas de aproveitamento energético desta biomassa deve levar em conta as necessidades e realidades da estação, considerando os balanços de massa e energia para tomada de decisões. A partir da caracterização da biomassa realizada nesta pesquisa, e com a ampliação dessas análises, pode-se utilizar os dados obtidos para realizar estudos de projetos de aproveitamento energético que sejam viáveis tecnicamente e economicamente a estação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo geral quantificar, caracterizar e avaliar o potencial energético dos subprodutos lodo e biogás gerados no tratamento de esgotos doméstico por reator UASB. Para tal, alguns objetivos específicos foram traçados, e através destes obteve-se a estimativa da produção do lodo e biogás gerados na estação, a caracterização dos aspectos físico-químicos destes subprodutos, o potencial energético de ambos, a análise das emissões gasosas geradas durante o processo de combustão do lodo e a avaliação dos fatores técnicos, econômicos e ambientais relacionados ao aproveitamento energético destes subprodutos.

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos, a caracterização e avaliação dos produtos ocorreu individualmente, sendo que ao identificar o potencial energético do biogás mais elevado do que o do lodo, que ainda possui uma geração muito incipiente de lodo na estação, analisou-se cenários de aproveitamento energético utilizando os subprodutos gerados na estação.

Realizando-se a caracterização do biogás, foi possível identificar que a concentração média de metano no biogás foi em torno de 85%, sendo considerado uma concentração típica para reatores UASB, inclusive tendo atingido valores máximos que indicam que a ETE pode atingir inclusive a melhor situação.

Ainda durante estas análises, constatou-se que a vazão de geração do biogás na estação está em torno de 172,05 Nm<sup>3</sup>/d, e foi por meio destas caracterizações principais que foi possível obter o potencial energético do biogás disponível na estação de tratamento de esgoto em estudo.

O potencial energético apresentado pelo biogás foi de aproximadamente 1.462 KWh/d, e com o intuito de avaliar o aproveitamento energético deste subproduto foi proposto dois cenários distintos de aproveitamento energético, sendo o cenário A que previa uso prioritário do biogás para secagem térmica do lodo gerado na estação e conseqüente redução do volume a ser disposto em aterro e o cenário B que previa o uso do biogás em motor de combustão para geração de energia em prol da estação e posterior

aproveitamento dos gases de exaustão gerados no motor para realizar a secagem térmica do lodo desidratado.

Ambos os cenários analisados apresentaram economias em relação aos custos operacionais da ETE, destacando-se o cenário B que apresentou maiores benefícios econômicos e ambientais, visto que além da possibilidade de realização da secagem do lodo gerado na estação, com redução do volume a ser transportado e disposto em aterro gerando economia de R\$ 29.551,06 ao ano, ainda apresentou potencial para geração de energia elétrica levando ao autossuprimento energético na estação de 83,17%, e conseqüentemente uma economia em relação ao consumo de energia elétrica de R\$ 113.827,86, totalizando economia total anual de R\$ 143.378,92.

O aproveitamento energético do biogás para geração de energia ainda pode resultar em um benefício ambiental, com a possibilidade de evitar a emissão gasosa de 642,14 toneladas de CO<sub>2</sub> eq ao ano. Sendo assim, as características do biogás gerado na ETE Nações, indicaram que há potencial para aproveitamento energético deste, além de representar um benefício ambiental efetivo, que vem ao encontro com a redução de gases do efeito estufa e pode proporcionar ainda geração de créditos de carbono na planta de aproveitamento energético do biogás.

Todavia, ficou evidente a necessidade de estudos mais detalhados capazes de simular a geração de energia elétrica e secagem térmica do lodo, e levantar custos com fornecedores de equipamentos passíveis de atendimento da ETE, a fim de fornecer subsídios para análise de viabilidade econômica, ambiental e social e conseqüentemente possibilitar a escolha da melhor alternativa de tecnologia para realizar o aproveitamento energético do biogás.

Por sua vez, para análise do potencial energético do lodo desidratado em filtro prensa, gerado no reator UASB tratando esgoto doméstico, foi realizada a caracterização deste através do monitoramento da quantidade gerada durante o período de um ano, análise da composição imediata, composição elementar e do poder calorífico superior da biomassa.

A quantificação e caracterização do lodo retornou resultados que indicaram que a umidade da biomassa se encontra próximo a 68%, sendo este considerado um alto teor de umidade. Altos teores de umidade podem ser prejudiciais ao processo de combustão, e devido a isto identificou-se que se houver interesse na utilização da biomassa para geração

de energia, é necessário realizar algum processo para redução da umidade previamente a sua queima.

Além disso, a análise do potencial energético por meio da correlação com a análise imediata trouxe um valor médio de PCS de 9,12 MJ/Kg, e ao comparar este resultado com outras pesquisas utilizando a mesma biomassa, concluiu-se que o valor encontrado é próximo aos encontrados por outros autores. Todavia, ao comparar com o poder calorífico superior de biomassas já utilizadas frequentemente para fins energéticos, concluiu-se que o lodo apresenta um baixo potencial energético, e sua utilização para produção de energia deve ser bem avaliada, principalmente levando em consideração a viabilidade econômica do processo.

Ainda, considerando 50% de rendimento deste potencial energético encontrado na biomassa, para transformação de energia elétrica, verificou-se que pode ser obtido geração de energia na ETE em torno de 78.936 KWh/ano, o que representa uma economia anual de R\$ 62.359,00, considerando o valor do KWh aplicado atualmente pela companhia que fornece energia elétrica na estação. Ao realizar o aproveitamento energético deste subproduto, também se tem a redução do volume de lodo a ser disposto em aterro sanitário, proporcionando além da redução de custos operacionais, a diminuição de seu impacto ambiental e a possibilidade de utilização dos sólidos resultantes do processo na agricultura.

Em relação às emissões gasosas, não foi realizada análise de oxigênio, o que impossibilitou a comparação dos resultados com legislações afins relacionadas as emissões gasosas, e por mais que não haja uma legislação específica referente as emissões gasosas geradas através da combustão do lodo, o estabelecimento de uma avaliação de emissão gasosa com maior controle operacional é de extrema importância. A partir do momento que se objetivar a utilização da biomassa para fins energéticos, irá ocorrer a geração de produtos como emissão de gases, e esses consequentemente precisam passar por um controle ambiental adequado.

Desta maneira, torna-se necessário ampliação das análises realizadas em relação ao lodo, bem como estabelecimento de estudos direcionados a análise de viabilidade técnica e econômica referente a combustão da biomassa para fins energéticos.

Cabe salientar que a estação atualmente opera com uma vazão que tem sofrido incremento constantemente, devido a ampliações no sistema, bem como a planta conta com

espaço para ampliação e instalação de outra unidade de reator UASB, ou seja, quanto maior a vazão atendida na estação conseqüentemente maior será a geração dos subprodutos passíveis de aproveitamento energético, e assim se tornam mais viáveis implantações de tecnologias para este fim.

As estações de tratamento de esgoto convencionais, normalmente apresentam fluxogramas de tratamento concebidos levando-se em consideração apenas as legislações relacionadas à proteção hídrica, ademais, os subprodutos sólidos e gasosos gerados durante o tratamento são frequentemente destinados aos aterros sanitários e a queima para a atmosfera. Apesar de serem rotas de destinação aceitas no Brasil, não são necessariamente as mais adequadas, frente aos impactos ambientais que podem ocasionar.

Também é de amplo conhecimento que estes subprodutos apresentam potencial de aproveitamento energético, mas esforços com esse objetivo ainda são incipientes. A necessidade pela busca de alternativas, de forma articulada a fim de abordar possibilidades e aproveitamento energético dos subprodutos foi o que norteou este trabalho.

O trabalho inicial de caracterização dos subprodutos é essencial para nortear as companhias prestadoras de serviços de saneamento, bem como profissionais que atuam no setor. Resultados de caracterização de lodo e biogás como os obtidos neste trabalho, através do alcance dos objetivos definidos, são essenciais e esclarecedores, capazes de criar um incentivo para ocorrência das transformações necessárias, desde a gestão, até a modificação nas elaborações dos projetos, operação e manutenção dos sistemas já existentes, motivando as companhias a realizar investimentos que objetivem implantação de alternativas de aproveitamento energético nas plantas de tratamento.

Por fim, a realização do aproveitamento energético de subprodutos como os estudados caracteriza diversos benefícios em todos os âmbitos, inclusive no social. Implantação de tecnologias que visem a produção de energia limpa faz parte de alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que visam garantir um futuro melhor em todos os âmbitos para a humanidade e o meio ambiente, dentre eles pode-se citar: o objetivo 7 – Energia limpa e acessível, que visa expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento; objetivo 11 - Cidades e comunidades sustentáveis, com o intuito de tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis; objetivo 12 – Consumo e produção responsáveis, com o intuito de alcançar o

manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos e reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso, e o objetivo 13 – Ação contra a mudança global do clima, que busca integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais, como as emissões totais de gases do efeito estufa por ano.

Para trabalhos futuros, recomenda-se realizar análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético do lodo e biogás, através de orçamento com empresas técnicas especializadas, a fim de identificar o período de retorno (*payback*) do investimento, bem como realização de um maior número de campanhas para monitoramento do potencial energético dos subprodutos. Também, sugere-se a inclusão de outros componentes de monitoramento relacionados às emissões gasosas, além do aumento do controle operacional para análise das emissões geradas durante o processo de combustão.

## 6 REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Biomassa, 2005. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>. Acesso em 02/11/2021.

ADÃO, D. C. **Avaliação físico-química de bio-óleo e biocombustível como aditivo para combustíveis fósseis**. 2006. 67 f. Dissertação (Mestrado em Química dos recursos naturais). Departamento de Química, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

ANDREOLI, C.V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds) **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001. 484 p.(Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

ANDREOLLI, C. V. (coordenador). **Alternativas de Uso dos Resíduos do Saneamento**. 416p. Curitiba: PROSAB, 2006.

ANDREOLI, C.; FERREIRA, A.; CHERNICHARO, C.; BORGES, E. S. M. **Secagem e higienização de lodos com aproveitamento do biogás**. In: CASSINI, S. T. (Ed.), Digestão de resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás. Rio de Janeiro: ABES, Rima, Rio de Janeiro, 2003. p. 121-165.

BATISTELLA, Luciane et al. **Avaliação das emissões gasosas geradas na combustão de lodo de esgoto sanitário em combustor de leito móvel**. 2015.

BORGES, F. **Caracterização e estudo da potencialidade de lodos de efluente doméstico e industrial como combustível na geração de energia**. Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE), Programa de Processos em Engenharia de Processos. Dissertação de Mestrado, 2008.

BORGES, Fabricio; SELLIN, Noeli; MEDEIROS, Sandra Helena Westrupp. **Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia**. Ciência & Engenharia, v. 17, n. 1/2, p. 27-32, 2008.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

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. 183 p. : il. – (Aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto ; 1)

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios** / Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; autores, Carolina Cabral ... [et al.]. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2016. 50 p. : il. – (Aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto).

BRINGHENTI, J. R. et al. Co-disposal of sewage sludge in brazilian sanitary landfills: Technical considerations and minimal criteria for application. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 23, n. 5, p. 891–899, 2018.

CAMPOS, J. R. Fundamentos do Tratamento anaeróbio. p. 464 p., 1999.

CETESB (São Paulo) **Biogás : projetos e pesquisas no Brasil** / CETESB, Secretaria do Meio Ambiente ; organização Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer ; responsável técnico João Wagner Silva Alves. - - São Paulo : SMA, 2006. Acesso em: 15/08/2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/livrobiogas.pdf>.

CHERNICHARO, C. A. L.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; GARCIA, G. B.; LERMONTOV, A.; PEREIRA, C. B.; PLATZER, C. J.; POSSETTI, G. R. C.; LEITES, M. A. L.; ROSSETO, R. **Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas**. *Revista DAE*, v. 66, n. 213, p. 5-19, 2018

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J.B.; NOYOLA, A. BRESSANI-RIBEIRO, T. **Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges**. *Reviews in Environmental Science and Bio/technology*, v. 14, n. 4, p.649-679, 2015. Acesso em: 14/08/2021

CHERNICHARO, C.A.L, BRESSANI-RIBEIRO, T, PEGORINI, E., POSSETTI, G.R.C., MIKI, M. K., NONATO, S. **Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 1: Tópicos de Interesse**. *Revista DAE – edição especial*, v. 66, n. 214, p. 5-16, 2018b.

CHERNICHARO, C.A.L., BRESSANI-RIBEIRO, T., GARCIA, G.B., LERMONTOV, A., PEREIRA, C.B., PLATZER, C.J., POSSETTI, G.R.C., LEITES, M.A.L., ROSSETO, R. **Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas**. *Revista DAE*, vol. 66 (2013), p. 56-72, 2018a.

COELHO, S. T. et al. **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto**. V Congresso Brasileiro De Planejamento Energético, 2006.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 382. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Publicação DOU: 26/12/2006

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 436. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Publicação DOU: 26/12/2011.

CONAMA, 2018 – Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018 – Revoga a Resolução Conama nº 03/1990 e os itens 2.2.1 e 2.3 da Resolução Conama nº 05/1989

CORREIA, J. E. **Caracterização físico-químico e microbiológica do lodo gerado na estação de tratamento de esgoto Contorno, Feira de Santana, BA.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, 2009.

COURTAUD, Louis et al. Alternative fuels derived from organic waste: the case of sewage sludge characterization as a potential energy source. In: **3rd International symposium on energy from biomass and waste.** CISA, 2010. p. 12 p.

COUTO, L. C., COUTO, L., WATZLAWICK, L. F., CÂMARA, D. **Vias de valorização de biomassa.** Biomassa & Energia, v. 1, n. 1, p. 71-92, 2004.

DA SILVA, SUÊNIA. **Influência da recuperação e retorno de lodo efluente sobre a capacidade e eficiência de tratamento de reatores UASB.** 2017.

DE CARVALHO, J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada.** Editora da Universidade Federal de Santa Catarina–UFSC. Florianópolis, SC, 2007.

DIONIZIO, A. F. **Aproveitamento energético de resíduos agroindustriais no Distrito Federal. 2017.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

DUARTE, O. A. H.; SÁNCHEZ, L.; CÁRDENAS, M.; CANTÃO, M.; POSSETTI, G. R. C.; AISSE, M. **Ventajas y desventajas del uso de la espectrofotometría monitoreando la calidad del agua residual en un reactor anaeróbico.** Revista Científica UNET. v. 30, p. 302 - 312, 2018.

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e combustão industrial.** Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil.**2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia dos Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010.

GLÓRIA, R. M.; NETO G. P. P.; SOUZA C. L.; SILVA S. Q.; AQUINO S. F.; CHERNICHARO, C.A.L. **Remoção de sulfeto de hidrogênio de efluente de reator UASB: contribuição da camada de espuma e da tubulação de descarte.** In: IX Taller y Simposio Digestión Anaerobia, Anais... Ilha de Páscoa, 2008.

GOMES, G. V. et al. **Estudo Da Produção De Energia Elétrica a Partir De Biogás Com E Sem Purificação De Estação De Tratamento De Esgoto.** The Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 3, n. 7, p. 0899–0919, 2017

HOUDKOVA, L; BORA, J.; UCEKAJ, V.; ELSASER, T.; STEHLIK, P. **Thermal processing of sewage sludge – II.** Applied Thermal Engineering, v. 28, p. 2083–2088. 2008.

HOOVER; S.R.; PORGES; N.; **Assimilation of dairy waste by activated sludge- II: the equations of synthesis and rate of oxygen utilization**; Sew. and Ind. Wastes J., v. 24, p. 306; 1952.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2013) Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2006) **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**. EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Published: IGES, Japan

KLAUTAU, Judith von Paumgarten. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos**. 2008.

LAZZARI, Juanna. **Análise do potencial energético de lodos obtidos no tratamento de esgoto**. 2018. 83f. Dissertação (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

LEE, Erich Shen Higa; SANTOS, F. J. **Caracterização do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético**. In: II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, IBEAS, Londrina, PR. 2011. p. 1-9.

LOBATO, Livia Cristina da Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011.

LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. **Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater**. Water Science and Technology, v. 66, n. 12, p. 2745-2753, 2012.

LOBATO, L. C. S., BRESSANI-RIBEIRO, T., SILVA, B. S., FLÓREZ, C. A. D., NEVES, P. N. P., CHERNICHARO, C. A. L. **Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 3: Gerenciamento de lodo e espuma**. Revista DAE – edição especial, v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

MÂNICA, Alana Natali. **Determinação do poder calorífico do lodo de esgoto doméstico e industrial a partir da análise imediata**. 2015.

MCKENDRY, Peter. **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass**. Bioresource technology, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse**. 5th ed. New York, USA: McGraw-Hill. 2016. 1980 p.

MORAN, Michael J. et al. **Fundamentos de termodinâmica de engenharia**. John Wiley & Sons, 2010.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. **Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: Odor control and energy/resource recovery.** *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 5, n. 1, p. 93–114, 2006.

OLIVEIRA, SVWB; SANTOS, AFS. **Estudo de viabilidade de aplicação do biogás no ambiente urbano.** MBA–ADMINISTRAÇÃO. Fundação para Pesquisa e Desenvolvimento da Administração. Universidade de São Paulo, Faculdade de Economia e Administração, Ribeirão Preto, 2009.

PADILHA, J., KURECK, A.P., SOUZA, O., SELLIN, N. **Avaliação da potencialidade energética de lodos gerados no tratamento de efluentes de abatedouro e frigorífico de aves.** In: Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, 30<sup>º</sup> encontro técnico AESABESP. Anais. São Paulo: AESABESP, 2019.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. **A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels.** *Fuel*, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

PARIKH J., CHANNIWALA S.A., GHOSAL G.K., **A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials.** *Fuel*, nº 86, pp. 1710–1719, 2007.

PAULA, A. C. **Avaliação integrada do desempenho de reatores anaeróbios do tipo UASB tratando esgoto doméstico em escala real.** 2019, 221 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

PEDROZA, Marcelo Mendes et al. **Produção e tratamento de lodo de esgoto—uma revisão.** *Revista Liberato*, v. 11, n. 16, p. 147-158, 2010.

PIRES, A. A. F. **Resíduos lignocelulósicos para biocombustível sólido: caracterização e termogravimetria aplicada.** 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

POKORNA, E. et al. **Study of bio-oils and solids from flash pyrolysis of sewage sludges.** *Fuel*, v. 88, n. 8, p. 1344-1350, 2009.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; COSTA, F. J. O. G.; WAGNER, L. G.; LOBATO, L.C.S.; BRESSANI-RIBEIRO, T., MELO, D. F.; REIS, J. A; CHERNICHARO, C. A. L. **Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano.** *Revista DAE*, v. 66, p. 73-89. 2018..

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; LOBATO, L. C. S.; AISSÉ, M. M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte A: Avanço das ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás**

**em ETEs com reatores anaeróbios** – Nota Técnica 2 - Programa computacional de estimativa de produção de biogás em reatores UASB - ProBio 2.0, v. 1, n.1, p. 21-34, 2021.

ROSA, André Pereira; CERNICHARO, CAL; MELO, GCB. **Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos**. Revista DAE, Edição, n. 198, p. 55-62, 2015.

ROSA, André Pereira et al. **Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, p. 171, 2013.

ROSA, AP et al. **Avaliação do potencial de fontes de energia renovável (biogás e lodo) em uma estação de tratamento baseada em UASB em grande escala**. Energias Renováveis , v. 124, p. 21-26, 2018.

ROSA, André Pereira 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, n. 2, p. 315-328, 2016.

SALOMON, Karina Ribeiro; LORA, Electo Eduardo Silva. **Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil**. Biomass and bioenergy, v. 33, n. 9, p. 1101-1107, 2009.

SANTOS, Yvelyne Bianca Iunes et al. **Desenvolvimento de sistema computacional para avaliação de lodo de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia**. 2012.

SILVA, Jader de Oliveira et al. **Caracterização do potencial energético e estudo físico-químico do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do DMAE-Uberlândia-MG**. 2011.

SINGH, K. S.; HARADA, H.; VIRARAGHAVAN, T. **Low-strength wastewater treatment by a UASB reactor**. Bioresource Technology, v. 55, p. 187-194, 1996.

SOUZA, C.L. **Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB**. 2010. 127 p. Tese (Doutorado em Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SOUZA, M. M. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita florestal e do processamento de Pinus taeda L**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal da Universidade federal do Paraná), Curitiba – PR, 2010. 77p.

SOUZA, C. L.; CERNICHARO, C. A. L. **Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions**. Water Science and Technology, v. 64, p. 2259-2264. 2011.

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**. Dissertação

(Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2015. Acesso em: 15/08/2021

VAMVUKA, D.; ZOGRAFOS, D. **Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion.** *Fuel*, v. 83, n. 14-15, p. 2051-2057, 2004.

VAN HAANDEL, Adrianus; VAN DER LUBBE, Jeroen. **Handbook biological waste water treatment-design and optimisation of activated sludge systems.** Webshop Wastewater Handbook, 2012.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná Cascável, p. 33, 2012.

VIEIRA, Gláucia Gama et al. **O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto–uma revisão.** *Revista Liberato*, v. 12, n. 17, p. 81-96, 2011.

VIRMOND, E.; SCHACKER, R. L.; ALBRECHT, W.; ALTHOFF, C. A.; DE SOUZA, M.; MOREIRA, R. F.; JOSÉ, H. J. **Organic solid waste originating from the meat processing industry as an alternative energy source.** *Energy*, v. 36, n. 6, p. 3897-3906, 2011.

WERLE S., WILK R. K. **A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective.** *Renewable Energy*. 2010. v. 35. p. 1914–1919.