



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*  
MESTRADO EM SISTEMAS AMBIENTAIS SUSTENTÁVEIS

**DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO BIOLÓGICO DE UMA  
ETE PETROQUÍMICA – UM ESTUDO DE CASO**

Joseane Parizzi Mafioleti

Lajeado, 6 de março de 2020

Joseane Parizzi Mafioleti

**DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO BIOLÓGICO DE UMA  
ETE PETROQUÍMICA – UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Ambientais Sustentáveis, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Mestre em Sistemas Ambientais Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. Odorico Konrad

Lajeado, 31 de maio de 2019

Joseane Parizzi Mafioleti

## **DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO BIOLÓGICO DE UMA ETE PETROQUÍMICA – UM ESTUDO DE CASO**

A Banca examinadora abaixo aprova a Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Ambientais Sustentáveis, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas Ambientais Sustentáveis, na área de concentração Bases Ecológicas para o Licenciamento Ambiental:

Prof. Dr. Odorico Konrad - orientador  
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Prof. Dr. Alexandre Feil  
Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES

Profa. Dra. Francielle Bucker  
Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES

Prof. Dr. Noeli Juarez Ferla  
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Lajeado, 31 de maio de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos ao meu esposo Décio Fernandes Mafioleti, pelo apoio e a compreensão que foram essenciais durante o mestrado, assim como de meus filhos Nicolas e Júlia.

A meus pais e minha sogra que me ajudaram quando precisei me dedicar a dissertação.

Ao meu orientador, Dr. Odorico Konrad, pela orientação e aconselhamentos durante a elaboração do projeto e a todos os colaboradores e bolsistas do Laboratório de Biorreatores Tecnovates que me auxiliaram em todos os experimentos do projeto desenvolvido.

À CORSAN, especialmente a SITEL, que autorizou a pesquisa e auxiliou dentro do possível com o desenvolvimento do estudo.

Aos membros da banca pelas sugestões.

Enfim, agradeço a todos que colaboraram e tornaram realidade esse sonho.

## RESUMO

A energia das biomassas é oriunda do tratamento de dejetos orgânicos que pode ser feito através da digestão anaeróbia, que gera o biogás. Através de biodigestores, que nada mais são do que reatores anaeróbios, onde o material orgânico que pode ser esgoto, efluente, lodo de ETEs e demais resíduos com elevada carga orgânica, é decomposto por bactérias metanogênicas. No tratamento de efluentes em ETEs Petroquímicas é gerado o lodo biológico, que se trata da biomassa que se formou às custas do alimento fornecido pelo efluente. O lodo biológico pode conter substâncias que conferem periculosidade ao resíduo como poluentes orgânicos persistentes, metais pesados e microorganismos patogênicos que podem classificá-lo como perigoso. O objetivo do trabalho foi realizar a digestão anaeróbia do lodo biológico proveniente de uma ETE Petroquímica para quantificar e qualificar o biogás gerado e verificar a concentração dos contaminantes presentes após a digestão. A metodologia utilizada foi a realização da digestão anaeróbia do lodo em escala laboratorial, as análises físico-químicas e a caracterização do lodo conforme ABNT NBR 10.004/2004 antes e após a digestão. Os resultados dos experimentos mostraram um baixo rendimento na produção de biogás e de metano com PBB de 45,13 mL Biogás/gSV, PBM de 25,9 mL Metano/gSV e com rendimento estimado de 0,7235 m<sup>3</sup> de metano por tonelada de lodo. Os percentuais médios de metano obtidos nos experimentos foram de 33,2 %, 50,95 % e 39,17 %. Para os experimentos contínuos, percebeu-se a redução dos percentuais de metano durante as alimentações com o lodo e o aumento destes percentuais após término das alimentações, demonstrando a presença de agentes inibidores de produção de metano nesse substrato. A caracterização do lodo evidenciou altas concentrações de Cromo, que conferem característica tóxica ao lodo e que é considerado um agente inibidor da produção de biogás, por se tratar de um metal pesado. O cromo é de origem de lixiviados de aterros sanitários que são tratados juntamente com os efluentes petroquímicos. Concluiu-se que o lodo após ser submetido a digestão anaeróbia não apresentou produção de biogás e metano satisfatória para aproveitamento energético na ETE devido aos agentes inibidores presentes e ainda que não houve alteração na classificação de resíduo após a digestão, permanecendo o lodo caracterizado como resíduo perigoso pela presença do cromo em sua composição.

**Palavras-chave:** Energias renováveis. Biogás. Lodo biológico. Periculosidade de resíduos. Agentes inibitórios.

## ABSTRACT

The biomass energy comes from the treatment of organic waste that can be done through anaerobic digestion, which generates biogas. Through biodigestors, which are nothing more than anaerobic reactors, where the organic material that can be sewage, effluent, sludge from TEEs and other wastes with high organic load, is decomposed by methanogenic bacteria. In the treatment of effluents in Petrochemical ETE is generated the biological sludge, which is the biomass that was formed at the expense of the food provided by the effluent. Biological sludge may contain hazardous substances to the waste such as persistent organic pollutants, heavy metals and pathogenic microorganisms that may qualify as hazardous. The objective of this work was to perform the anaerobic digestion of the biological sludge from a TEE Petrochemical to quantify and qualify the generated biogas and verify the concentration of the contaminants present after the digestion. The methodology used was the anaerobic digestion of the sludge in laboratory scale, the physical-chemical analyzes and the characterization of the sludge according to ABNT NBR 10,004 / 2004 before and after digestion. The results of the experiments showed a low yield in the biogas and methane production with PBB of 45.13 mL Biogas/gSV, PBM of 25.9 mL Methane/gSV and with an estimated yield of 0.7235 m<sup>3</sup> of methane per ton of sludge. The average percentages of methane obtained in the experiments were 33.2 %, 50.95 % and 39.17 %. For the continuous experiments, it was noticed the reduction of the percentages during the feeds with the sludge and the increase of these percentages after finishing the feeds, demonstrating the presence of agents inhibiting methane production in this substrate. The characterization of the sludge showed high concentrations of Chromium, which confer a toxic characteristic to the sludge and that is considered an agent inhibiting the production of biogas, because it is a heavy metal. Chromium is the source of leachate from landfills that are treated together with petrochemical effluents. It was concluded that the sludge after being submitted to anaerobic digestion did not present biogas and methane production satisfactory for energy use in the ETE due to the inhibitory agents present and although there was no change in the classification of the residue after the digestion, remaining the sludge characterized as residue dangerous by the presence of chromium in its composition.

**Keywords:** Renewable energies. Biogas. Biological sludge. Hazardous waste. Inhibitory agents.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz de Capacidade Instalada de geração de energia elétrica no Brasil: Fevereiro/2019 .....	19
Figura 2 – Processos de formação de biogás .....	24
Figura 3 – Biodigestor Modelo Indiano.....	25
Figura 4 – Biodigestor Modelo Chinês .....	26
Figura 5 – Caracterização e classificação de resíduos .....	34
Figura 6 –Estação de Tratamento de Efluentes do Pólo Petroquímico do Sul.....	41
Figura 7 – Aplicação de lodo pela técnica <i>landfarming</i> .....	41
Figura 8 – Tanque de estocagem de lodo.....	42
Figura 9 – Amostra coletada para o experimento .....	43
Figura 10 – Sistema de Mini Digestores e incubadora .....	45
Figura 11 – Tubo de realização e leitura dos dados do experimento .....	45
Figura 12 – Medidor de Metano .....	46
Figura 13 –Reatores utilizados para o experimento contínuo com alimentação .....	47
Figura 14 – Cromatógrafo Gasoso.....	48
Figura 15 – Estufa utilizada para análise de sólidos totais.....	48
Figura 16– Estufa e dessecador utilizados para análise de sólidos .....	49
Figura 17 – Forno tipo mufla para análise de sólidos voláteis .....	49
Figura 18– pHmetro .....	50

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Matriz Energética Brasileira 2017 e Mundial em 2015.....	18
Gráfico 2 – Produção diária de Biogás – Experimento 1.....	52
Gráfico 3 – Volume acumulado de biogás e metano no biogás – Experimento 1 .....	53
Gráfico 4 – Percentual médio de metano no biogás – Experimento 1 .....	53
Gráfico 5 – Produção diária de Biogás – Experimento 2.....	56
Gráfico 6 – Volume acumulado de biogás e metano no biogás – Experimento 2 .....	57
Gráfico 7 – Percentual médio de metano no biogás – Experimento 2 .....	58
Gráfico 8 – Produção diária de Biogás – Experimento 3.....	60
Gráfico 9 – Volume acumulado de biogás e metano no biogás – Experimento 3 .....	60
Gráfico 10 – Percentual médio de metano no biogás – Experimento 3 .....	61

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Alternativas para disposição final de lodos .....	36
Quadro 2 – Avaliação da Viabilidade de instalações de biodigestores .....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do Experimento 1-Teor de Sólidos e pH .....	53
Tabela 2 – Comparação de substratos quanto ao desempenho de produção de biogás .....	55
Tabela 3 – Resultados das análises de pH, ST, SV do lodo de alimentação Experimento 2 .....	56
Tabela 4 – Resultados das análises de pH, ST, SV do lodo de alimentação Experimento 3 .....	59
Tabela 5 – Teores de Cromo no efluente recebido na ETE .....	62
Tabela 6 – Resultados da caracterização pré e pós digestão.....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AOAC	Association of Official Analytical Chemistry
API	American Petroleum Institute
CMMAD	Comissão Mundial para o Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos
GWh	Gigawatt-hora
HPA	Hidrocarbonetos Poli Aromáticos
NBR	Norma Brasileira
PUCRS	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
SF	Sólidos Fixos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2 Justificativa</b> .....	<b>15</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Sustentabilidade e Energia</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2 Fontes Renováveis de Energia</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Biogás</b> .....	<b>22</b>
<b>2.4 Estação de Efluentes Petroquímicos</b> .....	<b>26</b>
<b>2.4.1 Tratamento Preliminar e Primário</b> .....	<b>27</b>
<b>2.4.2 Tratamento secundário</b> .....	<b>28</b>
<b>2.4.3 Tratamento terciário</b> .....	<b>30</b>
<b>2.5 Lodo Biológico gerado no tratamento de efluentes</b> .....	<b>30</b>
<b>2.5.1 Características do Lodo Biológico</b> .....	<b>31</b>
<b>2.5.2 Destinação final de lodos</b> .....	<b>34</b>
<b>2.5.3 Digestão Anaeróbia de lodo biológico</b> .....	<b>36</b>
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1 Área de Estudo: Pólo Petroquímico do Sul – Triunfo/RS</b> .....	<b>40</b>
<b>3.2 Amostragem do Lodo Biológico para os experimentos</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3 Avaliação Quantitativa e Qualitativa do Biogás gerado</b> .....	<b>43</b>
<b>3.3.1 Experimento 1</b> .....	<b>44</b>
<b>3.3.2 Experimento 2</b> .....	<b>46</b>

3.3.2 Experimento 3 .....	47
3.4 Análises físico-químicas realizadas durante os experimentos.....	48
3.5 Caracterização do lodo biológico .....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	51
4.1 Experimento 1 .....	51
4.2 Experimento 2 .....	55
4.3 Experimento 3 .....	58
4.4 Resultados da caracterização do lodo antes e após a digestão anaeróbia .....	63
5 CONCLUSÃO .....	65
REFERÊNCIAS .....	67

## 1 INTRODUÇÃO

O uso da energia gerada através de fontes renováveis vem ganhando espaço a medida que cenário atual vem mostrando que a disponibilidade das fontes não renováveis é limitada, além dos impactos ambientais gerados pela sua exploração, processamento e consumo. Para acompanhar o crescimento da demanda por energia criada pelos hábitos atuais adotados pela sociedade, o sistema de geração de energia deve seguir em crescimento, atentando para a adoção de matrizes apropriadas às necessidades e aos recursos ambientais disponíveis.

A energia renovável proveniente da biomassa, chamada de bioenergia, vem apresentando um crescimento rápido e progressivo na matriz energética de muitos países, trazendo ganhos ambientais como a redução de emissão de gases do efeito estufa e a diminuição do uso de combustíveis fósseis.

A biomassa é caracterizada por subprodutos de transformações naturais ou industriais, como resíduos de poda e de cultivos agrícolas, lodos de estação de tratamento de efluentes, resíduos orgânicos e dejetos de animais. O biogás produzido a partir da digestão anaeróbia da matéria orgânica presente na biomassa trata-se de uma fonte alternativa de energia.

A digestão anaeróbia é realizada nos biodigestores, que nada mais são que reatores onde o material orgânico é decomposto por bactérias produtoras de metano, que passam pelos processos de hidrólise, fermentação e oxidação anaeróbia, resultando no final do processo, efluente tratado e biogás.

No tratamento de efluentes o processo biológico é realizado com o objetivo de remover a carga orgânica e nutrientes e é nesta etapa que ocorre a

geração de lodo, biomassa que contém os microrganismos que se alimentaram do efluente. O lodo proveniente das etapas biológicas é denominado lodo biológico ou lodo secundário.

O lodo biológico apresenta em média 5% de sólidos e suas características dependerão do tipo de processo que o efluente foi gerado. Para fins de destinação adequada, o lodo biológico deve ser caracterizado com base na norma ABNT NBR 10.004/2004 para definição de sua classificação como perigoso ou não perigoso, pois muitas vezes são encontrados componentes indesejáveis no lodo, como metais pesados, microrganismos patogênicos e poluentes orgânicos persistentes, conhecidos como POPs.

Os poluentes orgânicos persistentes são compostos altamente estáveis e que persistem no meio ambiente, resistindo à degradação química, fotolítica e biológica, geralmente de origem das indústrias químicas, incluindo petroquímicas. Os metais pesados também substâncias indesejáveis, pois tornam o resíduo tóxico, assim como os microrganismos patogênicos que trazem ao resíduo característica infectante.

Para disposição final do lodo na própria área da empresa são utilizadas práticas que utilizam o solo como substrato para decomposição do resíduo, também conhecidas como *landfarming*, onde o lodo aplicado é degradado biologicamente na camada superior do solo.

A digestão anaeróbica é um dos principais métodos usados para gerar biogás a partir de resíduos orgânicos como lodos de estações de tratamento de águas residuárias, pois além de promover a estabilização do lodo biológico produz energia que pode ser consumida na própria ETE.

Levando em conta a alta carga orgânica do lodo biológico gerado na Estação de tratamento de efluentes, é considerada a hipótese de que este material possa ser degradado através da digestão anaeróbia para geração de biogás. Ainda se espera que o lodo possa apresentar alteração em sua composição após ser submetido a digestão, por exemplo a degradação de poluentes orgânicos que possam estar presentes neste resíduo.

Dentro deste contexto o trabalho tem como objetivo avaliar a digestão anaeróbia do lodo biológico proveniente de uma ETE Petroquímica, quanto ao seu potencial de geração de biogás e redução dos contaminantes presentes.

A seguir segue o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

### **1.1 Objetivo geral**

O objetivo do trabalho é realizar a digestão anaeróbia do lodo biológico proveniente de uma ETE Petroquímica para quantificar e qualificar o biogás gerado e verificar a concentração dos contaminantes presentes após a digestão.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- ❖ Realizar a digestão anaeróbia em escala laboratorial utilizando como substrato o lodo biológico e avaliar quantitativamente e qualitativamente a produção de biogás;
- ❖ Analisar as características físico-químicas do lodo biológico durante os experimentos de digestão anaeróbia;
- ❖ Caracterizar do lodo biológico pré e pós-digestão anaeróbia, para fins de classificação de periculosidade, segundo a ABNT NBR 10.004/2004 que define Resíduo Perigoso e Não-perigoso.

### **1.3 Justificativa**

O presente estudo visa explorar uma alternativa energética renovável utilizando como fonte uma biomassa que é considerada um resíduo no tratamento de efluentes de uma ETE Petroquímica, o lodo biológico, agregando valor a este resíduo. O processo de digestão anaeróbia possibilita a geração do biogás através de substratos que contem matéria orgânica, em que se enquadra o lodo da ETE em questão, mas é necessário quantificar e qualificar o biogás gerado para verificar a viabilidade de incluir a digestão do lodo para aproveitamento energético.

O estudo busca oferecer uma avaliação quanto as características químicas do lodo biológico após o processo de digestão com o objetivo de

verificar se houve mudança na periculosidade do resíduo após ser submetido ao processo e assim prever outras destinações possíveis.

A digestão anaeróbia realizada em lodo biológico oriundo de uma ETE Petroquímica foi pouco explorado, e no Rio Grande do Sul são poucos os estudos realizados nessa vertente, tanto na área da energia das biomassas quanto na caracterização de substratos depois de submetidos a digestão, contribuindo com o conhecimento nessas áreas.

Após esta seção introdutória, esta dissertação apresenta quatro capítulos principais: referencial teórico; metodologia, resultados e discussões e considerações finais.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Suprir as demandas energéticas de maneira menos impactante ao meio ambiente tem sido discutido em todo o mundo, assim como o atendimento a requisitos legais no que diz respeito a resíduos.

A partir do estudo da literatura e demais dados disponíveis têm-se o objetivo de verificar e compreender sobre a energia, tipos de energias renováveis, o biogás gerado pela energia das biomassas, o lodo gerado em estações de tratamento de efluentes e suas características e sobre a digestão anaeróbia.

### **2.1 Sustentabilidade e Energia**

Com o constante crescimento da população e da industrialização houve uma maior necessidade do uso dos recursos naturais e como consequência, o meio ambiente já não consegue manter o equilíbrio ecológico de maneira adequada. Assim são necessárias práticas sustentáveis que impactem menos o meio ambiente, vindo ao encontro do desenvolvimento sustentável (RIBEIRO; SILVA, 2014).

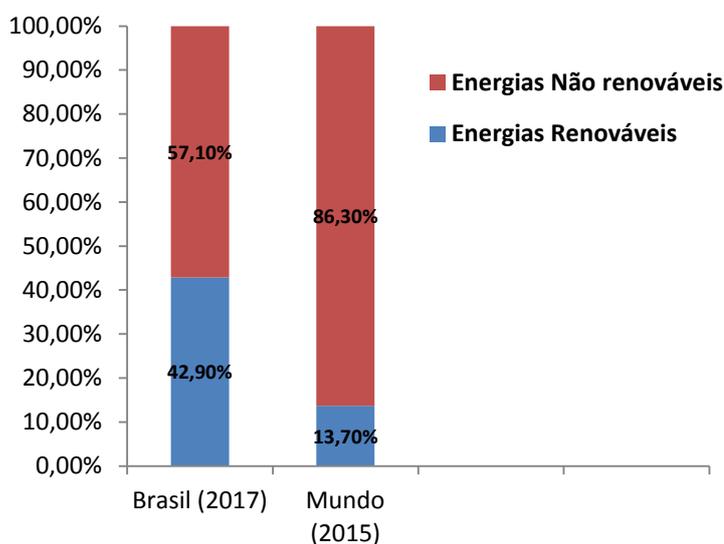
A Organização das Nações Unidas, através do relatório Nosso Futuro Comum, publicado pela Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento em 1987, elaborou o conceito para o termo desenvolvimento sustentável como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” (CMMAD, 1988).

O conceito de desenvolvimento sustentável também foi firmado na Agenda 21, documento desenvolvido na Conferência “Rio 92” e incorporado em outras agendas mundiais de desenvolvimento que também definiu três princípios básicos a serem cumpridos: desenvolvimento econômico, proteção ambiental e equidade social (BARBOSA, 2008).

Um importante setor que vem adotando práticas sustentáveis é o setor de produção de energia através da biomassa, biocombustíveis e utilização de energias renováveis (RIBEIRO; SILVA, 2014). A realidade tem mostrado que a disponibilidade de energia, considerando as fontes não renováveis, é limitada, além dos impactos da exploração, processamento e o uso dessas energias ao meio ambiente, o que vem movendo a busca por novas propostas para a eficiência energética e o uso de fontes renováveis de energia (PUCRS, 2010).

O Brasil apresenta sua matriz energética renovável acima da média mundial, sendo a geração de energia hidráulica a mais utilizada atualmente. O Gráfico 1 mostra a comparação da matriz energética brasileira (2017) e a mundial (2015) renovável e não renovável (EPE, 2018).

Gráfico1 - Matriz Energética Brasileira 2017 e Mundial em 2015

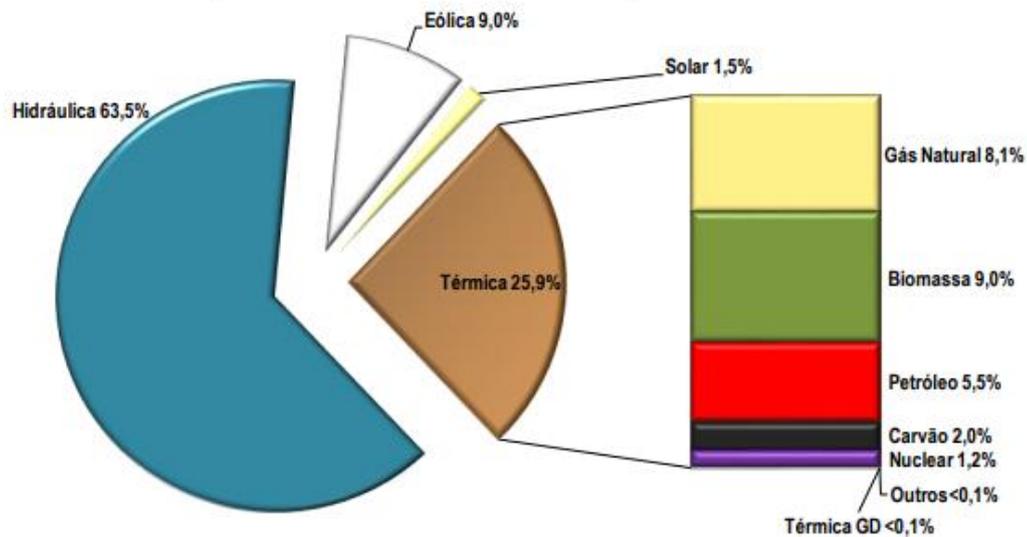


Fonte: EPE (2018).

Quanto aos dados referentes a matriz elétrica, as fontes renováveis chegam a 83% da capacidade instalada de geração de energia elétrica brasileira

em fevereiro de 2019 (Hidráulica + Biomassa + Eólica + Solar), como pode se observar na Figura 1.

Figura 1- Matriz de capacidade instalada de Geração de Energia Elétrica no Brasil: Fevereiro/2019



Fonte: Ministério de Minas e Energia (2019).

## 2.2 Fontes Renováveis de Energia

Segundo Dupont, Grassi e Ramitti (2015), um dos segmentos que mais tem recebido destaque e relevância mundial no que tange à sustentabilidade é a questão energética. Para acompanhar o ritmo de crescimento é necessário o planejamento em relação a capacidade de renovação dos recursos relacionados a geração de energia. No Brasil, a Lei nº 10.438/2002, que trata sobre o Proinfa – Programa de Incentivo as fontes alternativas- trouxe incentivo à participação de fontes alternativas renováveis: pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas, termossolar e fotovoltaica, biomassa e outras fontes renováveis na produção de energia elétrica.

A energia eólica denomina-se a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento) e o aproveitamento desta energia ocorre através da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com

o emprego de turbinas eólicas, também chamadas de aerogeradores, ou através de cataventos e moinhos para trabalhos mecânicos, como bombeamento de água (ANEEL, 2002). A eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 42.373 GWh em 2017, equivalente a um crescimento de 26,5% em relação ao ano anterior, quando se atingiu 33.489 GWh (EPE, 2018).

No caso da energia solar, a radiação pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, através de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico. A irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro varia de 4.200 a 6.700 kWh/m<sup>2</sup>/ano, e é superior às verificadas em outros países que utilizam a energia solar para a geração de energia elétrica como, por exemplo, a Alemanha com 900 a 1.250 kWh/m<sup>2</sup> /ano, a França 900 a 1.650 kWh/m<sup>2</sup> /ano; e a Espanha 1.200 a 1.850 kWh/m<sup>2</sup> /ano (ANEEL, 2002).

Outra energia considerada de fonte renovável é a energia hidrelétrica, que segundo a ANEEL (2002), para ser produzida é necessário integrar a vazão do rio a desníveis de relevo (naturais ou artificiais). Para isso são construídas as usinas hidrelétricas, que são definidas como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é o aproveitamento do potencial hidráulico de um manancial com a finalidade de gerar energia elétrica (ELETROBRÁS, 2018).

A energia hidrelétrica também pode gerar impactos negativos, pois influenciam diretamente no meio ambiente devido à construção das represas, que provocam inundações em áreas de matas, interferem no fluxo de rios, destroem espécies vegetais, prejudicam a fauna, e interferem na ocupação humana, além da vegetação da área inundada entrar em processo de decomposição e liberar metano na atmosfera (INATOMI; UDAETA, 2005).

A energia das biomassas dá origem a chamada bioenergia, que utiliza a biomassa como matéria prima para a produção de combustíveis, energia que vem apresentando um crescimento rápido e progressivo na matriz energética de muitos países (RIBEIRO e SILVA, 2014). No Brasil, dados do EPE (2015, 2016,

2017, 2018), mostram o crescimento do uso da energia das biomassas: de 7,3% em 2014, 8,0 % em 2015, 8,2 % em 2016 e 8,5 % em 2017.

A biomassa destinada ao aproveitamento energético é uma fonte primária de energia, não fóssil, que consiste em matéria orgânica de origem animal ou vegetal. As biomassas para fins energéticos podem ser classificadas como biomassa energética florestal, seus produtos e subprodutos ou resíduos; biomassa energética da agropecuária, as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal e rejeitos urbanos (EPE, 2018).

De acordo com Konrad et al. (2016), a biomassa residual caracteriza-se como subprodutos das transformações naturais ou industriais, como resíduos de poda e de cultivos agrícolas, lodos de estação de tratamento de efluentes, resíduos orgânicos e dejetos de animais. Segundo a ANEEL (2002), a energia gerada através das biomassas tem a vantagem de permitir o aproveitamento direto através da combustão em fornos, caldeiras, entre outros pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento das tecnologias de conversão, como a gaseificação e a pirólise.

O tratamento e o aproveitamento energético de dejetos orgânicos podem ser feitos através da digestão anaeróbia em biodigestores, onde o processo é favorecido pela umidade e aquecimento. O aquecimento é provocado pela própria ação das bactérias, mas em regiões ou épocas de frio pode ser necessário calor adicional, visto que a temperatura deve ser de pelo menos 35 °C (ANEEL, 2002).

Em termos energéticos, o produto final da digestão anaeróbia das biomassas é o biogás, que tem como constituinte principal o metano, além de outros gases como o gás carbônico e o gás sulfídrico que são variáveis em função da composição do resíduo e das condições do reator. O biogás gerado será mais energético quanto maior for seu teor de metano (CASSINI et al., 2003).

Para gerar energia elétrica a partir do biogás, é necessário que ocorra sua combustão controlada, em que a energia química será transformada em térmica

ou mecânica, que por sua vez, ativa um gerador que a converte em energia elétrica. Entre as tecnologias mais utilizadas atualmente para esse fim destacam-se os motores de combustão interna – Ciclo Otto e as microturbinas a gás (ICLEI, 2010).

O biogás também pode ser aproveitado como combustível veicular, com a vantagem de utilizar resíduos como fonte geradora e a reduzir as emissões dos gases do efeito estufa (CATANEO, 2015), mas para que possa ser utilizado deve haver a conversão de biogás em biometano para permitir o uso direto em veículos (RABONI; URBINI, 2014). A conversão do biogás é realizada através da purificação que remove o sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono (KARLSSON et al., 2010).

### **2.3 Biogás**

A digestão anaeróbia foi reconhecida como um método bioquímico de geração de biogás que pode converter compostos orgânicos em uma fonte sustentável de energia (SIDDIQUI; WAHID, 2018). Segundo Deublin et al., (2011), o biogás produzido a partir da digestão da matéria orgânica presente em efluentes, resíduos domésticos, industriais e agropecuários, representa uma fonte alternativa e renovável de energia cada vez mais utilizada em todo o mundo.

Assim como em outros mercados de energia renováveis, a introdução desta tecnologia se deu nos últimos 15 anos de maneira mais significativa através do fomento de governos europeus, por meio da estruturação da cadeia de fornecedores e da criação de linhas de créditos para implantação de biodigestores industriais (DEUBLIN et al., 2011).

Na Europa, a Alemanha é o país que tem feito os maiores progressos neste domínio, pelo desenvolvimento dos processos de digestão anaeróbia (e co-digestão) de matrizes orgânicas selecionadas. O Reino Unido é o segundo maior produtor da Europa com 84 % do biogás proveniente de aterros sanitários e o restante produzido em estações de tratamento de esgotos (digestão do lodo) (RABONI; URBINI, 2014).

A biodigestão anaeróbia é uma técnica de conversão energética da biomassa que ocorre por meio de processos naturais de fermentação, pela ação de microrganismos anaeróbios que degradam a matéria orgânica e produzem o biogás (XAVIER; LUCAS JÚNIOR, 2010). O biogás é constituído por uma mistura de gás metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Para que o biogás possa ser produzido a partir de materiais orgânicos, são necessários grupos de microrganismos, que atuam juntamente com uma série de fatores, como, por exemplo: pH, temperatura e tipo de substrato (KARLSSON et al., 2010).

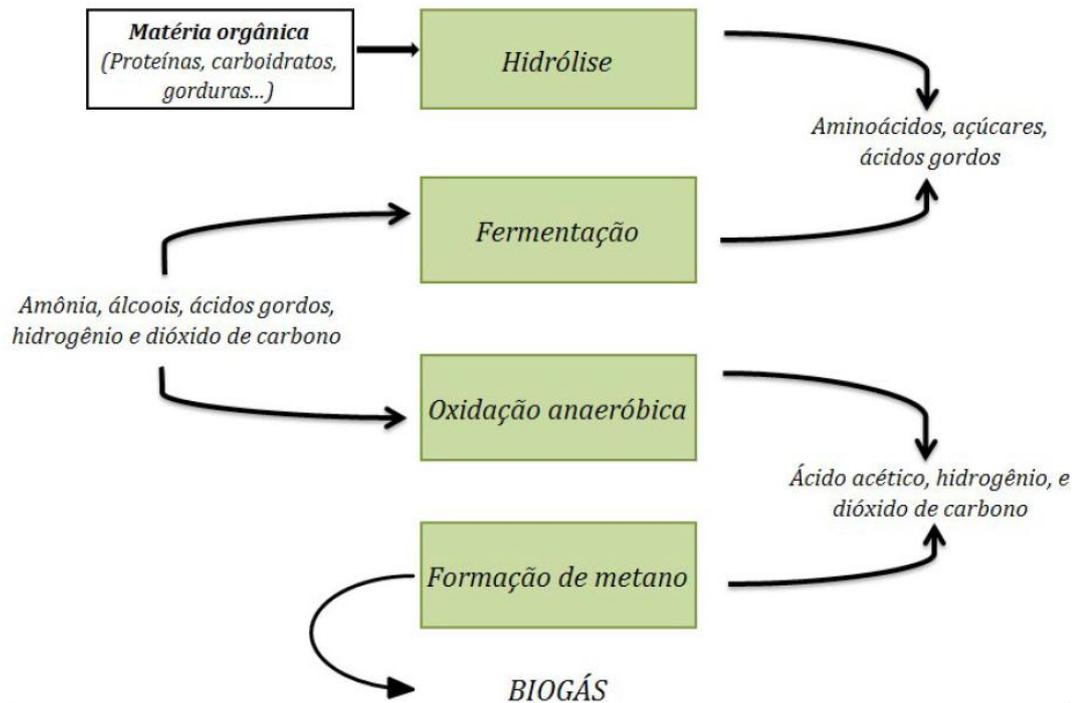
De acordo com Cavalcanti (2016), a respiração anaeróbia pode ser representada de forma simplificada através da reação:  $DQO_{removida} = CH_4 + CO_2 + H_2O$ . Para efluentes como de cervejarias, bebidas e condensados de destilarias, por exemplo, a DQO degradada fica na faixa de 75 – 85 % com produção de 0,40 a 0,45 de CH<sub>4</sub> por Kg de DQO degradada.

Para Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), três tipos de bactérias coexistem mutuamente e são dependentes entre si no processo anaeróbio:

Bactérias acidogênicas hidrolíticas: 1ª fase da digestão anaeróbia realizando a conversão de polissacarídeos, proteínas, gorduras, etc e produzindo ácidos orgânicos e a DQO se mantém inalterada. Bactérias acetogênicas: atacam os compostos produzidos na fase anterior, produzindo ácido acético e hidrogênio gasoso e sobrevivem em relação de simbiose com as bactérias metanogênicas. Bactérias metanogênicas: produzem metano através dos produtos resultantes da fermentação ácida (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Na Figura 2 estão descritas as principais etapas de formação do Biogás: Hidrólise, Fermentação, Oxidação anaeróbia, formação do metano e os compostos envolvidas nas fases do processo.

Figura 2 - Processos de formação do Biogás



Fonte: Karlsson et al., (2010).

De acordo com Konrad et al. (2016), o biogás obtido através da digestão anaeróbia é constituído principalmente por metano (40-75 %) e dióxido de carbono (15-60 %), podendo conter também traços de vapor de água (5-10 %), sulfeto de hidrogênio (0,005- 2 %), siloxanos (0-0,2 %) hidrocarbonetos (<0,6 %), amônia (<1 %), oxigênio (0-1 %), monóxido de carbono (<0,6 %) e nitrogênio (0-2 %). O metano é o gás de maior importância devido ao seu poder calorífico (biogás com 65% de metano tem poder calorífico de 22,353 kJ/m<sup>3</sup>).

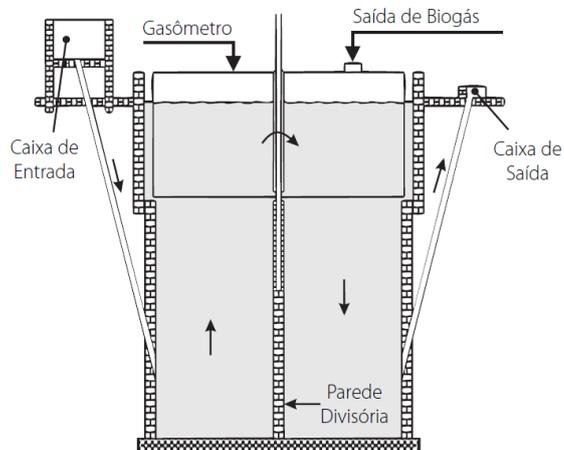
Os biodigestores nada mais são do que reatores anaeróbios, em que o material orgânico é decomposto por bactérias metanogênicas, resultando no final do processo em efluente tratado e biogás. Eles podem ser utilizados para tratar esgotos urbanos, lodos de ETEs, dejetos animais, efluentes e resíduos rurais e industriais que contenham elevada carga orgânica, e outras fontes de biomassa (KARLSSON et al., 2010).

Quanto maior a carga orgânica do material a ser digerido no biodigestor, maior será a produção de biogás, desde que respeitadas as condições

necessárias para seu bom funcionamento (MACEDO, 2005). De acordo com Villela e Silveira (2006), os biodigestores podem utilizados em batelada, onde são carregados de uma só vez e mantidos fechados por um período determinado ou biodigestores contínuos, abastecidos periodicamente. No Brasil são muito utilizados no meio rural biodigestores contínuos modelo Indiano e modelo Chinês, que são indicados para o uso com diferentes resíduos orgânicos animais e vegetais.

No Biodigestor modelo indiano (FIGURA 3), o tanque de fermentação é dividido em duas câmaras e faz com que o material circule por todo o interior do biodigestor. O seu interior possui pressão de operação constante, à medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente. Esse biodigestor indiano é indicado para resíduos com uma concentração de sólidos totais (ST) não superior a 8 %, para facilitar a circulação do resíduo pelo interior da câmara de fermentação (DAGANUTTI et al., 2002 ).

Figura 3 - Biodigestor Modelo Indiano

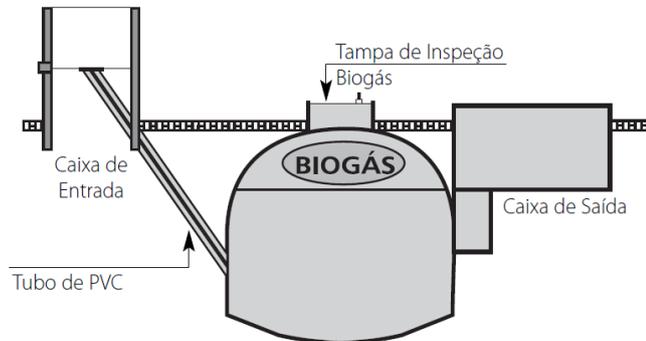


Fonte: CETESB (2006).

O biodigestor modelo Chinês (FIGURA 4), é formado por uma câmara cilíndrica para a fermentação, com teto abobado, impermeável, destinado ao armazenamento do biogás. O aumento de pressão em seu interior resultantes do acúmulo biogás resultam em deslocamentos do efluente da câmara de

fermentação para caixa de saída. Também é indicado para substrato com a concentração de sólidos totais em torno de 8 % (DAGANUTTI et al.,2002 ).

Figura 4 - Biodigestor Modelo Chinês



Fonte: CETESB (2006).

Ainda existem os biodigestores de alta taxa que se baseiam no princípio de acúmulo de biomassa dentro do reator, pela sua retenção ou recirculação. Nesse sistema o lodo é misturado por um sistema específico e a alimentação uniforme, com o bombeamento contínuo do lodo para o digestor, e o biogás é armazenado em coberturas fixas ou flutuantes (CETESB, 2006).

## 2.4 Estação de Tratamento de Efluentes Petroquímicos

Os efluentes petroquímicos são gerados a partir de indústrias envolvidas principalmente na refinação de petróleo bruto, fabricação de combustíveis, lubrificantes e intermediários petroquímicos, esses efluentes são considerados uma importante fonte de poluição ambiental, por conter compostos de óleo e graxa, juntamente com muitos outros compostos orgânicos tóxicos. (DIYA'UDDEN; DAUD; DAUD, 2011).

Os efluentes gerados no Polo Petroquímico do Sul se dividem em orgânicos e inorgânicos. De acordo com Zen (2013), Os efluentes líquidos orgânicos são compostos por:

Águas residuais contendo a matéria-prima principal ou produto, rejeitos de processo; águas provenientes de derrames, vazamentos, transbordamento, lavagem de equipamentos e de áreas em geral, que se caracterizam por ser de natureza orgânica; águas contaminadas de drenagem pluvial, que se caracterizam por ser de natureza orgânica;

esgoto sanitário; purgas que se caracterizam por ser de natureza orgânica (ZEN,2013).

Dentro dos efluentes orgânicos também são tratados lixiviados de aterros sanitários, que segundo Miao et al. (2019), são efluentes complexos gerados a partir da percolação da água através dos resíduos em decomposição, que normalmente apresentam altas concentrações de amônia e orgânicos, além de compostos biodegradáveis e metais pesados.

Os efluentes líquidos inorgânicos são despejos de correntes mais limpas do processo que exigem apenas pequenas correções e um polimento final. Compreendem:

Purgas das torres de resfriamento; águas provenientes da condensação de vapor; água de lavagem de tanques e preparo de reagentes; água de drenagem pluvial contaminado que se caracterize por ser de natureza inorgânica (ZEN, 2013).

Na estação de tratamento, os efluentes orgânicos exigem um tratamento mais complexo através de processo biológico, etapa que não é necessária para o efluente inorgânico (CORSAN, 2018). A seguir serão descritas as etapas de tratamento na ETE.

#### **2.4.1 Tratamento Preliminar e Primário**

O tratamento preliminar e primário realizado na chegada dos efluentes petroquímicos é o gradeamento, medição de vazão, separação de água e óleo e equalização para homogeneização dos efluentes (CORSAN, 2018).

Na primeira etapa de tratamento os componentes heterogêneos como sólidos suspensos e partículas grosseiras do efluente são removidos mecanicamente por meio de gradeamento (DIYA'UDDEN; DAUD; DAUD, 2011), podendo ser utilizadas grades grossas, médias e finas, de acordo com o a retenção de sólidos desejada e necessária. Assim, sólidos maiores que as aberturas entre as grades ficam retidos no início do processo e podem ser removidos de forma manual ou mecanizada antes do encaminhamento do efluente a Calha Parshall, para medição da vazão (MACEDO, 2010).

No caso de efluentes da indústria petroquímica, onde as concentrações de óleo são elevadas é necessário fazer a separação, para isso utilizam-se

separadores API ou tanques de separação (DIYA'UDDEN; DAUD; DAUD, 2011), nestes separadores o efluente sofre duas separações e o óleo é coletado em uma caixa externa ao separador. Após a separação do óleo é importante a equalização do efluente, para regular vazões e homogeneizar o efluente tornando uniforme os parâmetros de pH, temperatura, turbidez, sólidos, DBO, DQO, cor, entre outros, antes do efluente ser encaminhado ao tratamento secundário (NUNES, 2004).

#### **2.4.2 Tratamento secundário**

Após o tratamento primário o efluente é encaminhado para o tratamento secundário, onde se utilizam os tratamentos biológicos com o objetivo de remover o conteúdo orgânico, especialmente a matéria orgânica carbonácea (DBO, DQO, COT), remover nutrientes, e reduzir parcialmente ou totalmente compostos orgânicos tóxicos conhecidos como poluentes prioritários ou persistentes (CAVALCANTI, 2016).

As modalidades mais conhecidas de tratamento biológico são as aeróbias como o lodo ativado, filtro biológico, disco biológico e os anaeróbios como reatores UASB -Upflow Anaerobic Sludge Blanket ou RAFAs - Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (CAVALCANTI, 2016). Estes sistemas resultam em efluentes tratados clarificados e com alta remoção da carga orgânica, mas é necessário consumo de energia e o controle operacional do sistema (NUNES, 2004).

Para tratamento de águas residuais contendo benzeno, há possibilidade de utilizar tratamentos aeróbios e anaeróbios. A vantagem do uso de processo anaeróbio é a alta capacidade de degradação de poluentes orgânicos, menor produção de lodo, baixo consumo de energia e produção do biogás, que é considerado como uma fonte de energia. Por outro lado os reatores anaeróbios requerem uma manutenção mais rigorosa e operadores qualificados (URRAHMA; DANISHKHAN; HALDER, 2018).

Os sistemas de lodos ativados são tratamentos aeróbios de fluxo contínuo, que Segundo Von Sperling (2005), tem como objetivo remover matéria orgânica e eventualmente nutrientes (nitrogênio e fósforo). No interior dos

reatores é desenvolvida alta concentração de biomassa através do retorno do lodo do decantador secundário, que volta a ativar as reações bioquímicas de remoção da matéria orgânica carbonácea e nitrogenada (NUNES, 2004).

Os lodos ativados podem ser divididos em fluxo contínuo ou batelada, e convencionais ou de aeração prolongada (VON SPERLING, 2002). Os processos com aeração prolongada, de acordo com Macedo (2010), são sistemas onde o lodo e o efluente permanecem mais tempo no reator aeróbio que nos processos convencionais. Enquanto nos lodos ativados convencionais o lodo permanece de 4 a 10 dias, nos sistemas de aeração prolongada a permanência da biomassa é de 20 a 30 dias e o tempo de residência do efluente é de 16 a 24 horas.

Em sistemas com aeração prolongada a idade do lodo é de 20 a 40 dias, por isso diz-se que o lodo está digerido (VON SPERLING, 2005). A vantagem destes sistemas é que ocorre a estabilização do lodo no próprio reator, não havendo necessidade de etapas subsequentes para estabilização do lodo, pois sendo o tempo de retenção maior, a disponibilidade de matéria orgânica diminui, fazendo com que os microrganismos consumam o próprio material celular (MACEDO, 2010).

O lodo excedente que não recircula mais no retorno do processo de lodos ativados com aeração prolongada já sai estabilizado, com redução de matéria orgânica e de sólidos voláteis. Após a etapa de aeração o efluente é encaminhado para o decantador secundário para separação dos sólidos da água decantada (VON SPERLING, 2002).

O lodo pode ser desaguado em sistemas de desidratação, antes de sua disposição final através de leitos de secagem, filtros-prensa, centrífugas, lagoas de lodo, *landfarming*. O lodo seco (semi-sólido) quando classificado como não-perigoso pela ABNT NBR 10.004/2004 pode ser destinado em *landfarming*, incinerado, encaminhado para aterros sanitários e compostagem (NUNES, 2004). O processo de *landfarming*, segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency – USEPA),

também pode ser utilizado para tratamento na biodegradação de hidrocarbonetos.

### **2.4.3 Tratamento Terciário**

A etapa final do tratamento de efluentes é utilizada para remoção de poluentes específicos, usualmente tóxicos ou não biodegradáveis ou ainda remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário (VON SPERLING, 2005).

As lagoas de estabilização utilizadas como tratamento terciário podem ser facultativas, anaeróbias, aeradas e de maturação e ainda a combinação destas. As lagoas de estabilização facultativas, retêm os efluentes por um período de tempo longo, para que os processos naturais de estabilização da matéria orgânica se desenvolvam (SOUZA, 2011). Essa variante de lagoa é a mais simples e consiste na retenção do efluente por um período de tempo longo o suficiente para que os processos naturais de estabilização da matéria orgânica se desenvolvam (VON SPERLING, 2002).

Nas lagoas facultativas o efluente entra por uma extremidade e sai pela extremidade oposta. Durante o período de permanência do líquido na lagoa, que varia de 15 a 30 dias, a matéria orgânica em suspensão (DBO particulada) tende a decantar, constituindo o lodo de fundo (MACEDO, 2010). O efluente final é disposto em solo de acordo com a Lei N° 7.691, de 7 de julho de 1982.

## **2.5 Lodo Biológico gerado no tratamento de efluentes**

Segundo Macedo (2010), o lodo gerado no tratamento biológico apresenta em média apenas 5 % de sólidos e 95 % de água. As etapas de tratamento para o lodo dependerão do tipo de processo do qual o mesmo é proveniente. Assim, em sistemas anaeróbios e em sistemas aeróbios com aeração prolongada, onde o lodo já sai estabilizado, será necessário um menor número de operações que nos casos onde o lodo ainda precise ser estabilizado. De forma geral, o tratamento de lodos abrange os seguintes processos:

Adensamento: concentração dos sólidos, geralmente por decantação, para redução do volume do lodo. Estabilização: remoção da matéria orgânica através da redução de sólidos voláteis. Condicionamento:

preparação para desidratação. Desidratação: remoção de umidade para redução de volume. Disposição final: destinação final dos lodos tratados, que pode ser um aterro sanitário ou sistema de compostagem e posterior utilização dos bio sólidos (MACEDO, 2010).

Segundo Metcalf e Eddy (1991), lodos biológicos originários de sistemas de lodos ativados de aeração prolongada são caracterizados pela predominância de microrganismos aeróbios que se alimentam da matéria orgânica do efluente. Eles são compostos por sólidos e água, e os sólidos totais se dividem em sólidos em suspensão e dissolvidos que por sua vez são divididos também em fixos e voláteis.

De acordo com Metcalf e Eddy (1991), pode-se ter a seguinte relação de sólidos nos lodos:

- ❖ Lodos digeridos: sólidos voláteis (SV)/ sólidos totais (ST)= 0,6 a 0,65 – O processo de digestão já removeu os sólidos orgânicos biodegradáveis do lodo.
- ❖ Lodos não digeridos: sólidos voláteis (SV) /sólidos totais (ST)= 0,75 a 0,80 – ainda há sólidos orgânicos biodegradáveis no lodo.

Em uma E.T.E. com lodo ativado convencional e com produção de lodo primário, quando misturado ao excesso de lodo ativado e em condições anaeróbias é convertido em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , conhecido como processo de digestão anaeróbia. Para uma digestão satisfatória o lodo deve estar com concentração de sólidos de 4 a 8 % e ainda deve-se ter o controle sobre as substâncias inibidoras como metais pesados, hidrocarbonetos, organoclorados, entre outros. (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

A inclusão de uma etapa anaeróbia em um processo aeróbio pode melhorar a eficiência global da redução da carga orgânica e ainda possibilitar a geração e aproveitamento do biogás, para casos onde a matéria orgânica não está estabilizada (MACEDO, 2010).

### **2.5.1 Características do Lodo biológico**

O lodo biológico compreende a biomassa de microrganismos aeróbios a qual está em constante crescimento pela entrada contínua de matéria orgânica

nos reatores. Para manter equilíbrio, parte da biomassa é descartada no processo de tratamento secundário de efluentes e sofrerá uma decomposição anaeróbia em condições não controladas (VON SPERLING, 2005).

Segundo Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), muitas vezes são encontrados componentes indesejáveis no lodo, como metais pesados que incluem Prata (Ag), Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre(Cu), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Antimônio (Sb), Selênio (Se), Zinco (Zn). O As, Co, Cr, Se, Zn em certas quantidades são essenciais aos organismos. O Pb, Hg, Cd são prejudiciais em qualquer concentração e estão inseridos na lista de substâncias que conferem periculosidade ao resíduos, juntamente com Cr, As, Sb e Ni (ABNT, 2004).

Podemos citar os lodos provenientes de tratamentos de esgoto, que são resíduo que apresentam característica de patogenicidade, pela possível de microorganismos patogênicos, proteínas virais, ácido desoxiribonucléico (ADN) ou ácido ribonucléico (ARN) recombinantes, organismos geneticamente modificados, plasmídios, cloroplastos, mitocôndrias ou toxinas capazes de produzir doenças em homens, animais ou vegetais (ABNT, 2004).

Os poluentes orgânicos persistentes, conhecidos como POPs, também são substâncias indesejáveis no lodo biológico, pois se tratam de compostos altamente estáveis e que persistem no meio ambiente, resistindo à degradação química, fotolítica e biológica (OLIVEIRA, 2011), além de possuírem características carcinogênicas, mutagênicas e teratogênicas, geralmente de origem das indústrias químicas como de plásticos, farmacêuticas, de pesticidas, ferro e aço, do petróleo, entre outras. Alguns exemplos destes compostos são: cianeto, fenóis, tolueno, etilbenzeno, xileno, clorofórmio entre outras (ANDREOLI, VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Em se tratando de lodos biológicos oriundos de ETEs petroquímicas podem ter características específicas, devido ao conteúdo existente na NAFTA. De acordo com ficha de informações de segurança de produto químico (FISPQ), a nafta petroquímica é uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos, olefínicos, naftênicos e aromáticos, principalmente de 4 a 10 átomos de carbono, muitos

deles se enquadram como HPAs – hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Alguns dos HPAs citados como o naftaleno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo (a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoranteno, benzo (k)fluoranteno, benzo(a)pireno, indeno[1,2,3-ed]pireno, dibenzeno[a.h]antraceno também estão previstos na ABNT NBR 10.004/2004 como substâncias que conferem periculosidade a resíduos.

O lodo é definido como resíduo sólido, dentro da norma técnica ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004):

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

Os resíduos sólidos são classificados em resíduos Classe I – perigosos e resíduos Classe II – não perigosos que são divididos em resíduos não inertes – Classe IIA e resíduos inertes – Classe IIB, de acordo com sua periculosidade. A periculosidade de um resíduo é apresentada em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, que trazem risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; e/ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada (ABNT, 2004).

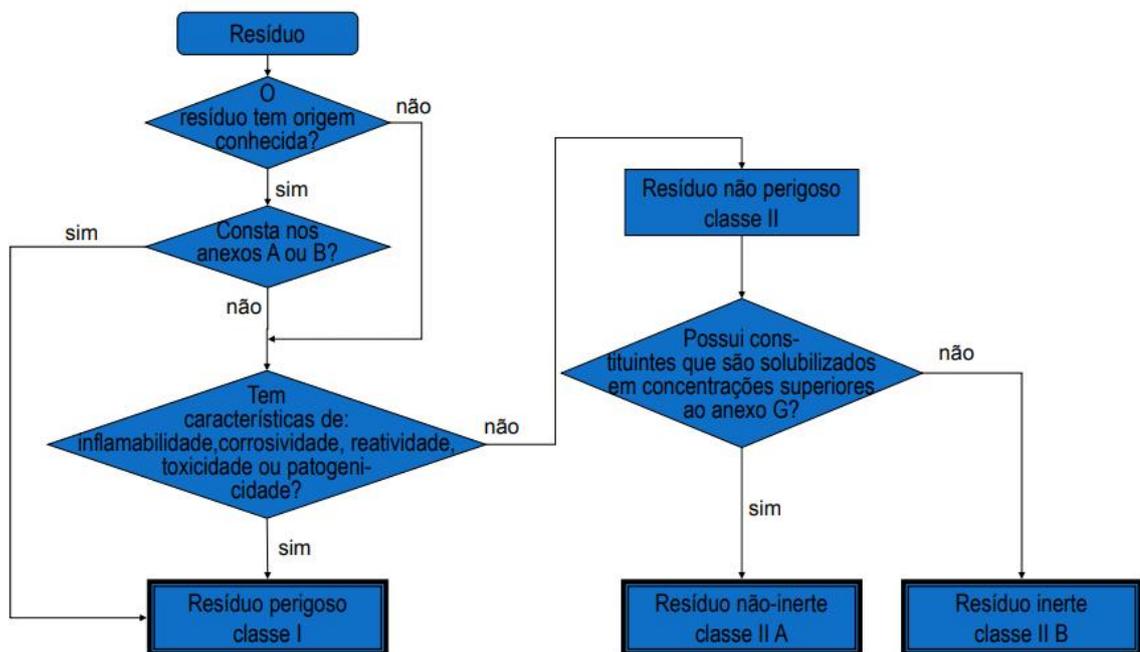
Para determinação da classificação de resíduos através da ABNT NBR 10.004/2004 são utilizadas as Normas ABNT NBR 10.005/2004 para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados como Classe I – perigosos - e Classe II – não perigosos e a ABNT NBR 10.006/2004 para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados como Classe II A - não inertes – e Classe II B – inertes.

Para classificação do resíduo deve ser levado em consideração o processo ou atividade que lhes deu origem, seus constituintes e características, e a comparação destes com as listagens de substâncias perigosas, cujo impacto

a saúde e ao meio ambiente é conhecido. Os resíduos quando enquadrados como perigosos tem características de inflamabilidade, corrosividade reatividade, patogenicidade e toxicidade (ABNT, 2004).

A Figura 5 demonstra o fluxo definido na norma para caracterização e classificação de periculosidade de resíduos.

Figura 5 - Caracterização e classificação de resíduos



Fonte: ABNT (2004).

### 2.5.2 Destinação final de lodos

Conforme o enquadramento do lodo biológico dentro da normatização descrita – perigoso ou não perigoso, têm-se as opções de disposição final deste resíduo. A disposição direta de lodos sem qualquer tipo tratamento em solo agrícola contamina água subterrânea escoada para corpos hídricos ocasionando na diminuição do oxigênio dissolvido na água, incremento da matéria orgânica, aumento da demanda bioquímica de oxigênio e adição de nutrientes responsáveis por processos de eutrofização quando estão em excesso (CONTIN et al., 2012).

Normalmente o lodo é composto por água, matéria orgânica e células microbianas, e no caso de lodos provenientes de estação de tratamento de esgoto, ou efluentes oriundos de processos com alta carga orgânica, possuem aproximadamente 75 % de água, se tratando de matéria seca são compostos principalmente por matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio, entre outros compostos em menores proporções (TAO et al., 2012).

De acordo com Cavalcanti (2016), os lodos podem ser dispostos dentro da área da própria empresa (“*on site*”) ou em instalações terceiras licenciadas (“*off site*”), como segue abaixo no Quadro 1 alguns exemplos de disposição final de lodos.

Quadro 1 - Alternativas para disposição final de lodos

<b>Disposição <i>on site</i></b>	<b>Disposição <i>off site</i></b>
<i>Landfarming</i>	Aterros para resíduos industriais Coprocesso em fornos cimenteiros Incineração biopilhas

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Cavalcanti (2016).

A disposição final do lodo utilizada é para descarte, ou seja, são utilizadas práticas que utilizam o solo como substrato para decomposição do resíduo, também conhecida como *landfarming* (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

No método *landfarming* o substrato orgânico é degradado biologicamente na camada superior do solo (ABNT, 1997). Nesta técnica, os microrganismos da camada superficial do solo são estimulados a degradar os poluentes transformando-os em substâncias inertes como CO<sub>2</sub> e água, mediante ao revolvimento do solo e uso de aração, adição de nutrientes e, se necessário, de irrigação, bioaugmentação e surfactantes (COSTA, 2015).

O processo *landfarming* é um biorreator do tipo aberto, o que faz com que as condições ambientais frequentemente adversas afetem diretamente a

atividade microbiana e as características dos resíduos. Fatores como temperatura, umidade, aeração, relação de nutrientes (C:N:P) e pH desfavoráveis podem retardar ou até inibir a atividade microbiana deste sistema (ORANTAS, 2013).

A aplicação em solo agrícola é utilizada em alguns casos, mas é problemática devido a necessidade de um tratamento rigoroso da qualidade do lodo, que não pode conter substâncias químicas tóxicas e agentes patogênicos (BETTIOL; CAMARGO, 2000), assim as técnicas de reaproveitamento e estudos sobre a sua utilização como fonte de energia a partir do seu emprego na digestão anaeróbia vem sendo desenvolvidos.

Stefaniuk et al. (2018), comenta que lodos de estações de tratamento que tratam efluentes contém altos teores de matéria orgânica e nutrientes e que também conter vários poluentes incluindo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs), que neste caso apresenta risco ao meio ambiente quando aplicados em solo, assim soluções devem ser buscadas para diminuir a concentração dos compostos no lodo ou um tratamento que permita a sua aplicação.

### **2.5.3 Digestão Anaeróbia**

Segundo Von Sperling (2005), o processo de digestão anaeróbia no tratamento de esgotos já é utilizado desde o final do século 19, para a estabilização da matéria orgânica presente no esgoto, mas tem sido utilizado em várias outras aplicações como no tratamento de efluentes industriais e estabilização de lodos. De acordo com Ramírez et al. (2010), a digestão anaeróbia é um dos principais métodos usados para gerar biogás a partir de resíduos orgânicos e em estações de tratamento de águas residuárias.

A degradação biológica também é a principal rota para eliminação dos HPAs de ambientes contaminados, nos últimos anos os processos biológicos tem sido amplamente estudados para otimizar o potencial de biodegradação destes compostos, pois ainda são consideradas tecnologias mais econômicas para este fim (SAYARA et al., 2010).

No Brasil o uso de biodigestores é pequeno e restrito a poucas aplicações em comparação a outros países, foram identificados 153 distritos brasileiros que possuíam biodigestores para tratamento do lodo de suas ETEs (ICLEI, 2010). O CENBIO (Centro Nacional de Referência em Biomassa) de São Paulo e a SANEPAR no Paraná, vêm desenvolvendo pesquisas com o objetivo de demonstrar a viabilidade da utilização do biogás de estações de tratamento de esgoto urbano para gerar eletricidade e servir de modelo para outras ETEs no Brasil.

A Estação de Tratamento de Esgotos Alegria – CEDAE/RJ, operada pela Companhia Estadual de Água e Esgoto do Rio de Janeiro, utiliza o processo de lodos ativados e digestão anaeróbia e desidratação mecânica do lodo por meio de centrífugas. Os produtos finais desse processo são água de reuso, biossólidos e biogás (CEDAE, 2017). Outro exemplo a ser citado é a ETE Boliver, na Austrália, que produz 87 % da energia consumida utilizando biogás gerado a partir de biossólidos (lodos gerados no processo de tratamento) (SANTOS, 2017).

A produção de biogás e o tratamento do lodo foram estudados por meio de experimentos de co-digestão e modelagem usando cinco diferentes lodos de indústrias: de celulose, química, petroquímica, automotivo, e de processamento de alimentos situadas no Complexo Industrial de Ulsan, Coreia do Sul. Neste caso o objetivo do estudo foi analisar os efeitos de interação entre os lodos para obter o máximo de rendimento possível na produção de metano utilizando a diversidade de resíduos existente e não apenas um substrato. (MAHANTY et al., 2014)

Segundo Roy et al. (2016), resíduos orgânicos de alta resistência a degradação das indústrias podem ser tratados por digestão anaeróbia para redução da massa, redução da demanda química de oxigênio (DQO) e para aproveitamento do biogás. A digestão anaeróbia foi utilizada para reduzir o conteúdo de matéria orgânica em lodos de ETE petroquímica e de refinaria utilizando co-digestão com outros resíduos petroquímicos, demonstrando uma redução significativa no teor de sólidos.

De acordo com o ICLEI (2010), para avaliar a viabilidade de instalações de biodigestores deve-se responder a algumas questões iniciais, como segue descrito na Tabela 2.

Quadro 2 – Avaliação da Viabilidade de Instalação de Biodigestores

<b>Avaliação</b>	<b>Medição</b>
Potencial de geração de biogás	Vazão (m <sup>3</sup> /hora)
Tempo de geração	Contínuo ou variável conforme operação da ETE
Demanda de energia elétrica	Local de consumo
	Qual a demanda (Kw/h)
Investimento necessário para implantação	Valor (R\$)
Prazo para retorno do investimento	Anos
Riscos de impactos ambientais e sociais	Avaliação de Impactos ambientais da implantação de biodigestores

Fonte: Adaptado pelo autor com base em ICLEI (2010).

As ETEs que utilizam processos de tratamento aeróbios não geram metano no tratamento dos efluentes, porém, o lodo gerado neste tratamento ainda apresenta elevada carga orgânica, que pode ser tratada por processo anaeróbio em um biodigestor, gerando biogás (ICLEI, 2010).

No processo da digestão anaeróbia existe uma grande variedade de substâncias tóxicas responsáveis pela falha destes sistemas. Pode ocorrer o acúmulo dos ácidos orgânicos produzidos no primeiro estágio do processo que podem causar instabilidades, assim como variações bruscas dos fatores ambientais do processo como: pH, temperatura, nutrientes, carga orgânica e a presença de agentes inibitórios que incluem elevadas concentrações de amônia, sulfatos e de metais pesados (CHEN et al., 2016).

Os compostos tóxicos podem ter diferentes efeitos sobre os microrganismos dos sistemas anaeróbios, podendo ter um efeito bactericida quando as bactérias não suportam a presença do contaminante, ou bacteriostático quando as bactérias conseguem se adaptar sob determinadas concentrações do contaminante tóxico, resistindo e recuperando-se à atividade normal após um determinado tempo (AMANI et al., 2010).

Podem ser citados alguns compostos tóxicos inorgânicos como o cromo, cromatos, arsênio, cianeto, entre outros, que se presentes mesmo em baixas concentrações, são adversos ao tratamento anaeróbio, porém, podem ser tolerados quando estão combinados com sulfetos, formando compostos que são insolúveis (sais de sulfeto), sem efeito adverso ao processo (SALOMON, 2007; VITORATTO, 2004).

As quantidades excessivas de metais pesados podem levar à inibição do processo de digestão (CHEN et al., 2014). Além disso, os metais pesados não são biodegradáveis e podem acumular-se em concentrações potencialmente tóxicas, causando perturbações na produção de biogás e na remoção orgânica e até mesmo falha do digestor (CHEN et al., 2008).

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

A seguir será descrita a metodologia utilizada para atingir os objetivos do trabalho.

#### **3.1 Área de Estudo: Pólo Petroquímico do Sul – Triunfo /RS**

No Pólo Petroquímico do Sul, localizado em Triunfo-RS, há diversas indústrias instaladas que produzem polietileno, polipropileno, borracha sintética, metiletilcetona, etilbenzeno, estireno e poliestireno (COFIP, 2017) e aromáticos, tais como benzeno, tolueno e xilenos (CERQUEIRA, 2011).

Os efluentes gerados nas plantas são enviados a uma estação de tratamento de efluentes (ETE) petroquímicos, que possui um sistema composto por unidades operacionais complexas, incluindo processo biológico (lodos ativados com aeração prolongada) e polimento final (tratamento terciário através de oito lagoas em série). Além do recebimento dos efluentes industriais, a estação recebe o esgoto sanitário das indústrias e lixiviados de aterros sanitários.

Na Figura 6 visualiza-se a Estação de Tratamento de Efluentes do Pólo Petroquímico do Sul, que realiza o tratamento primário, tratamento secundário (biológico) e o tratamento terciário.

Figura 6 - Estação de Tratamento de Efluentes do Pólo Petroquímico do Sul



Fonte: CORSAN (2018)

No processo biológico de tratamento, denominado lodo ativado, é gerado o lodo biológico, em torno de 400 m<sup>3</sup>/mês (TEDESCO; GIANELLO; GIASSON, 2004). Este lodo é disposto pelo método *landfarming*, em 21,6 hectares de disposição na área da empresa (NOLAN, 1982). A Figura 7 mostra a aplicação do lodo pela técnica *landfarming*.

Figura 7 - Aplicação de Lodo pela técnica *landfarming*



### 3.2 Amostragem do Lodo Biológico para os experimentos

O lodo biológico excedente gerado no tratamento é encaminhado ao *landfarming* de acordo com as condições climáticas e volume gerado. Antes da aplicação fica armazenado em um tanque de estocagem de lodo (TEL), conforme mostra a Figura 8, neste local foram realizadas as coletas de amostras para todos os experimentos.

Figura 8 - Tanque de estocagem de lodo



As amostras coletadas no TEL foram encaminhadas no mesmo dia ao Laboratório de Biorreatores Tecnovates para realização dos experimentos, prevendo manter as características originais do lodo para os testes. Os frascos de coleta utilizados foram devidamente higienizados e identificados para evitar contaminações da amostra com outras substâncias e dúvidas quanto ao seu conteúdo. As amostras não testadas de imediato no laboratório foram mantidas sob refrigeração. Na Figura 9 pode-se visualizar uma das coletas de amostra realizadas.

Figura 9 - Amostra coletada para o experimento



As amostras testadas foram coletadas no período de outubro/2018 a abril/2019.

### 3.3 Avaliação Quantitativa e Qualitativa do Biogás gerado

Para avaliar a geração de biogás do lodo biológico proveniente da ETE petroquímica foram realizados 3 Experimentos no Laboratório de Biorreatores Tecnovates – UNIVATES.

Os experimentos seguiram a seguinte ordem:

- ❖ **Experimento 1:** Amostra de lodo testada com inóculo preparado e em triplicata utilizando o protocolo VDI 4630, em reatores de 1 litro.
- ❖ **Experimento 2:** experimento contínuo, iniciado com inóculo preparado, seguido de 20 alimentações com o lodo coletado em 14/11/18. Utilização de reatores de 5 litros.
- ❖ **Experimento 3:** experimento contínuo, iniciado utilizando como inóculo o digestato do Experimento 2, seguido de 28 alimentações com lodo coletado semanalmente durante o período do experimento.

### 3.3.1 Experimento 1

O Experimento 1 foi realizado em triplicata, utilizando reatores de vidro de 1litro e as premissas adotadas para o ensaio foram com base em protocolo delineado pela normativa alemã VDI 4630 - *Fermentation of organic materials: characterisation of the substrate, sampling, collection of material data and fermentation tests* (2006). A partir do ensaio VDI, foi possível determinar o Potencial Bioquímico de Biogás (PBB) e o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) referente ao substrato e ainda calcular o rendimento estimado de produção de Metano.

Assim, o PBB e o PBM foram calculados de acordo com a Equação abaixo:

$$PBB \text{ ou } PBM = \left( V_s - V_b \times \left( \frac{mSV_{is}}{mSV_{ib}} \right) \right) / mSV_s$$

Em que:

- ❖  $V_s$ : Volume acumulado (biogás ou metano) do substrato com inoculo (amostra);
- ❖  $V_b$ : Volume acumulado (biogás ou metano) do branco (somente inoculo);
- ❖  $mSV_{is}$ : massa de sólidos voláteis correspondentes ao inoculo na amostra;
- ❖  $mSV_{ib}$ : massa de sólidos voláteis correspondentes ao inoculo no branco;
- ❖  $mSV_s$ : massa de sólidos voláteis correspondentes ao substrato na amostra;

Para calcular o rendimento estimado da produção em  $m^3$  de Biogás por tonelada de biomassa e a produção em  $m^3$  de Metano por tonelada de biomassa se faz o PBB e o PBM multiplicados pela relação  $gSV/g_{Amostra}$ .

Esse experimento ocorreu do dia 19/10/18 até 30/10/18 e para realizá-lo foi utilizado o inóculo preparado pelo Laboratório de Biorreatores. As misturas de inóculo/lodo foram mantidas em uma incubadora bacteriológica, a uma temperatura média de 37 °C conectado a um sistema automatizado de medição de biogás, assim o material incubado foi submetido a condições mesofílicas.

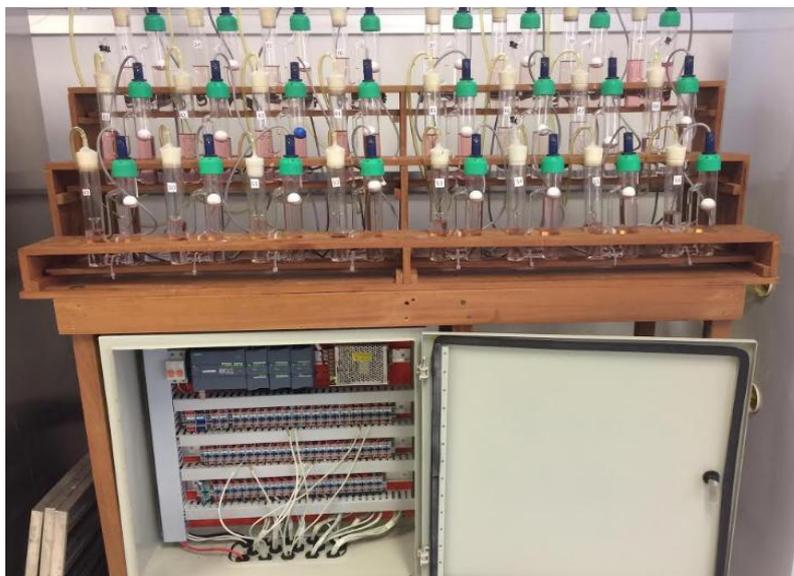
Na Figura 10 segue o sistema de minidigestores, incubadora e tubos de leitura onde foi realizado o experimento.

Figura 10 - Sistema de Mini Digestores, incubadora e tubos de leitura



A quantificação do biogás gerado pelos reatores foi medida pelo deslocamento do fluido, que registra a passagem do biogás pelo sistema por meio de circuito eletrônico. Este sistema utiliza a equação combinada dos gases ideais, que prediz que a relação entre temperatura, pressão e volume de um gás é constante. Na Figura 11 é possível visualizar os tubos de realização e leitura de biogás do experimento.

Figura 11 - Tubo de realização e leitura dos dados do experimento.



Os volumes de biogás gerados nos reatores foram monitorados diariamente através do *download* dos dados do sistema e exportação dos mesmos para planilhas de controle, utilizando o programa Office Excel.

Diariamente foi avaliado o percentual de metano (CH<sub>4</sub>) no biogás utilizando um sensor específico de medição de metano (FIGURA 12), denominado Advanced Gasmitter, produzido pela empresa PRONOVA Analysentechnik GmbH & Co.

Figura 12 - Medidor de Metano



### 3.3.2 Experimento 2

O Experimento 2 foi realizado em reatores com capacidade de 5 litros e com 3500 gramas cada em triplicata, iniciando o ensaio no dia 08/10/18 com o inoculo preparado pelo Laboratório de Biorreatores. As alimentações de 175 gramas cada iniciaram em 17/12/18, assim como as remoções de 175 gramas de digestato a cada alimentação. O lodo utilizado para alimentação foi coletado em 14/11/18, em quantidade suficiente para as 20 alimentações previstas nos 3 reatores, totalizando a troca de todo o volume de material no reator.

O experimento foi realizado em incubadora a 37 °C no mesmo sistema automatizado de medição de biogás utilizado no Experimento 1, e com as medições de metano diárias. Na Figura 13 estão os reatores de 5 litros utilizados para os experimentos contínuos com alimentação.

Figura 13 - Reatores utilizados para o experimento contínuo com alimentação



### 3.3.3 Experimento 3

O Experimento 3 foi realizado em reatores com capacidade de 5 litros e com 3000 gramas, em triplicata, iniciando o ensaio com o digestato do Experimento 2, ou seja, o material que restou nos reatores ao fim do Experimento anterior serviu como inoculo neste experimento.

A fase de aclimação do lodo ocorreu de 31/01/19 até 05/03/19. As alimentações (e remoções) de 150 gramas iniciaram em 06/03/19, utilizando uma nova amostra de lodo a cada semana no decorrer do experimento. Foram 6 amostras coletadas, completando as 28 alimentações em 10/04/19. O experimento atingiu o critério de estabilidade e foi encerrado em 14/05/19.

Esse experimento foi realizado em incubadora a 37 °C no mesmo sistema automatizado de medição de biogás do Experimento 1, e com as medições de metano diárias.

Neste experimento, no dia 06/05/19, foi realizada a coleta de gás para a análise qualitativa do Biogás utilizando o Cromatógrafo Gasoso Clarus 580 GC, marca PerkinElmer (Figura 14) , equipado com Detector Fotométrico de Chama

(FPD) para identificação de H<sub>2</sub>S e com Detector por Condutividade Térmica (TCD) para leitura de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>.

Figura 14 - Cromatógrafo Gasoso

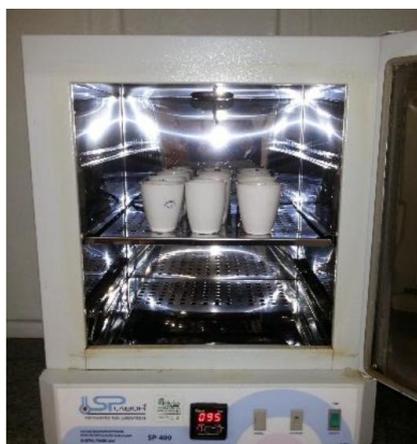


### 3.4 Análises físico-químicas realizadas durante os experimentos

Os substratos utilizados foram analisados quanto aos ST (sólidos totais), SV (sólidos voláteis) e SF (sólidos fixos), pela metodologia descrita por AOAC (1995) e também foram submetidos à medição do pH.

Na análise de ST foram utilizados cadinhos de porcelana previamente calcinados e pesados em balança analítica da marca SHIMADZU, modelo AUW220D com precisão de 0,0001 gramas. Após a pesagem dos cadinhos, 20 mililitros de amostra foram adicionadas ao mesmo e incubados na Estufa Digital Time microprocessada da marca SP LABOR, modelo SP-400, para secagem por calor seco, como segue na Figura 15.

Figura 15 - Estufa utilizada para Sólidos Totais



Os cadinhos foram mantidos na estufa durante 24 horas, na temperatura de 105 °C. Após o término desse período, as amostras foram inseridas em um dessecador, onde após atingirem a temperatura constante foram pesadas, obtendo-se assim, o valor do peso do material seco (AOAC, 1995). Na Figura 16 visualiza-se o dessecador e a balança utilizados nas análises de sólidos.

Figura 16 - Balança e dessecador utilizados na análise de sólidos



Na determinação dos SF (sólidos fixos), o material seco foi inserido no forno do tipo mufla microprocessado, marca SP LABOR modelo SP-1200 (FIGURA 17) a temperatura de 550 °C durante oito horas. Logo após, os cadinhos com a amostra foram mantidos em dessecador e pesados na balança analítica, obtendo-se o peso das cinzas. Assim, a parte da amostra volatilizada durante este processo, foi caracterizada de SV (sólidos voláteis) (AOAC, 1995).

Figura 17 - Forno tipo mufla para análise de sólidos voláteis



A verificação do pH foi realizada através da leitura em medidor de pH da marca TECNAL modelo TEC7, como segue na Figura 18, pelo Método Potenciométrico. A análise consistiu na inserção dos eletrodos de pH e

temperatura na amostra e, após alguns instantes, o valor mostrado no visor do aparelho estabiliza, indicando o valor de pH da amostra

Figura 18 - pHmetro



### 3.5 Caracterização do Lodo Biológico

Foi realizada a caracterização do lodo antes e após a digestão anaeróbia, para verificar a classificação deste resíduo na entrada e no final do processo de digestão. A caracterização foi realizada seguindo a ABNT NBR 10.004/2004, que classifica os resíduos como Perigoso - Classe I e Não – Perigoso - Classe IIA ou Classe IIB,

A caracterização dos resíduos tem como base a avaliação da composição química visando a verificar a corrosividade, inflamabilidade, patogenicidade, reatividade e a toxicidade. Foram realizadas análises físico-químicas dos parâmetros que conferem periculosidade aos resíduos na massa bruta, no extrato lixiviado e no extrato solubilizado.

As análises de caracterização tiveram como objetivo verificar as características químicas do lodo, podendo-se verificar a possibilidade de degradação dos compostos presentes que trazem periculosidade ao resíduo através da digestão anaeróbia.

A coleta de amostra antes da digestão foi realizada em 14/11/18 e foi encaminhada ao laboratório especializado nos ensaios e esse mesmo lodo foi submetido ao Experimento 2, que iniciou as alimentações em 17/12/18. A troca

de todo o material (3500 gramas de lodo de entrada nos reatores) se deu em 18/01/19. No dia 31/01/19 quando houve a estabilização da produção de biogás, o experimento foi encerrado e foi encaminhada novamente uma amostra composta de todos os reatores para o laboratório especializado.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados e discussões obtidos através dos Experimentos realizados durante o estudo.

### 4.1 Experimento 1

A primeira coleta de amostra para avaliação do lodo biológico, no tanque de estocagem realizada em 19/10/18 e apresentou concentração de 3,55% de Sólidos Totais e destes 78,91% são Sólidos Voláteis, com pH 7,43. Com base nestes primeiros dados obtidos verificou-se a possibilidade de geração de biogás através deste substrato, pois o lodo em questão foi considerado não digerido, de acordo com a relação de sólidos voláteis (SV)/ sólidos totais (ST) descrita por Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), o lodo da ETE apresentou a relação igual a 0,79 (Lodos não digeridos = 0,75 a 0,80).

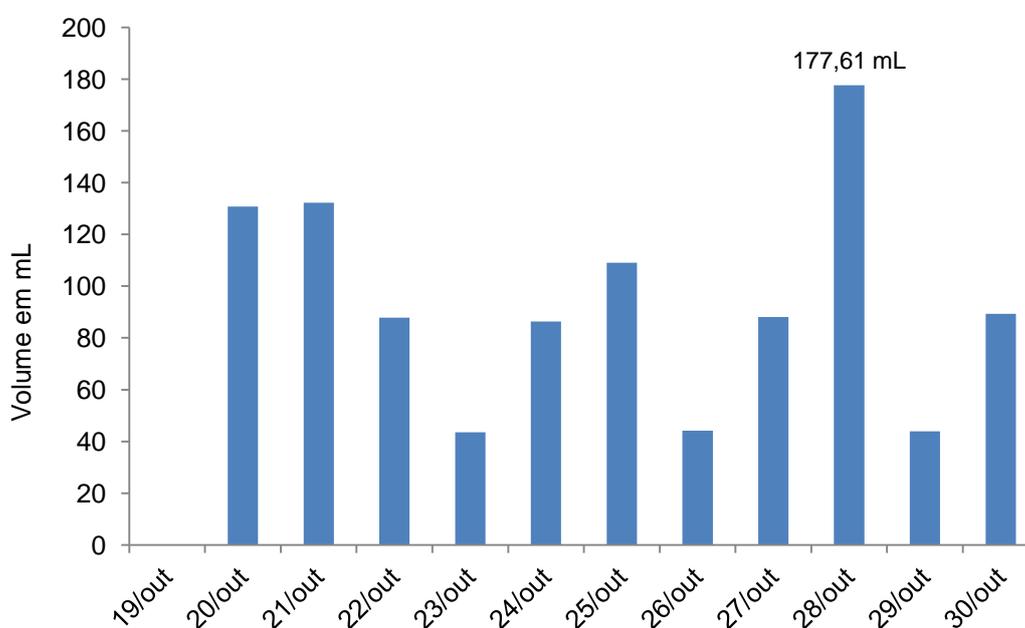
A amostra citada acima foi avaliada previamente através de um experimento utilizando o protocolo VDI 4630, conforme descrito na metodologia. Neste caso foi utilizado o inóculo preparado pelo Laboratório de Biorreatores para dar início a digestão. A Tabela 1 contém resultados analíticos iniciais do Experimento 1.

Tabela 1 - Dados do Experimento 1 - Teor de Sólidos e pH

Dados do Experimento 1		
Inoculo preparado pelo Laboratório de Biorreatores	ST (%):	5,1614
	SV (%):	47,4151
	pH:	8,25
Lodo ETE	ST (%):	3,5523
	SV (%):	78,9169
	pH:	7,43

A partir do experimento realizado obteve-se o Gráfico 2 que demonstra a produção diária de biogás pelo lodo biológico no Experimento 1.

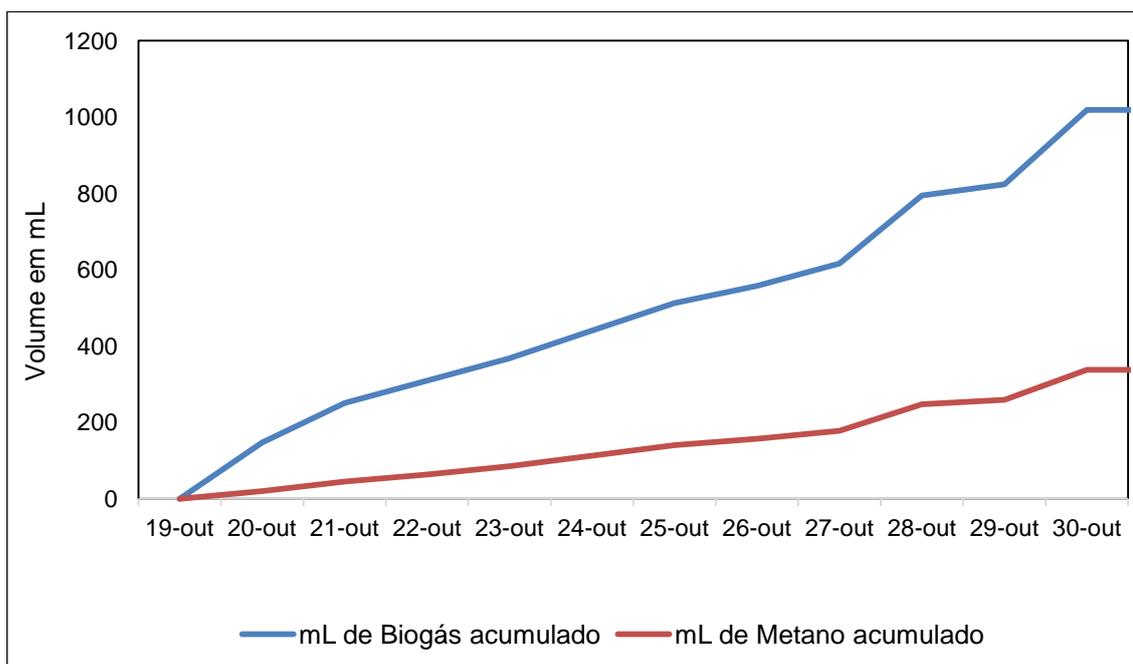
Gráfico 2 - Produção diária de Biogás – Experimento 1



Observou-se que houve oscilações na produção de biogás ao longo do teste, mas o volume diário não chegou aos 200 mL, tendo um pico de produção no dia 28/10/19 com volume de 177,61 mL.

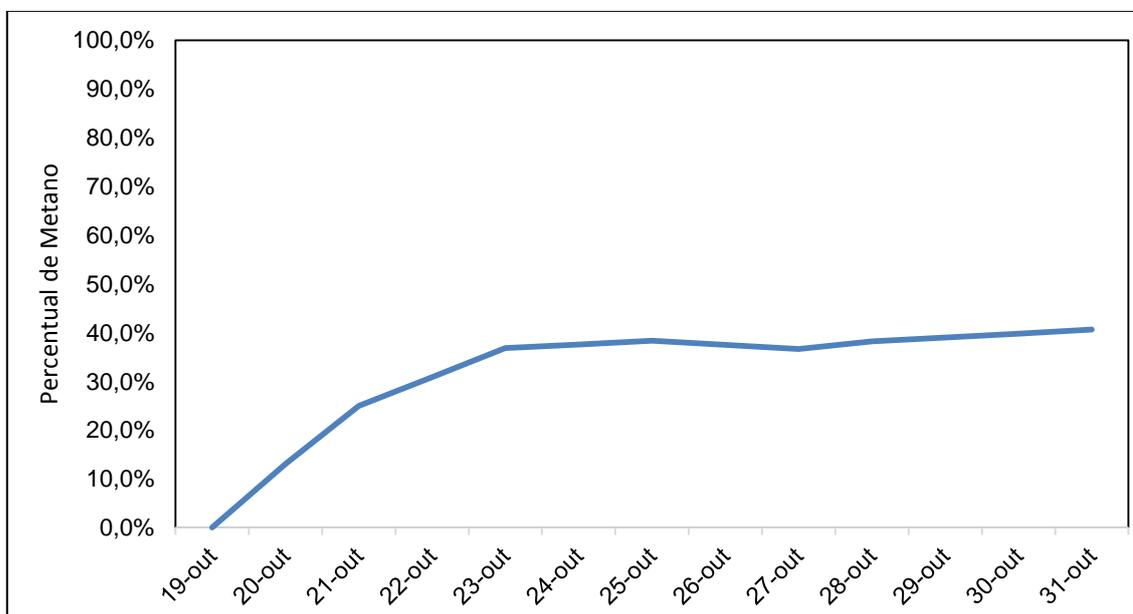
O Gráficos 3 expressa a produção de biogás acumulado ao longo do experimento 1, juntamente com os dados de volume de metano acumulados. Ao final do experimento obteve-se o volume total acumulado de 1032,90 mL de biogás e 338,71 mL de metano, demonstrando um baixo volume de produção de biogás e metano.

Gráfico 3 - Volume Acumulado de Biogás e Metano no Biogás – Experimento 1



Os volumes de produção de biogás e metano se apresentaram baixos, principalmente os volumes de metano com uma média de 33% durante o experimento, o que podemos visualizar com maior detalhe no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Percentual médio de Metano no Biogás - Experimento 1



O percentual de metano resultante do experimento é considerado baixo para fins de aproveitamento energético, já que no geral são obtidos percentuais de 40-75% de metano em digestão anaeróbia de substratos orgânicos (KONRAD et al., 2016).

O Experimento 1 nos deu um panorama inicial do potencial de produção de biogás tendo como resultados preliminares o Potencial Bioquímico de Biogás (PBB), o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) e o Rendimento estimado calculados a partir dos dados obtidos.

$$\text{PBB}_{\text{lodo}} = 45,13 \text{ mL Biogás/gSV}$$

$$\text{Rendimento estimado Biogás} = 45,13 \text{ mL Biogás/gSV} \times 0,028 \text{ g SV/g}_{\text{Amostra}} = 1,26 \text{ m}^3 \text{ Biogás/ton Lodo}$$

$$\text{PBM}_{\text{lodo}} = 25,9 \text{ mL Metano/gSV}$$

$$\text{Rendimento estimado Metano} = 25,84 \text{ mL Metano/gSV} \times 0,028 \text{ gSV/g}_{\text{Amostra}} = 0,7235 \text{ m}^3 \text{ Metano/ton Lodo}$$

ou 1m<sup>3</sup> de Metano é gerado a partir de 1382 Kg de lodo

Em comparação com outros substratos já estudados, o valor do PBB e PBM é baixo, mesmo que o lodo tenha apresentado um bom percentual de sólidos voláteis inicial e com DQO de 34.946 mg/L (CORSAN, 2019). A Tabela 4 mostra a comparação do PBB, PBM e os rendimentos estimados do lodo biológico em comparação com outros substratos já testados por Konrad et al. (2018), um com baixo rendimento e outro com alto rendimento.

Tabela 2 - Comparação de substratos quanto ao desempenho de produção de biogás

Comparação de substratos quanto ao desempenho de produção de biogás					
	PBB (mL Biogás/ gSV)	PBM (mL Metano/ gSV)	Rend. Estimado (m <sup>3</sup> Biogás/ ton biomassa)	Rend. Estimado (m <sup>3</sup> Metano/ ton biomassa)	Referência
Lodo ETE Petroquímica	45,13	25,9	1,26	0,7	Do autor, 2019
Lodo Ativado Laticínios	142,4	51,3	2,7	1,0	Konrad et al., 2018
Dejetos de Suínos (creche)	826,6	482,4	11	6,4	Konrad et al., 2018

Os resultados da Tabela 2 mostraram que, em relação aos dados obtidos no primeiro experimento, o Lodo da ETE Petroquímica não apresentou bom potencial de geração de biogás e metano, pois na comparação com os substratos o lodo apresentou resultados inferiores ao substrato com o menor rendimento trazido pelo autor Konrad et al. (2018).

Fazendo um cálculo com os dados da ETE, tem-se o consumo médio de 0,86 kWh /m<sup>3</sup> de efluente tratado, e a estação tem capacidade para tratar 30.000 m<sup>3</sup>/dia, que consomem 25800 kWh por dia . Para suprir um dia de tratamento necessitaria 2450 m<sup>3</sup> de metano e conseqüentemente 3385 toneladas de lodo, considerando o rendimento estimado encontrado de 1m<sup>3</sup> de metano por 1382 Kg de lodo, e conhecida a relação que 1 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> é igual gera 10,5305 kWh (FILHO; SANTANA;GATTAMORTA, 2018).

## 4.2 Experimento 2

O Experimento 2 foi realizado com alimentações contínuas, simulando o que se aproximaria de um reator em funcionamento em escala ampliada. Nesse experimento o lodo de entrada apresentou 2,41 % de sólidos totais e 74,35 % de sólidos voláteis.

Quanto a produção de biogás neste experimento, teve-se 40 dias para aclimação do inóculo preparado pelo Laboratório de Biorreatores, e após iniciaram-se as alimentações. Na Tabela 3 estão os resultados das análises físico-químicas do lodo coletado em 14/11/19, utilizado para as alimentações.

Tabela 3 - Resultados das análises de pH, ST, SV do lodo de alimentação: Experimento 2

<b>Lodo - Alimentações</b>			
<b>Data</b>	<b>pH Entrada</b>	<b>ST (%)</b>	<b>SV(%)</b>
17/12/2018	6,93	-	-
19/12/2018	6,91	2,32	74,37
20/12/2018	6,89	-	-
21/12/2018	6,92	-	-
26/12/2018	6,97	1,89	73,5
27/12/2018	6,98	-	-
28/12/2018	6,98	-	-

Continua

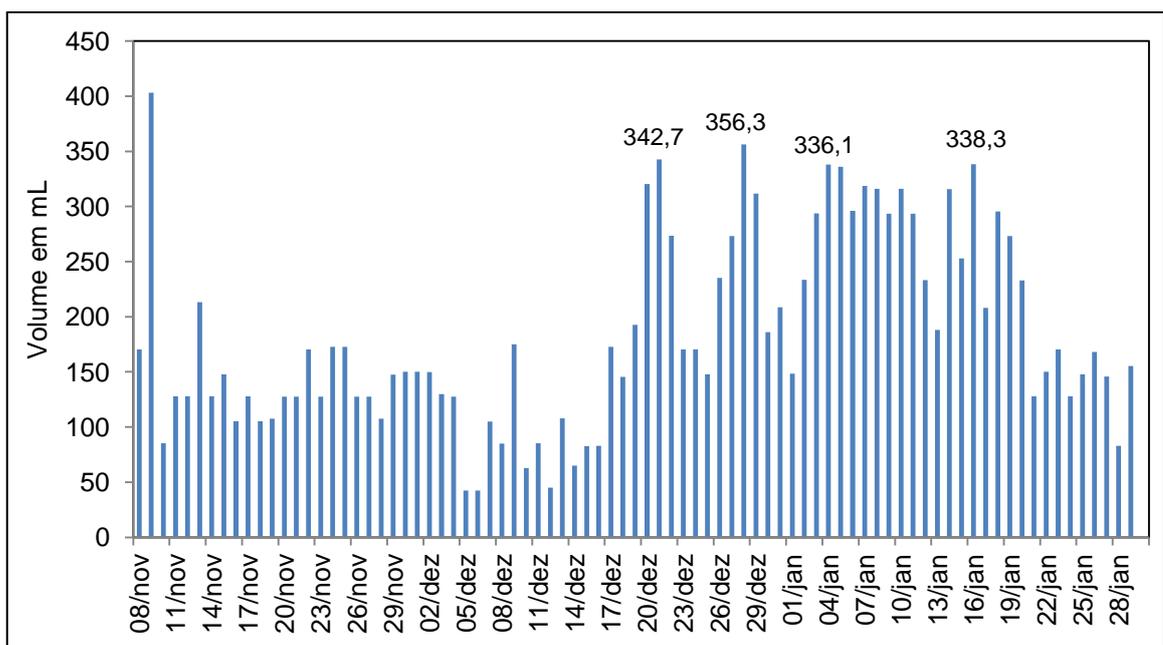
Data	pH Entrada	ST (%)	SV(%)
02/01/2019	6,92	-	-
03/01/2019	6,94	1,83	73,17
04/01/2019	7,02	-	-
07/01/2019	7,03	-	-
08/01/2019	6,76	-	-
09/01/2019	6,87	2,29	74,39
10/01/2019	6,82	-	-
11/01/2019	6,88	-	-
14/01/2019	6,91	-	-
15/01/2019	6,89	-	-
16/01/2019	6,88	2,24	74,27
17/01/2019	6,98	-	-
18/01/2019	6,73	-	-

Conclusão

O lodo manteve as características físico-químicas durante as alimentações, principalmente a concentração de Sólidos Voláteis.

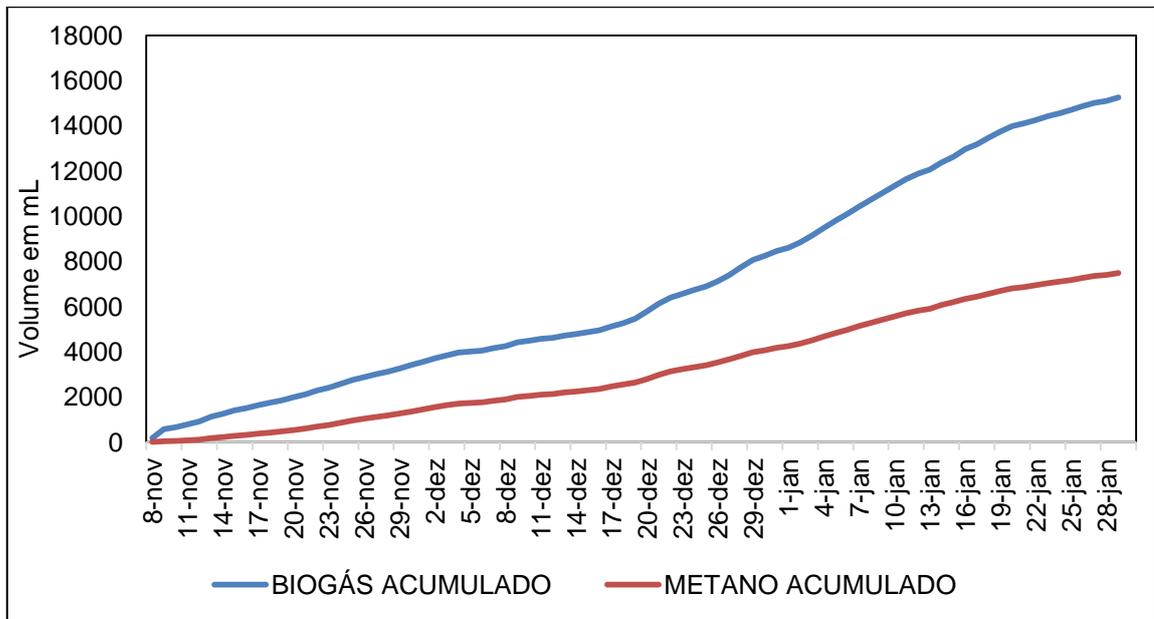
O Gráfico 5 apresenta os volumes diários de biogás gerados durante o Experimento 2, onde pode-se se observar que no período das 20 alimentações, de 17/12/18 a 18/01/19, a produção se manteve mais alta, chegando a picos de 342,7 mL em 21/12/18, 356,3 mL em 28/12/18, 336,1 mL em 05/01/19 e 338,3mL em 16/01/19.

Gráfico 5 - Volumes diários de Biogás- Experimento 2



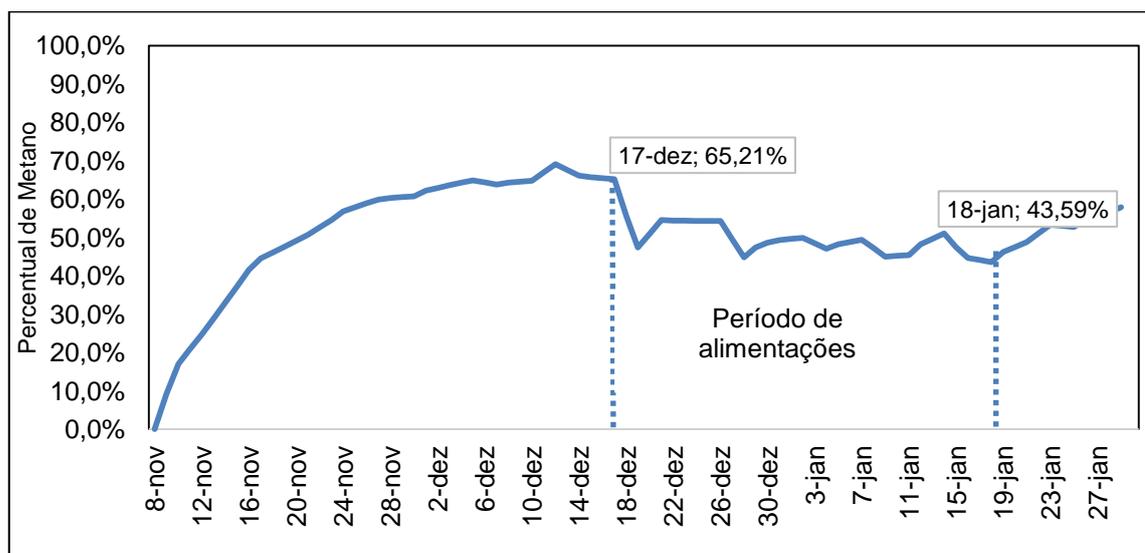
O experimento teve duração de 84 dias e apresentou um volume acumulado de Biogás de 15.251,8 mL e volume acumulado de metano de 7.484,2 mL. O Gráfico 6 demonstra o volume de produção de biogás e de metano no biogás do lodo biológico durante o Experimento 2.

Gráfico 6 - Volume acumulado de Biogás e Metano no biogás - Experimento 2



O Gráfico 6 confirma o aumento da produção de biogás durante o período das alimentações e estabilização após o encerramento destas. Já o percentual de metano durante todo experimento foi de 50,95 % em média, durante as alimentações (de 17/12 a 18/01) manteve-se em 49,64 %, e após as alimentações os percentuais aumentaram com média de 53,02 %, como pode-se verificar com maior detalhe no Gráfico 7.

Gráfico 7- Percentual médio de Metano no biogás - Experimento 2



No Gráfico 7 é possível visualizar o percentual de metano no biogás durante o Experimento 2 e observou-se uma queda no percentual durante o período de alimentações com o lodo, caracterizando uma inibição da produção de metano pelo acréscimo do material, provocada por agentes de inibição presentes na composição do lodo, que serão vistos com maior detalhe no item 4.3 e 4.4.

### 4.3 Experimento 3

O digestado do Experimento 2 foi encaminhado de imediato para o próximo experimento servindo como inoculo de partida, com pH 7,75, 2,44 % de ST e 62,31 % de SV. Após a estabilização do lodo, foram iniciadas as alimentações de 06/03/2019 até 10/04/2019. A Tabela 4 informa os resultados das análises físico-químicas realizadas nas amostras de lodo de alimentação.

Tabela 4 – Resultados das análises de pH, ST, SV do lodo de alimentação

LODO - ALIMENTAÇÕES			
Data	pH Entrada	ST (%)	SV (%)
06/03/2019 (1ª)	7,19	0,38	59,83
07/03/2019	7,27	-	-
08/03/2019	7,49	-	-
11/03/2019	7,35	-	-
12/03/2019	7,50	-	-
13/03/2019 (2ª)	7,54	1,95	71,37
14/03/2019	7,45	-	-

Continua

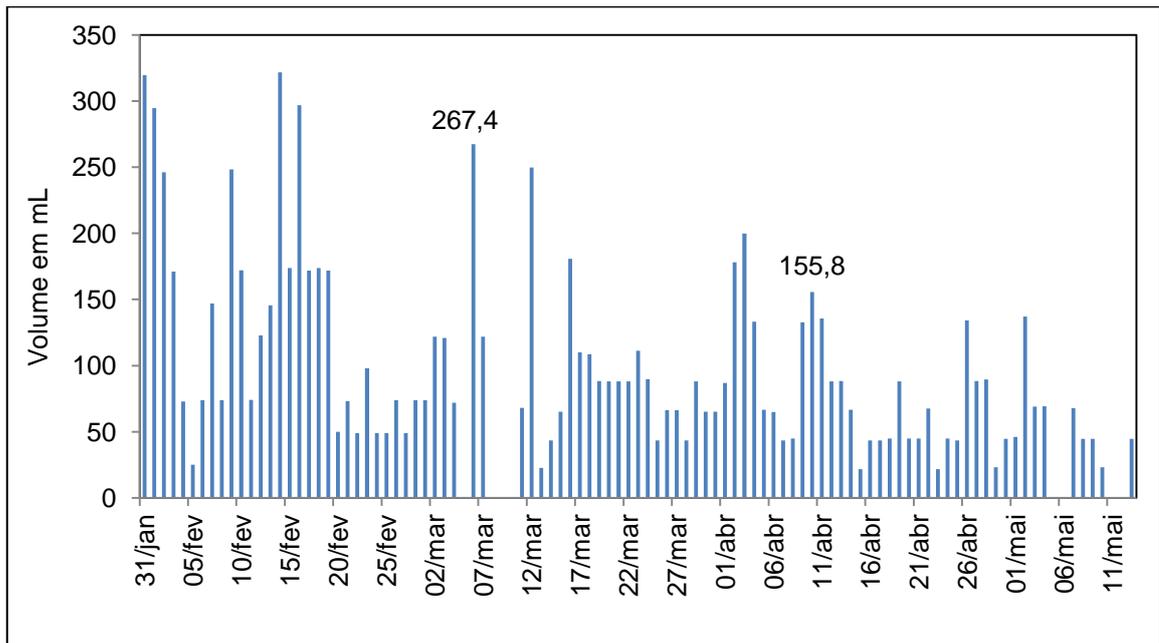
Data	pH Entrada	ST (%)	SV (%)
15/03/2019	7,32	-	-
18/03/2019	7,45	-	-
19/03/2019	7,17	-	-
20/03/2019 (3ª)	7,28	3,35	73,01
21/03/2019	7,07	-	-
22/03/2019	7,35	-	-
25/03/2019	7,19	-	-
26/03/2019	6,88	-	-
27/03/2019 (4ª)	7,14	3,98	73,48
28/03/2019	7,12	-	-
29/03/2019	7,06	-	-
01/04/2019	7,19	-	-
02/04/2019	6,98	-	-
03/04/2019	6,88	-	-
04/04/2019 (5ª)	7,04	1,32	71,81
05/04/2019	6,99	-	-
08/04/2019	6,69	-	-
09/04/2019	6,65	-	-
10/04/2019 (6ª)	6,93	1,34	71,16

Conclusão

Apesar das coletas realizadas terem sido semanais, houve grande variação nas características do lodo quanto aos Sólidos totais (ST). Na prática ocorreram alguns problemas operacionais como na primeira coleta, que foi realizada sem homogeneização do tanque e a terceira e quarta coleta que foram realizadas quando o lodo se encontrava sem aplicação em *landfarming*, provocando um aumento no ST. A segunda e a quinta coleta representam a característica mais comum do lodo no processo, quando está sendo aplicado normalmente.

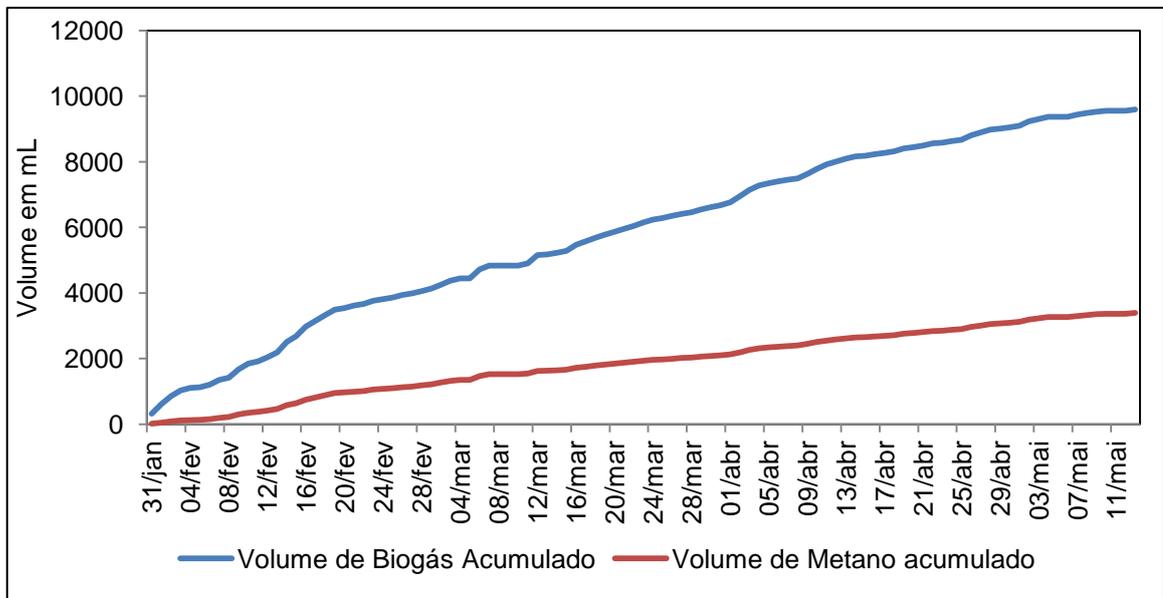
No Gráfico 8 estão os valores de produção de Biogás diários, que se mantiveram maiores durante a aclimatação do lodo no início do experimento. No primeiro dia de alimentação (06/03/2019) obteve-se 267,4 mL de biogás e na última alimentação (10/04/2019) 155,8 mL de biogás.

Gráfico 8 - Volume diário de produção de Biogás – Experimento 3



O Gráfico 9 mostra o volume de biogás e de metano no biogás acumulados no período das alimentações até o encerramento. No total foram 9599,1 mL de biogás acumulados e 3394,4 mL de metano acumulados durante os 104 dias de experimento.

Gráfico 9 - Volume acumulado de Biogás e metano no biogás - Experimento 3

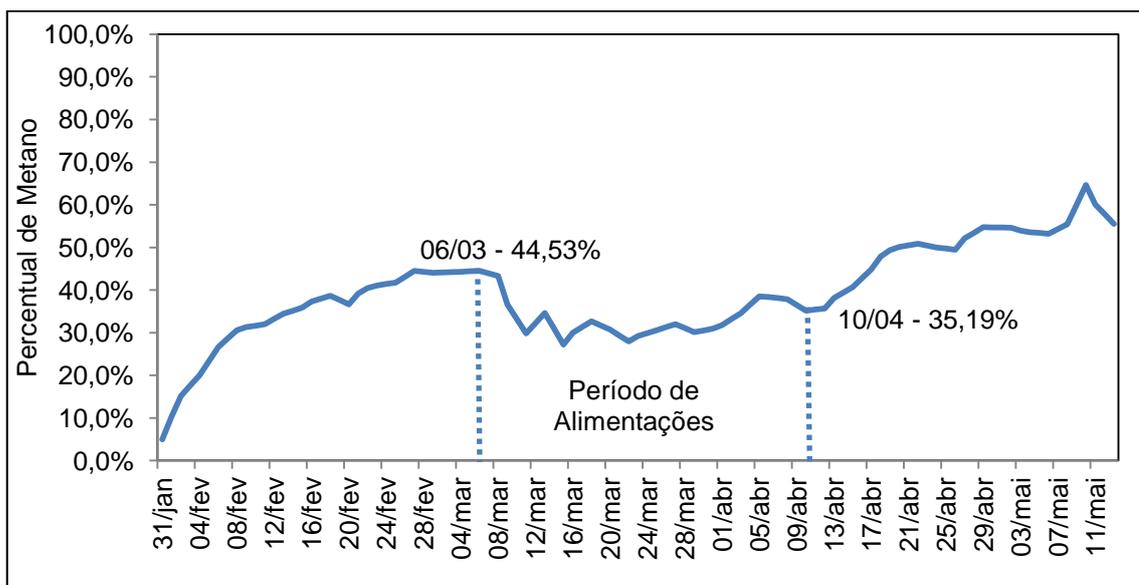


Os Gráficos 8 e 9 mostraram que houve uma baixa produção de biogás e metano durante o experimento como um todo e durante as alimentações não foi observado aumento na produção, apenas manteve-se pouco abaixo comparada

ao período de aclimação do lodo.

Quanto ao percentual de metano, o Experimento 3 apresentou uma média de 39,17 % durante todo o experimento, tendo uma redução nos percentuais na fase de alimentações com média de 33,85 % e a após o encerramento das alimentações a média subiu para 50,66 %, como pode ser evidenciado no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Percentual médio de Metano no Biogás –Experimento 3



No Experimento 3, confirmou-se novamente a inibição da produção de metano durante as alimentações com o lodo biológico e após cessadas o percentual de metano voltou a subir, comprovando que há agentes inibidores no lodo, como será discutido no próximo tópico de caracterização, foi detectado o metal pesado Cromo em altas concentrações, que é uma substância de origem principalmente de lixiviados de aterros sanitários tratados na ETE como pode-se visualizar na Tabela 5.

Tabela 5 – Teores de Cromo nos efluentes recebidos na ETE

	Cromo no Lixiviado de Aterro Sanitário	Cromo no Efluente Petroquímico
Novembro/2018	0,6190 mg/L	0,0199 mg/L
Dezembro/2018	0,6590 mg/L	0,0055 mg/L
Janeiro/2019	0,7070 mg/L	<0,0030 mg/L
Fevereiro/2019	0,5460 mg/L	0,0045 mg/L
Março/2019	1,3400 mg/L	0,0070 mg/L

Fonte: Monitoramentos CORSAN (2018, 2019)

De acordo com Amani et al. (2010), os compostos tóxicos podem ter diferentes efeitos sobre os sistemas de digestão anaeróbia, podendo ter efeito bactericida quando as bactérias não suportam a presença do contaminante, ou bacteriostático quando as bactérias conseguem se adaptar sob determinadas concentrações do contaminante tóxico, resistindo e recuperando-se à atividade normal após um determinado tempo, o que pode explicar o comportamento do lodo nos experimentos realizados em relação as concentrações de Cromo presentes.

A produção de biogás com elevado teor de metano é dependente de vários fatores, como a presença de substâncias ou compostos tóxicos, capazes de inibir o processo de digestão anaeróbia, como pode-se os metais pesados como o cromo. (Chen et al., 2008). Segundo Foresti (1993), a melhor forma de combater agentes tóxicos é com o uso de um agente antagônico, onde um produto tóxico é anulado na presença de outro. A exemplo, o Sódio (Na) e Potássio (K) em mistura se anulam, diminuindo o efeito tóxico de ambos. Dentre os principais agentes inibitórios, Foresti cita os metais pesados. FORESTI, E., 1993 – Notas da aula de Processos e Operações em Tratamento de Resíduos SHS-705, Pós Graduação em Hidráulica e Saneamento na Escola de Engenharia de São Carlos.

De acordo Andreoli, Von sperling e Fernandes (2001) para uma digestão satisfatória deve-se ter o controle sobre as substâncias inibidoras como metais pesados, hidrocarbonetos, organoclorados, entre outros. As quantidades excessivas de metais pesados segundo Chen et al. (2014), podem levar a inibição do processo de digestão, como ocorreu durante os experimentos.

Ao final do Experimento 3, no dia 07/05/19, foram feitas as análises dos gases com Cromatografia, e se obteve os seguintes resultados:

- ❖ CH<sub>4</sub> (Metano): 56,497 %
- ❖ H<sub>2</sub> (Hidrogênio): 0,0004%
- ❖ CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono): 10,458 %
- ❖ O<sub>2</sub> (Oxigênio): 4,811 %
- ❖ N<sub>2</sub> (Nitrogênio): 28,231 %
- ❖ H<sub>2</sub>S (Ácido Sulfídrico): Não detectado

Com o resultado dessa análise confirma-se que o metano, antes do encerramento, estava em percentuais acima de 50 %, ou seja, percentuais mais altos encontrados após o encerramento das alimentações. O percentual de H<sub>2</sub>S não foi detectado na análise, que é um fator favorável a ser considerado, pois se o gás sulfídrico é um gás indesejável quando é propendido o aproveitamento do biogás para energia.

A alta quantidade de gás nitrogênio encontrada na análise do Biogás, quando normalmente as concentrações encontradas ficam na faixa de 0-2 % de N<sub>2</sub>, (KONRAD et al., 2016) carece de mais análises e testes para confirmação e avaliação deste resultado.

#### **4.4 Resultados da caracterização do lodo antes e após a digestão anaeróbia**

As análises de caracterização realizadas com o lodo de entrada e digestato do Experimento 2 foram encaminhadas ao laboratório especializado em classificação de resíduos.

Na Tabela 6 estão expressos os resultados das análises de caracterização do lodo antes e após a digestão anaeróbia contendo apenas os parâmetros que apresentaram alterações nos resultados dentro do escopo da norma ABNT NBR 10.004/2004.

Tabela 6: Resultados da Caracterização do lodo pré e pós digestão

	<b>Lodo pré-digestão</b>	<b>Lodo pós - digestão</b>
Classificação	Perigoso Classe I – Infectante	Perigoso Classe I – Tóxico
pH	7,00	7,75
Umidade	97,0 %	97,4 %
Coliformes termotolerantes	2,7 x 10 <sup>3</sup> NMP/25 g	Ausência
Cromo total	64,0 mg/Kg	481,2 mg/Kg

Na amostra pré-digestão houve detecção de agentes que conferem patogenicidade ao lodo, os coliformes termotolerantes, que após a digestão não

foram mais detectados. Segundo Coté et. al (2006), o tratamento através da digestão anaeróbia, em baixas temperaturas, é eficiente para reduzir populações viáveis de microrganismos indicadores como Coliformes totais e *Escherichia coli*. Neste caso foram realizados testes em dejetos suínos obtendo redução de 97,94 % dos Coliformes totais e 99,67% da *Escherichia coli*.

De acordo com Amaral et al. (2004), a digestão anaeróbia representa uma alternativa para o tratamento de resíduos, pois permite a redução do potencial poluidor e dos riscos sanitários. Pessaro (1995) comenta que no processo de digestão anaeróbia, além do fator temperatura, a combinação de outros fatores também são responsáveis pela inibição e redução de agentes patogênicos, como por exemplo, o pH e a concentração de amônia livre.

Discorrendo sobre a ocorrência do metal cromo, que se trata de um agente tóxico que confere periculosidade ao resíduo, antes e após a digestão o cromo foi detectado. Por se tratar de um metal pesado houve a acumulação dessa substância durante as alimentações, aumentando a sua concentração na composição do resíduo, que apesar de não mais apresentar a patogenicidade, foi classificado como tóxico pelos altos níveis de Cromo, de acordo com o Anexo C - Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos da ABNT NBR 10.004/2004.

Os efluentes tratados na ETE Petroquímica apresentam composição química bastante complexa, contendo compostos orgânicos e inorgânicos. Segundo Jimenez, Dal Bosco e Carvalho (2004), o método mais utilizado no tratamento de efluentes líquidos contendo matéria orgânica é o biológico, mas a presença de compostos inorgânicos pode inibir este processo, sendo necessário realizar uma etapa de tratamento químico antes da realização do tratamento biológico, visando a remoção desta carga inorgânica. O tratamento clássico de efluentes contendo metais pesados envolve processos físico-químicos de precipitação, troca iônica, adsorção e extração por solventes. Esse tratamento seria indicado para remoção do cromo antes do processo biológico realizado na ETE.

## 5 CONCLUSÕES

Os experimentos realizados no lodo biológico mostraram em média um baixo rendimento na produção de biogás e de metano. O lodo apresentou PBB de 45,13 mL Biogás/gSV, PBM de 25,9 mL Metano/gSV e rendimento estimado de 0,7235 m<sup>3</sup> de metano por tonelada de lodo.

Os percentuais médios de Metano obtidos nos experimentos foram de 33,2 %, 50,95 % e 39,17 %. Para os experimentos contínuos 2 e 3, percebeu-se a redução dos percentuais durante as alimentações com o lodo e o aumento destes após término das alimentações, demonstrando que o lodo contém agentes inibidores de produção de metano.

Durante o Experimento 2 o lodo foi caracterizado de acordo com a ABNT NBR 10.004/2004 e os resultados mostraram altas concentrações de Cromo, que conferem característica tóxica ao lodo, que se tratando de um metal não é removido pela digestão anaeróbia. A presença do metal se dá pelo fato da ETE

realizar o tratamento de lixiviados de aterros sanitários que são efluentes complexos tratados juntamente com os efluentes petroquímicos.

A presença de cromo no lodo além de trazer características tóxicas ao resíduo, também propiciou a inibição da produção de metano nas alimentações. Como não há tratamento preliminar físico-químico dos efluentes, o metal permanece no tratamento biológico e conseqüentemente no lodo gerado.

Sendo assim, o lodo após ser submetido a digestão anaeróbia não apresentou produção de biogás e metano satisfatória para aproveitamento energético na ETE e também não teve alteração na sua classificação de resíduo, permanecendo caracterizado como resíduo perigoso pela presença do Cromo em sua composição.

## REFERÊNCIAS

- AMANI, T., NOSRATI, M. SREEKRISHNAN, T. R. **Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects — a review.** Environmental Reviews. 2010.
- AMARAL, C. C. et al. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica.** Revista Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, 2004.
- ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES F.. **Lodo de esgotos tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: DESA – UFMG, 2001.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia. Elétrica.** – Brasília : ANEEL, 2002.
- AOAC. **Association of Official Analytical Chemistry. Official methods of analysis.** 6. ed. Arlington: AOAC International, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.004:** Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.006:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.007:** Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13.894:** Tratamento no solo (*landfarming*). Rio de Janeiro, 1997.

BARBOSA, Gisele Silva. **O desafio do desenvolvimento sustentável**. Revista Visões, v.4, n.4, 2008.

BETTIOL, W; CAMARGO, O.A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA 430**, 2011. 9 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em 30 de ago. 2017.

BRASIL, **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa)**. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm)>. Acesso em: 10 ago. 2018.

CASSINI, S. T.; CHERNICHARO, C. A. L.; CLERVERSON, V. A.; FRANÇA, M.; BORGES, E. S. M.; GONÇALVES, R. F. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

CATANEO, Indianara. **Comparativo do potencial de produção de metano utilizando glicerol e sacarose como substrato orgânico, em reatores operados de forma descontínua alimentada**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental).UNIVATES. Lajeado, 2015.

CAVALCANTE, Rivelino Martins. **Otimização de metodologia de extração e análise de HPAs para determinação da distribuição ambiental estimativa de fontes na cidade de Fortaleza**. Tese de Doutorado em Química Orgânica. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.

CAVALCANTI, José Eduardo W. de A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. São Paulo: Engenho, 2016.

CEDAE, Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Estado do Rio de Janeiro. **Relatório de Sustentabilidade 2017**. Disponível em: <<http://www.cedae.com.br/portals/0/governanca/Relatorio%20de%20Sustentabilidade%20-%202017.pdf>> Acesso em 20 de ago de 2018.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Biogás: Pesquisas e projetos no Brasil**. Governo do Estado de São Paulo: São Paulo, 2006.

CENBIO, **Centro Nacional de Referência em Biomassa**. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/gbio/?q=grupo-de-pesquisa-em-bioenergia>> Acesso em 21 de julho de 2018.

CERQUEIRA, Vanessa Sacramento. **Biorremediação de Borra Oleosa Proveniente de Indústria Petroquímica em Microcosmos**. Tese de Doutorado em Microbiologia Agrícola e do Ambiente UFRGS. Porto Alegre, 2011.

CHEN, J. L. G.; YAN, B.; SHAN, R.; WANG, J.; LI, T.; WU, W. Toxicants inhibiting anaerobic digestion : A review. **Biotechnology Advances**, v. 32, n. 8, 2014.

CHEN, Y., C.; J.J. and Creamer, K.S. **Inhibition of anaerobic digestion process: A review**. Vol. 99. 2008.

CHEN, G.; LIU, . Experimental study of co-digestion of food waste and tall fescue for biogas production. **Renewable Energy**, v. 88, 2016.

CMMAD – Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso futuro comum. 2a ed.** Tradução de Our common future. 1a ed. Editora da Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro, 1991.

COFIP. **Comitê de fomento industrial do polo**. Disponível em: <<http://www.cofiprs.com.br/distrito-cofip-comite-de-fomento-industrial-do-polo>> Acesso em 22 de ago de 2017.

CONTIN M.; GOI D.; NOBILI M. D. **Land application of aerobic sewage sludge does not impair methane oxidation rate of soils**, Science of the Total Environment, n.441, p.10–18, 2012.

CORSAN. **Companhia Riograndense de Saneamento**. Disponível em: <<http://www.corsan.com.br/sitel/>> Acesso em 22 de ago de 2018.

COSTA, Maria Valdete. **Recuperação de solo contaminado por petróleo usando bioestimulação**. Dissertação de Mestrado Pós-Graduação Em Ecologia E Conservação. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Mossoró, 2015.

Coté, C.; Massé, D. I.; Quessy, S. Reduction of indicator and pathogenic microorganisms by psychrophilic anaerobic digestion in swine slurries. **Bioresource Technology** .97:686-691. 2006.

DEGANUTTI, Roberto et al. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. 4º Encontro de Energia no Meio Rural, Minas Gerais, 2002.

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. **Biogas from waste and renewable resources**. Weinheim: Wiley, 2011.

DIYA'UDDEN, B. H.; DAUD, W. M. A. W.; AZIZ, A.R.A. Treatment technologies for petroleum refinery effluents: a review. **Process Safety and Environmental Protection**, n. 89, 2011.

DUPONT, F.H; GRASSI, F.; RAMITTI, L. **Energias Renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria, v. 19, n. 1. Frederico Westphalen, 2015.

ELETROBRÁS. **Centrais Elétricas Brasileiras S.A.** Disponível em: <[http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina\\_hidr\\_funciona.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funciona.asp)> Acesso em 10 de agosto de 2018.

EPE. Empresa Brasileira de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2018** – Síntese do Relatório Final.

EPE. Empresa Brasileira de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional (BEN) 2017** – Síntese do Relatório Final.

EPE. Empresa Brasileira de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional (BEN) 2016** – Síntese do Relatório Final.

EPE. Empresa Brasileira de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional (BEN) 2015** – Síntese do Relatório Final.

FILHO, A.C.F. SANTANA, C.O.S. GATTAMORTA, M.A. **Utilização De Biodigestores Para Geração De Energia Elétrica A Partir De Dejetos De Suínos No Brasil**. Journal of Engineering and Technology Innovation. Departamento de Engenharia - Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas. São Paulo, 2018.

FISPQ NAFTA, **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico NAFTA**. Disponível em <[http://www.refinariariograndense.com.br/uploads/produto\\_documento/20110614035517FISPQ\\_nafta\\_petroquimica.pdf](http://www.refinariariograndense.com.br/uploads/produto_documento/20110614035517FISPQ_nafta_petroquimica.pdf)> Acesso em 22 de dezembro de 2017.

HACKBARTH, Fabíola Vignola. **Remoção de metais de efluentes petroquímicos utilizando biomassa de macroalga marinha pelvetia canaliculata como adsorvente**. Tese de Doutorado UFSC. Florianópolis, 2014

ICLEI. **Manual para aproveitamento do biogás - Efluentes urbanos**. Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, v. 2, 2010.

INATOMI, Tais Aya Hassan; UDAETA Miguel Edgar Morales. **Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos**. 2005. Disponível em: [http://www.espacosustentavel.com/pdf/INATOMI\\_TAHI\\_IMPACTOS\\_AMBIENTAIS.pdf/](http://www.espacosustentavel.com/pdf/INATOMI_TAHI_IMPACTOS_AMBIENTAIS.pdf/). Acesso em 10 de agosto de 2018.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C.; et al. **Manual Básico de Biogás**. 1. ed. Lajeado: Ed. da Univates, 2014.

KONRAD, O.; GUERINI FILHO, M.; LUMI, M.; HASAN, C. **Atlas das biomassas do RS para produção de biogás e biometano**. 1. ed. Lajeado: Ed. da Univates, 2016.

KONRAD, O. HASAN, C. HICKMANN, E.V. MARDER, M. FILHO, M.G. SILVA, M.C.A. **Produção de biogás a partir de biomassas residuais provenientes do setor agroindustrial**. BOLETIM TÉCNICO: Tratamento anaeróbio de biomassas residuais com foco na produção de energia renovável. Laboratório de Biorreatores Tecnovates – UNIVATES. Lajeado, 2018.

MACEDO, Laura Valente de, (coordenação). **Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, efluentes urbanos**.ICLEI - Governos Locais pela

Sustentabilidade, Secretariado para América. Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil. São Paulo, 2010.

MARIANO, Jaqueline Barboza. **Impactos ambientais do refino de petróleo**. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2005.

MAHANTY, BISWANATH. ZAFAR, MOHD. JAEHAN, MAN. SUCKPARK, HUNG. **Optimization of co-digestion of various industrial sludges for biogas production and sludge treatment: Methane production potential experiments and modeling**. Waste Management – Elsevier. Volume 34. Junho, 2014.

METCALF E EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. Metcalf e Eddy, 3 ed. 1991.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Fevereiro/2019**. Secretaria de Energia Elétrica. Brasília, 2019.

MIAO, L. YANG, G. TAO, T. PENG, Y. **Recent advances in nitrogen removal from landfill leachate using biological treatments – A review**. Journal of environmental management – Elsevier. V.235. Abril, 2019.

NAYONO, S. E. **Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production**. 2009. 152 f. Dissertation (Fakultät für Bauingenieur, Geo und Umweltwissenschaften) - Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2009.

NOLAN, W. **Design, operation and monitoring sludge and application system**. Project for CORSAN/COPEL wastewater treatment facility. Wilson Nolan Inc., Oklahoma City, U.S.A. 1982.

NUNES, José Alves. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. Aracaju: Editora J. Andrade, 2004.

OLIVEIRA, Justine Paula Ramos de Oliveira. **Estudo de poluentes orgânicos persistentes (POPs) em regiões industriais da grande São Paulo – Via Cromatografia a Gás acoplada a espectrometria de massas (GC-MS) e captura de elétrons (GC-ECD)**. Dissertação de Mestrado IPEN. São Paulo, 2011.

ORANTAS, Márcia de Campos. **Avaliação em microcosmo da degradação de borra oleosa no solo**. Dissertação de mestrado Pós graduação em Ciências do Solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

Pesaro, F. **In situ inactivation of animal viruses and a coliphage in non-aerated liquid and semiliquid animal wastes**. **Applied Environmental Microbiology**. Study Group of Environmental Hygiene, Institutes of Parasitology, University of Zurich, Switzerland. 1995.

PUCRS. **USE - Uso Sustentável da Energia: Manual de Economia de Energia**. 2010. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Faculdade de Engenharia. Grupo de Eficiência Energética. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/biblioteca/manualuse.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2017.

RAMÍREZ, M.R.; LIZARDO, N.R.; VILCHEZ, I.A.; MONTIEL, A.D.; ÁLVAREZ, J.M **Estabilización anaerobia mesofílica y termofílica de lodos Activados provenientes de la industria cervecera**. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 20, Bogotá, 2010.

RABONI, Massimo. URBINI. Giodano. **Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives**. Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science. Vol. 9 n. 2 Taubaté. 2014.

RIBEIRO, B.L.C; SILVA, D. P. da S. **Desenvolvimento Sustentável e o Uso das Energias Renováveis no Brasil**. Simpósio de Engenharia de Produção Universidade Federal do Sergipe, 2014

Ricardo Sarti Jimenez, Sandra Maria Dal Bosco e Wagner Alves Carvalho. **Remoção De Metais Pesados De Efluentes Aquosos Pela Zeólita Natural Escolocita – Influência Da Temperatura E Do Ph Na Adsorção Em Sistemas Monoelementares**. Faculdade de Química, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, SP, 2004.

RIO GRANDE DO SUL. Assembleia Legislativa. **Lei Nº 7.691, 1982**. Dispõe sobre os efluentes do Pólo Petroquímico do Sul. Disponível em: [http://www.al.rs.gov.br/legis/M010/M0100099.ASP?Hid\\_Tipo=TEXTO&Hid\\_Toda sNormas=24484&hTexto=&Hid\\_IDNorma=24484](http://www.al.rs.gov.br/legis/M010/M0100099.ASP?Hid_Tipo=TEXTO&Hid_Toda sNormas=24484&hTexto=&Hid_IDNorma=24484). Acesso em 30 de ago.2017.

RIO GRANDE DO SUL. Assembleia Legislativa. **Lei Nº 14.864, 2016**. Institui a Política Estadual do Biometano, o Programa Gaúcho de Incentivo à Geração e Utilização de Biometano - RS-GÁS - e dá outras providências. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=320440>> Acesso em 14 de julho de 2018.

ROY, RATUL. HAAK, LAURA. LI, LIN. PAGILLA, KRISHNA. **Anaerobic digestion for solids reduction and detoxification of refinery waste streams**. Process Biochemistry – Elsevier. Volume 51. Outubro, 2016.

SALOMON, K.R. **Avaliação técnico econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. Tese (Doutorado Em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2007.

SANEPAR, Companhia de Saneamento do Paraná. **Aproveitamento Energético de Biogás de ETEs**. Governo do Estado do Paraná e Governo Federal. Curitiba, 2016.

SANTOS, Viviane Pareira dos. **Modificações de solo e plantas após duas décadas da aplicação de lodo proveniente da ETE do Sítel do Pólo Petroquímico (Triunfo, RS)**. Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

SANTOS, Osmar Rayis. **Potencial de aproveitamento energético de biogás nas principais estações de tratamento de esgotos que atendem o município de São Paulo**. Mestrado. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. São Paulo, 2017.

SAYARA, TAHSEEN. POGNANI, MICHELE. SARRÀ, MONTSERRAT. SÁNCHEZ. **Anaerobic degradation of PAHs in soil: Impacts of concentration and amendment stability on the PAHs degradation and biogas production**. International Biodeterioration & Biodegradation. Volume 64, Elsevier. Julho, 2010.

STEFANIUK, MAGDALENA. TSANG, DANIEL C.W. SIKOK, YOUNG. OLESZCZUK, PATRYK. **A field study of bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge and biochar amended soils**. Journal of Hazardous Materials. Volume 349 Elsevier. Maio, 2018.

SOUZA, Neyliane Costa. **Avaliação de Micropoluentes emergentes em esgoto e águas superficiais**. 2011. Doutorado. Pós-graduação em Engenharia Civil – área de concentração saneamento ambiental. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

TAO J.; WU S.; SUN L.; TAN X.; YU S.; ZHANG Z. **Composition of Waste Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant**, Procedia Environmental Sciences, v.12, 2012

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; GIASSON, E. **Avaliação do sistema de aplicação de lodo no solo (Fazenda de Lodo) do SÍTEL/CORSAN**. Relatório Técnico de consultoria para CSD – Geoclock Ltda. Porto Alegre, 2004.

URRAHMA, WASI. DANISHKHAN, MOHAMMAD. HALDER, GOPINATH. **Anaerobic biodegradation of benzene-laden wastewater under mesophilic environment and simultaneous recovery of methane-rich biogas**. Journal of Environmental Chemical Engineering. Volume 6. Elsevier. Abril, 2018.

VDI 4630. **Fermentation of organic materials. Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests**. 92 p. Germany: Verein Deutscher Ingenieure – VDI, 2006.

VILLELA, I. A. de C.; SILVEIRA J.L. **Aspectos técnicos da produção de biogás em um laticínio. Guaratinguetá – SP**. FAENQUIL - Faculdade de Engenharia Química de Lorena. São Paulo, 2006.

VITORATTO, E. **Tratamento de efluentes líquidos orgânicos: Sistemas Anaeróbios**. PROACQUA. Processos de Tratamento de Efluentes e Com.LTDA (Diretor Técnico). São Paulo: Faculdade Oswaldo Cruz, 2004.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005.

VON SPERLING, Marcos. **Lagoas de estabilização**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2002.

VON SPERLING, Marcos. **Lodos ativados**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2002.

XAVIER, C. DE A. N.; LUCAS JÚNIOR, J. de. **Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inoculo**. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.30, n.2, 2010.

ZEN, Barbara Potrich. **Caracterização da purga da torre de resfriamento de uma indústria petroquímica e propostas de tratamento**. Trabalho de Conclusão em Engenharia Química UFRGS. Porto Alegre, 2013.