

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CARLA DANIELA CORDEIRO LUIZ

**BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE
UNIVERSITÁRIO DA UNIPAMPA – CAMPUS BAGÉ**

**Bagé
2019**

CARLA DANIELA CORDEIRO LUIZ

**BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE
UNIVERSITÁRIO DA UNIPAMPA – CAMPUS BAGÉ**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia de Energia.

Orientador: Prof^a. Dra. Sabrina Neves da
Silva

**Bagé
2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

L952b Luiz, Carla Daniela Cordeiro
Biodigestão anaeróbia dos resíduos orgânicos do restaurante
universitário da UNIPAMPA – campus Bagé / Carla Daniela
Cordeiro Luiz.
65 p.

Orientadora: Sabrina Neves da Silva.
Coordenador: Helvio Rech.
Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade
Federal do Pampa, Engenharia de Energia, 2019.

1. Biogás. 2. Resíduos do restaurante universitário. 3. Energia. I.
SILVA, Sabrina Neves. (Orient.). II. Título.

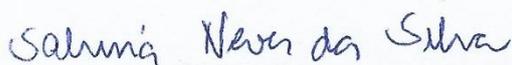
CARLA DANIELA CORDEIRO LUIZ

**BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE
UNIVERSITÁRIO DA UNIPAMPA – CAMPUS BAGÉ**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 02/07/2019.

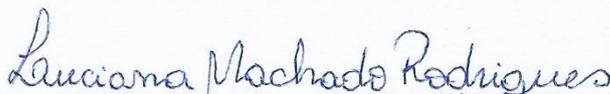
Banca examinadora:



Prof.^a Dra. Sabrina Neves da Silva
Orientadora
UNIPAMPA



Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira
UNIPAMPA



Prof.^a Dra. Luciana Machado Rodrigues
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me incentivou, aos amigos pelo apoio e conselhos valiosos e aos meus professores que, por meio de suas lições, profissionalismo e empenho, contribuíram para a minha formação.

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha mãe Vera Lúcia e ao meu padrasto José Maria, por terem me apoiado durante todas as etapas do curso. Agradeço ao João Kloeckner pelo suporte, paciência e companheirismo ao longo dos meus estudos. Agradeço à minha filha Eduarda Félix pelo incentivo, mesmo isso lhe custando distância da mãe em parte da infância e adolescência. Agradeço aos amigos e colegas pelos conselhos e contribuições. Agradeço à minha professora orientadora Sabrina Neves, pelo suporte e aos demais professores pelo ensinamento.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia”.

Robert Collier

RESUMO

O aproveitamento dos diversos tipos de biomassa é uma das alternativas para a geração de energia, não só pelas vantagens econômicas decorrentes da sua utilização, mas também pelas vantagens ambientais. Como alternativa para este panorama, tem-se o biogás. O biogás é uma mistura gasosa rica em metano e dióxido de carbono, produzida naturalmente em meio anaeróbico pela ação de bactérias em matérias orgânicas que são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez. Neste trabalho de conclusão de curso foi estudada a produção laboratorial de biogás tendo como matéria-prima os resíduos sólidos orgânicos provenientes do restaurante universitário da Universidade Federal do Pampa do campus Bagé. O biogás pode ser convertido em energia térmica ou elétrica, por meio da oxidação do metano para suprir parte da demanda do referido restaurante universitário. Não foi determinada quimicamente a quantidade de metano no biogás, mas, pelo teste de chama, verificou-se a queima do gás, indicando ser combustível. Neste trabalho, produziu-se 0,076 m³ de biogás por kg de resíduo. A geração média de resíduos alimentares do restaurante é de 1.714 kg mês⁻¹ o que viabiliza uma produção de até 1,522 m³mes⁻¹ de biogás equivalente a 2,283 m³mes⁻¹ de gás liquefeito de petróleo (1:1,5). Dessa forma, o biogás pode suprir 95,15% da demanda de gás do restaurante (2,4 m³mes⁻¹), reduzindo as emissões de dióxido de carbono. Com base nesses resultados, propôs-se a construção de um biodigestor modelo Canadense na Universidade, pois, além do menor custo de instalação, teria melhor aproveitamento da radiação solar, visto a região contar com temperaturas baixas em grande parte do ano. Foram realizados cálculos de retorno financeiro com a opção de se utilizar biodigestores comerciais. Foi proposto ainda um sistema para maior número de retiradas de biogás, pois constatou-se por simulação que o acúmulo de gases dentro do digestor reduziria o crescimento da população bacteriana, diminuindo assim a produção e qualidade do biogás.

Palavras-Chave: Biogás. Biocombustíveis. Energia. Resíduos orgânicos. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The usage of the different types of biomass is one of the alternatives for the generation of energy, not only for the economic advantages deriving from its use, but also for the environmental advantages. As an alternative to this panorama, one has the biogas. Biogas is a gas mixture rich in methane and carbon dioxide, produced naturally in anaerobic environment by the action of bacteria on organic matter that are fermented within certain limits of temperature, moisture content and acidity. In this research, laboratory production of biogas was studied, with organic solid residues from the university restaurant of the *Universidade Federal do Pampa, campus Bagé*. The biogas can be converted into thermal or electric energy, by means of the oxidation of methane to supply part of the demand of said University Restaurant. The amount of methane in the biogas was not chemically determined. However, through the flame test, the gas has burned, indicating that it was combustible. In such work, 0.076 m³ of biogas per kg of waste was produced. The average generation of food waste from the restaurant is 1,714 kg month⁻¹, which makes it possible to produce up to 1,522 m³ month⁻¹ of biogas equivalent to 2,283 m³ month⁻¹ of liquefied petroleum gas (1: 1,5). In this way, biogas can supply 95.15% of the restaurant gas demand (2.4 m³ month⁻¹). Reducing carbon dioxide emissions. Based on these results, it was proposed the construction of a Canadian model bio-digester in the University, because, in addition to the lower cost of installation, it would have better use of solar radiation, since the region has low temperatures for most of the year. Calculations of financial return were made with the option of using commercial bio-digesters. A system was also proposed for a greater number of biogas withdrawals, since it was simulated that the accumulation of gases inside the digester would hinder the growth of the bacterial population, thus reducing the production and quality of the biogas.

Keywords: Biogas. Biofuels. Energy. Organic waste. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos da digestão anaeróbia de macromoléculas complexas	19
Figura 2 – Disposição final dos RSU coletados no Brasil (t/ano)	23
Figura 3 – Biodigestor modelo indiano	27
Figura 4 – Modelo chinês	28
Figura 5 – Biodigestor modelo batelada	30
Figura 6 – Biodigestor modelo canadense	31
Figura 7 – Composto para retenção	33
Figura 8 – Estrutura de produção e captação de gás.....	34
Figura 9 – Início da retenção.....	35
Figura 10 – Terceiro dia de retenção	36
Figura 11 – Aparência do resíduo no 8º dia	37
Figura 12 – Dezesesseis dias de retenção	38
Figura 13 – Modelo sem retirada de gás.....	42
Figura 14 – Condições iniciais de bactérias	42
Figura 15 – Condições iniciais de biogás	42
Figura 16 – Modelo com retirada de gás.....	43
Figura 17 – Relação entre oferta e demanda do RU.....	45
Figura 18 – Projeto biodigestor	45
Figura 19 – Vista isométrica do biodigestor	46
Figura 20 – Partes do biodigestor Homebiogas 2.0	47
Figura 21 – Recuperação do investimento	47
Figura 22 – Curvas produção sem retirada	48
Figura 23 – Curvas de produção com retirada	49
Figura 24 – Ponto de equilíbrio assintótico	49
Figura 25– Estrutura de produção e captação de gás.....	62
Figura 26– Aparência dos resíduos com a evolução da biodigestão	62
Figura 27– Demanda do RU e produção estimada de biogás.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição média do biogás	17
Tabela 2 – Comparação do poder calorífico de combustíveis.....	18
Tabela 3 – Resíduo com inóculo	21
Tabela 4 – Composição gravimétrica média de RSU no Brasil.....	23
Tabela 5 – Produção média de biogás e de substrato	28
Tabela 6 – Comparação de características de construção	29
Tabela 7 – Produção diária de biogás.....	44
Tabela 8 – Possibilidade de geração do RU a partir do teste de laboratório.....	44
Tabela 9 – Demanda de GLP do RU.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
GLP	Gás liquefeito de petróleo
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Gás sulfídrico
NH ₃	Amoníaco
KOH	Hidróxido de potássio
N ₂	Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
pH	Potencial de hidrogênio
CH ₃ COOH	Ácido acético
RSU	Resíduos sólidos urbanos
RU	Restaurante universitário
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
Fi	Fator de inóculo
ST	Sólidos totais
STi	Sólidos totais do inóculo
STs	Sólidos totais do substrato
STV	Sólidos totais e voláteis
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
hab	habitantes
t/ano	Toneladas por ano
P	Pressão
V	Volume
T	Temperatura em Kelvin
t	Tempo
F	Fator de correção de umidade à temperatura de medição de gás
Tc	Temperatura em °C
m ³	Metros cúbicos
kg	quilograma
kWh	Quilowatt-hora
mL	mililitros

L	litro
$^{\circ}C$	Graus Celsius
p	Taxa de inibição de bactérias
x	Bactérias
y	Biogás
k	Taxa de variação de produto
h	Função de retirada
F	Função de inibição
α	Taxa de crescimento de bactérias
β	Taxa de coleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo geral	16
1.2 Objetivos específicos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Biogás	17
2.2 Biodigestão anaeróbia	18
2.3 Formação de biogás.....	19
2.4 Inoculação.....	20
2.5 Resíduos sólidos urbanos.....	22
2.5.1 Características dos resíduos sólidos urbanos	22
2.5.2 Gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos	24
2.6 Biodigestores	24
2.6.1 Biodigestor modelo indiano	26
2.6.2 Biodigestor modelo chinês	27
2.6.3 Biodigestor modelo batelada	29
2.6.4 Biodigestor modelo canadense	30
3 METODOLOGIA	32
3.1 Materiais.....	32
3.2 Preparação do composto	32
3.3 Retenção hidráulica	34
3.4 Retirada de biogás	38
4 SIMULAÇÃO.....	40
4.1 Gás Confinado no biodigestor e a influência da retirada	40
4.3 Ensaio com diagramas de blocos.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 Oferta x demanda do RU.....	44
5.2 Escolha do modelo do biodigestor.....	45
5.3 Influência de retiradas de gás no volume produzido	48
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51

1 INTRODUÇÃO

Um dos focos de maior relevância na atualidade é a produção e a demanda de energia, entre os dois processos surge a preocupação com o fim dos recursos energéticos de origem fóssil, que vem sendo amenizada por alternativas renováveis. A demanda de gás natural no Brasil foi de 78,7 milhões de m³/dia em 2018, segundo o Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural, do Ministério de Minas e Energia e o biogás nem é citado nos dados da matriz energética, embora usinas já operem a partir de resíduos sólidos. O Brasil tem potencial de produção de 15 milhões de m³ de biogás por dia, somente a partir de alimentos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2019; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS, 2016).

O processo de biodigestão anaeróbia proporciona a obtenção de uma mistura de gases, chamada biogás, composta de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), podendo conter quantidades menores de outros gases como gás sulfídrico (H₂S) e nitrogênio (N₂). Como o metano está em maior quantidade na composição, o gás obtido pode ser utilizado como combustível (CORTEZ *et al.*, 2008).

A combustão do biogás pode ser tanto usada para geração térmica de energia, em substituição aos gases de origem fóssil como, por exemplo, o gás liquefeito de petróleo (GLP) e o gás natural quanto para a produção de energia elétrica (OLIVEIRA *et al.*, 2006). Segundo o site MS Engenharia Elétrica, com 1 m³ de biogás é possível gerar energia equivalente a queima de 1,5 m³ de GLP.

Assim, propõe-se uma destinação e tratamento dos resíduos sólidos orgânicos provenientes diariamente do restaurante universitário (RU) da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), campus Bagé, com aproveitamento da matéria-prima no processo de produção de biogás.

1.1 Objetivo geral

Propor um modelo de implantação de um biodigestor anaeróbico para produção de biogás, tendo como matéria-prima os resíduos sólidos orgânicos provenientes do RU da UNIPAMPA, campus Bagé.

1.2 Objetivos específicos

O objetivo geral abrange os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o potencial de novas fontes energéticas.
- Contribuir para redução da emissão de gases do efeito estufa.
- Proporcionar um leque maior de opções para matriz energética.
- Comparar os resultados de caracterização com estudos correlatos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo traz a revisão bibliográfica abordando os temas julgados necessários para um abarcamento de produção de biogás e está dividida em tópicos: biogás, resíduos sólidos urbanos (RSU), produção de biogás a partir de RSU e os tipos de biodigestores.

2.1 Biogás

O biogás é uma fonte renovável caracterizada como energia de base e versátil para geração de energias elétrica e térmica. As tecnologias de biodigestão hoje disponíveis além da aplicação do biogás para geração de energia elétrica em grandes blocos, através de termelétricas, possibilitam a geração distribuída em menor escala, compondo um apoio sistêmico ao conceito de eficiência energética (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGAS, 2015).

O biogás é um produto gerado a partir da decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos. Sua composição é a porcentagem de gases, que varia de acordo com o substrato e condições em que o substrato é exposto (FARIA, 2012).

O biogás é formado basicamente de CH₄, um gás incolor, bastante inflamável; além de outros gases, conforme mostra a Tabela 1:

Tabela 1 – Composição média do biogás

Gás	Teor (%)	Fórmula Química
Metano	50 – 75	CH ₄
Dióxido de carbono	25 – 40	CO ₂
Nitrogênio	2,5	N ₂
Hidrogênio	0 – 2	H ₂
Oxigênio	0,1 – 1	O ₂
Gás sulfídrico	0,1 – 0,5	H ₂ S
Amoníaco	0,1 – 0,5	NH ₃

Fonte: Adaptado de Genovese (2006).

A realização e a eficiência da biodigestão dependem de condições específicas de operação, como temperatura e potencial de hidrogênio (pH) do meio, tipo de substrato usado no processo e tempo de retenção hidráulica da biomassa no biodigestor, dentre outros fatores (ANGONESE *et al.*, 2006).

A Tabela 2 compara a equivalência de fontes de energia com 1m³ de biogás, cujo poder calorífico é de 21600kJ/m³ (ZENATTI, 2018).

Tabela 2 – Comparação do poder calorífico de combustíveis

Biogás	1m³
Gasolina	0,8L
Eletricidade	7kWh
GLP	1,5m ³
Carvão de madeira	1,4kg
Álcool	1,3L

Fonte: Adaptado de Araujo (2017).

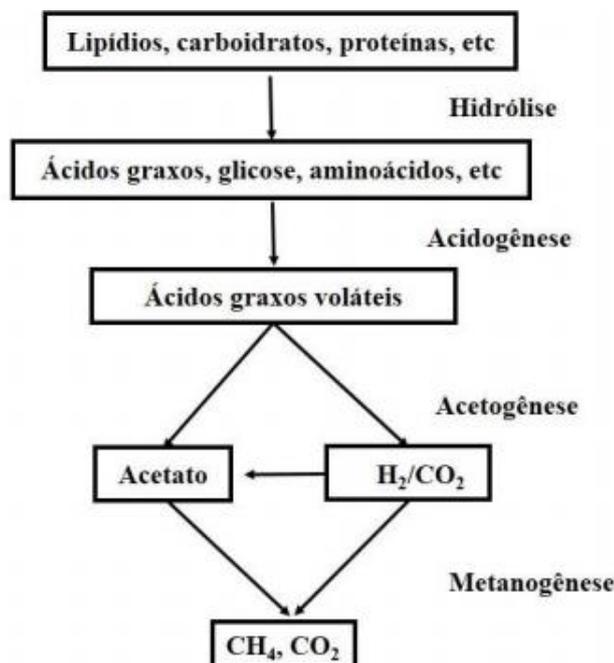
Além do poder calorífico do biogás, outro fator positivo é seu custo comparado a outros combustíveis, pois a matéria-prima para a produção do biogás é de reaproveitamento (GASPAR, 2003).

2.2 Biodigestão anaeróbia

O processo de decomposição de matéria orgânica sem a presença de oxigênio que gera biogás e biofertilizante é chamado de biodigestão anaeróbia. Os gases mais importantes gerados com a biodigestão são o metano e gás carbônico, porém o processo passa por várias etapas e depende de vários fatores para uma produção bem-sucedida.

A Figura 1 mostra um fluxograma do processo de biodigestão anaeróbia de macromoléculas complexas.

Figura 1 – Processos da digestão anaeróbia de macromoléculas complexas



Fonte: Adaptado de Matos (2017).

Na hidrólise são quebradas ligações moleculares complexas em compostos orgânicos simples, como aminoácidos e açúcares. Essa etapa dá condição para a Acidogênese, onde as bactérias fermentativas transformam substâncias da hidrólise em ácidos graxos voláteis. Na Acidogênese, se houver uma concentração alta de hidrogênio, pode haver acúmulo de ácidos orgânicos, causando a queda no pH da mistura, podendo resultar em comprometimento de todo o processo. O resultado da Acidogênese deve levar a ácido acético e hidrogênio, obtidos no processo de acetogênese, que no processo de Metanogênese são convertidos em metano e gás carbônico, gases de interesse neste estudo (PORTAL DO BIOGAS, 2013).

2.3 Formação de biogás

A matéria orgânica utilizada para o processo influencia na qualidade e quantidade do biogás produzido, pode ser esterco de animais, lodo de esgoto, lixo doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas, segundo a Síntese Natural Meio Ambiente (2017).

Se a digestão anaeróbia é realizada sob controle, ou seja, em biodigestores especialmente planejados, contendo filtro de purificação, a mistura gasosa produzida

pode ser usada como combustível de alto poder calorífico, sem a presença de gases tóxicos, como gás sulfídrico, durante a queima. A quantidade de metano no biogás depende de fatores como pressão e temperatura durante os processos e pode corresponder de 40% a 80% da mistura gasosa (PECORA, 2006).

2.4 Inoculação

O processo anaeróbio não se inicia no momento de disposição os resíduos. É necessário um tempo para o crescimento populacional de microorganismos. Para acelerar o início do processo, pode ser utilizado inóculo (SOUTO, 2005). O inóculo combina diferentes substratos na digestão anaeróbia, para compensar substratos faltantes, podendo assim, aumentar a produção de biogás (BARCELOS, 2009). Geralmente são utilizados inóculos como: lodo de esgoto digerido, estrume, resíduo digerido e lixiviado (PINTO, 2000).

Uma queda acentuada no pH da solução, provocada pela rapidez na acidificação pode inibir a produção de biogás, provocando queda na atividade metanogênica (BARCELOS, 2009).

A quantidade de inóculo depende da atividade metanogênica do inóculo e da taxa de produção inicial do substrato, que pode ser calculada pela seguinte equação:

$$F_i = \frac{ST_i}{ST_i + ST_s} \quad (1)$$

Onde:

F_i é o fator de inóculo;

ST_i são os sólidos totais do inóculo;

ST_s são os sólidos totais do substrato.

A Tabela 3 apresenta dados de alguns sistemas experimentais investigados.

Tabela 3 – Resíduo com inóculo

Referência	Resíduo	Inóculo	ST (%)	Temperatura (°C)	Tempo (dias)	Eficiência (%)
Mtz. Viturtia <i>et al.</i> , (1995)	Frutas e verduras	Esterco bovino e suíno	6	35	4,5-18	27-72 (STV)
Torres Castillo <i>et al.</i> , (1995)	Cevada	Esterco bovino e suíno	26-30	25-35	110-240	45-86 (STV)
Del Borghi <i>et al.</i> , (1999)	Resíduos de cozinha triturado	Lodo primário e secundário	1-4	55	12	56-63 (STV)
Pavan <i>et al.</i> , (1999a)	Frutas e verduras	-	8	35-56	11-12	67-84 (STV)
Xu <i>et al.</i> , (2002)	Alimentos	Lodo de digestor e de reator	10	35	16	60 (STV)
Wang <i>et al.</i> , (2003)	Alimentos	Lodo de digestor e de reator	10	35	36	78 (STV)
Bouallagui <i>et al.</i> , (2004)	Frutas e verduras	Lodo de digestor	4, 6, 8 e 10	20, 35, 55	20	54-87 (STV)

Fonte: Adaptado de Araujo (2017).

A Tabela 3 mostra alternativa tecnológica para produção de biogás com diversos estudos utilizando a digestão anaeróbia com diferentes inóculos e seu potencial em acelerar a digestão e aumentar a produção de biogás, onde ST se refere a sólidos totais e STV sólidos totais e voláteis. Em todas as pesquisas apresentadas, os resultados com uso de inóculos foram positivos e as melhores eficiências foram obtidas nas temperaturas mais elevadas.

2.5 Resíduos sólidos urbanos

Aterros controlados, aterros sanitários e lixões a céu aberto são as formas mais tradicionais no Brasil para destinação de RSU, porém lixões é uma forma de disposição ilegal e existe uma determinação da Lei Federal nº 12305 de 2010 de acabar com lixões a céu aberto até 2014, prazo prorrogado para 2020 devido ainda existir número elevado de tal disposição. Vem aumentando o consumo de bens descartáveis com o passar do tempo, aumentando assim o descarte de resíduos sólidos e a necessidade de que as Leis se tornem mais rigorosas quanto à disposição final desses resíduos, segundo o Portal São Francisco (1994) e a Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2016).

Soluções provisórias têm gerado graves problemas ambientais em centros urbanos. Regiões de periferia, muitas vezes, não contam com sistema básico de coleta de lixo e o descarte dos resíduos acontece em terrenos baldios, rios e próximo a estradas. Problemas de saúde ambiental acabam surgindo de forma desordenada e de certa forma sendo explicados como alternativa provisória para que sejam aceitos (ENSINAS, 2003; ABRELPE, 2016).

2.5.1 Características dos resíduos sólidos urbanos

RSU são resíduos descartados das residências, resíduos de serviços de saúde sem potencial contaminante, de construção civil, de poda e capina, de portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários e os resíduos de serviços, que abrangem os resíduos comerciais, os resíduos de limpeza de bocas de lobo, os resíduos de varrição, de feiras e outros (SCHALCH *et al.*, 2002).

A legislação brasileira determina o lixo doméstico como propriedade da prefeitura, que tem o compromisso de sua coleta e destinação final (CALDERONI, 2003). Já o lixo industrial, é de responsabilidade do gerador, por questões de diversidade e de risco à saúde pública. Comunidades carentes acabam apresentando parcelas maiores de matéria orgânica e menor quantidade de resíduo descartável, já com as populações de maior poder econômico ocorre o contrário (STREB, 2001).

O Brasil tem uma geração média per capita de 1,23 kg/hab./dia de resíduos sólidos urbanos e quase 30% dos municípios destinam os resíduos a céu aberto (RODRIGUES *et al.*, 2015).

A Tabela 4 mostra que a matéria-prima utilizada nesse trabalho representa mais de 50% de todo o lixo gerado no Brasil, a matéria orgânica.

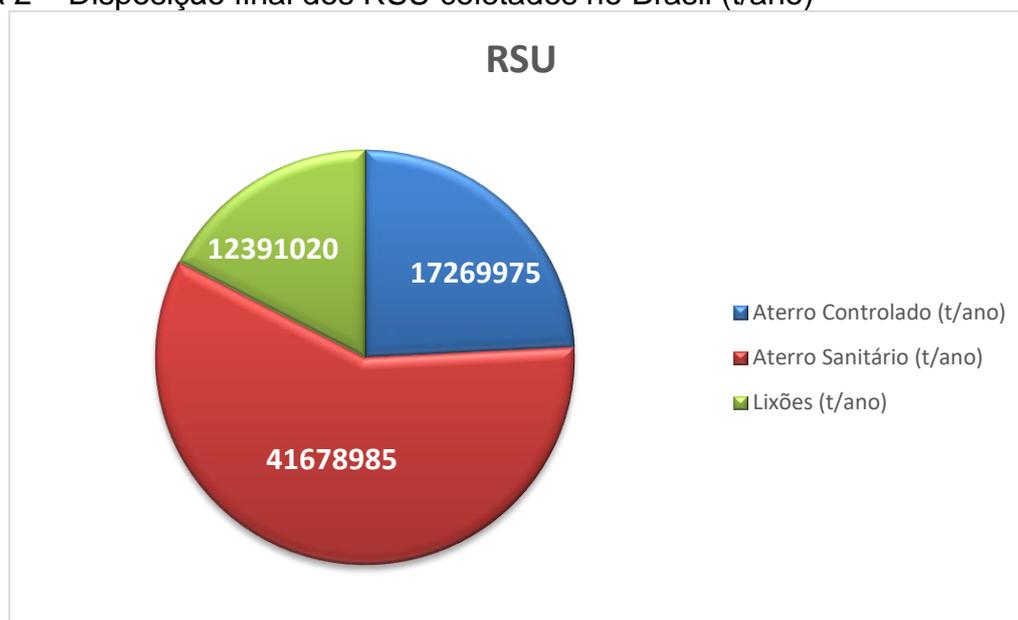
Tabela 4 – Composição gravimétrica média de RSU no Brasil

Resíduo	Percentual (%)
Matéria orgânica	51,4
Metais	2,9
Papel	13,1
Plástico	13,5
Vidro	2,4
Outros	16,7

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2014).

A Figura 2 mostra que apesar de boa parte da disposição final de lixo ser em aterros sanitários, os gases gerados são lançados no meio ambiente, e que 17,37% destes resíduos ainda terminam em lixões.

Figura 2 – Disposição final dos RSU coletados no Brasil (t/ano)



Fonte: adaptado de Abrelpe (2016).

Nos países desenvolvidos, devido ao alto grau de industrialização, nota-se uma predominância de materiais como papel, metais, plásticos e vidros, característicos de produtos industrializados e suas respectivas embalagens, que diminuem consideravelmente nos países subdesenvolvidos (MEDEIROS, 2012; BRITTO, 2006).

A massa dos resíduos soltos, em função do volume ocupado livremente, sem qualquer compactação é o peso específico aparente. Na ausência de dados, podem-se utilizar para o peso específico no estado solto, os valores de 230 kg/m³ para os

resíduos domiciliares, de 280 kg/m³ para os resíduos de serviço de saúde e de 1.300 kg/m³ para os resíduos da construção civil. O peso específico aparente auxilia o correto dimensionamento da frota de coleta, assim como de contêineres e caçambas estacionárias (CASARIN, 2001).

2.5.2 Gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos

Gestão e gerenciamento inadequados dos RSU tem gerado discussões que aumentam a conscientização da sociedade a respeito de questões ambientais. O aparecimento de soluções inovadoras contribui para propostas de mitigação junto às administrações municipais, embora várias propostas não se perdurem além do período da gestão (SCHALCH *et al.*, 2002).

A crescente quantidade de resíduos não é apenas um problema de poluição visual, ainda é uma questão que atinge fortemente a saúde pública e agride o meio ambiente, diminuindo consideravelmente os espaços úteis disponíveis. A ausência de definições e diretrizes contribuem para a ausência de tratamento e má disposição dos resíduos no Brasil, como a contaminação do solo e dos recursos hídricos por metais pesados, solventes orgânicos halogenados e resíduos de defensivos agrícolas (SCHALCH *et al.*, 2002).

A coleta seletiva é a solução ideal para o problema dos resíduos sólidos urbanos, junto com a reciclagem dos resíduos em condições para tal opção e a compostagem dos resíduos biodegradáveis e da matéria orgânica, sendo que, apenas uma pequena parcela dos resíduos gerados, chamados de rejeitos, precisaria de disposição final (BRITTO, 2006).

Lixões representam uma maneira imprópria de disposição dos resíduos, que é caracterizada pela descarga sobre o solo e sem medida de proteção ao meio ambiente e à saúde pública (POSSAMAI *et al.*, 2006).

2.6 Biodigestores

Antes de surgir a primeira instalação operacional de produção de gás combustível, na segunda metade do século XIX, o biogás já era conhecido. Em 1776,

o pesquisador italiano Alessandro Volta descobriu gás metano no "gás dos pântanos", como resultado da decomposição de restos vegetais em ambientes confinados (GASPAR, 2003).

Já na Inglaterra, Humphrey Davy identificou dióxido de carbono na decomposição de dejetos animais em lugares úmidos, na primeira década do século XVIII. Em 1857, na Índia, foi construída a primeira instalação para produção de gás combustível, destinada a um hospital de hansenianos. Bases teóricas e experimentais de biodigestão anaeróbia foram realizadas na mesma época por Fisher e Schrader, na Alemanha e Grayon, na França. Em 1890, uma fossa séptica foi criada por Donald Cameron, na Inglaterra e o gás produzido foi utilizado para iluminação pública. Em 1900 funcionava o primeiro digestor a batelada. Esse recebe carga total de biomassa e somente é esvaziado após a cessação do biogás. Em 1920, na Alemanha, Karl Imhoff desenvolveu um tanque biodigestor, se tornando uma grande contribuição para estudos de tratamento anaeróbico de esgotos residenciais. (GASPAR, 2003; NOGUEIRA, 1986).

Devido à devastação da segunda guerra mundial, alemães e italianos desenvolveram técnicas para obtenção de biogás de dejetos e restos de alimentos. Mas foi na Índia em 1939 que se criou a primeira usina de gás de esterco, que incentivou mais pesquisas resultando em novas metodologias levando à obtenção de melhor biogás e utilização de biofertilizantes. A partir de então, surgiram quase meio milhão de unidades de biodigestão no interior da Índia. (GASPAR, 2003).

A China passou a adotar a tecnologia indiana a partir de 1958 e instalou milhões de biodigestores na região do Rio Amarelo, local com condições climáticas favoráveis para a produção de biogás (GASPAR, 2003; PECORA, 2006).

Com a crise energética acontecendo em 1973, a produção de biogás era crescente em países ricos e de Terceiro Mundo. Mas a China e a Índia, por motivações diferentes, são os países que mais utilizam de tecnologia de biodigestores até os dias atuais (PECORA, 2006).

A motivação atual da China é os biofertilizantes. Indianos precisam dos biodigestores para cobrir o déficit de energia. Assim, desenvolveram diferentes modelos. O biodigestor chinês, mais simples e econômico e o modelo indiano, mais sofisticado e técnico, para aproveitar melhor a produção de biogás (GASPAR, 2003).

Entende-se por biodigestor uma câmara fechada onde uma biomassa é fermentada sem a presença de ar. Da fermentação ocorrem a liberação de biogás e a

produção de biofertilizante. O biodigestor pode ser definido como um dispositivo para conter a biomassa e seu produto. Existem vários tipos de biodigestor, mas geralmente são compostos de duas partes: um recipiente para abrigar e permitir a digestão da biomassa e o gasômetro para armazenar o biogás (DEGANUTTIL, 2002).

2.6.1 Biodigestor modelo indiano

Este é um modelo mais sofisticado de biodigestor e caracteriza-se por possuir uma campânula como gasômetro, esta pode ficar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou em um selo d'água externo, com uma parede central dividindo o tanque de fermentação em duas câmaras e proporcionando circulação do material por toda a câmara.

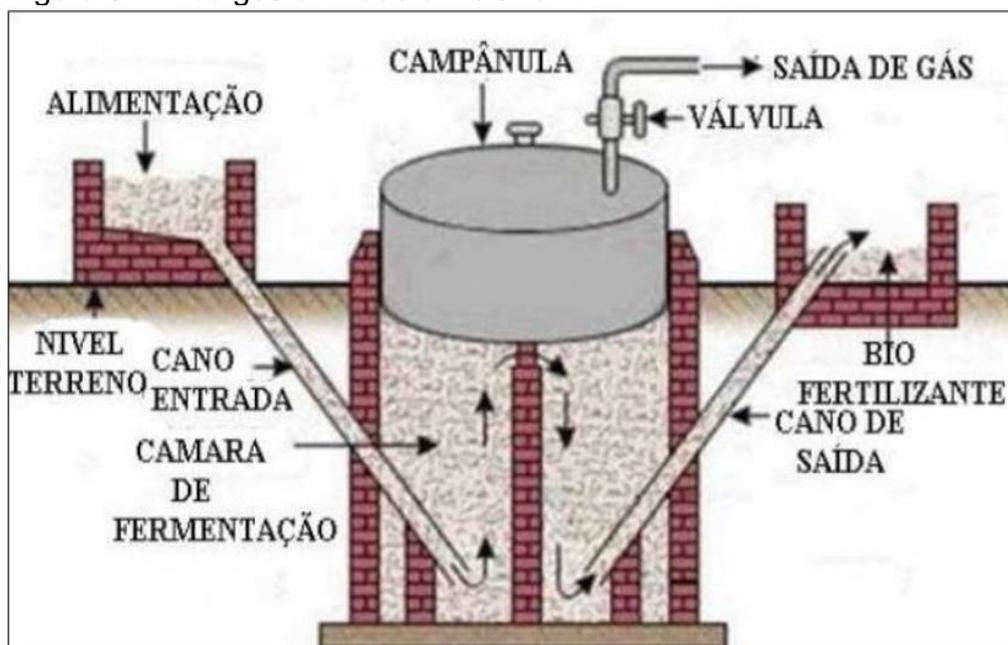
Esse modelo possui a vantagem de pressão constante, assim, à medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, aumentando o volume.

O resíduo utilizado para alimentar o biodigestor indiano não deverá ter uma concentração de sólidos totais superior a 8%, para facilitar a circulação do resíduo pelo interior da câmara e evitar entupimentos dos canos de entrada e saída de material.

O abastecimento deverá ser contínuo, deve-se utilizar matéria-prima que apresenta uma certa regularidade no fornecimento (SEIXAS *et al.*, 1981; DEGANUTTIL, 2002; PECORA, 2006).

A Figura 3 apresenta o esquema de construção de um biodigestor indiano:

Figura 3 – Biodigestor modelo indiano



Fonte: Lustosa *et al.* (2014).

O gasômetro de metal pode encarecer o custo final e a distância da propriedade pode dificultar e encarecer o transporte inviabilizando a implantação deste modelo de biodigestor.

2.6.2 Biodigestor modelo chinês

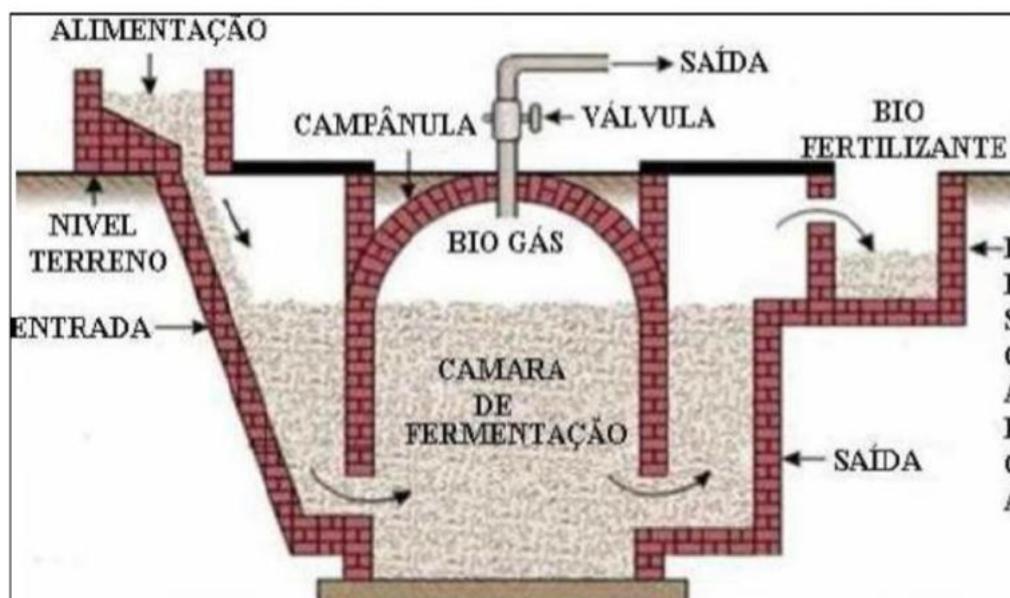
Esse modelo conta com uma câmara cilíndrica em alvenaria para a fermentação, com teto impermeável para armazenamento do biogás. Este biodigestor usa o princípio de prensa hidráulica, onde o aumento de pressão em seu interior, devido ao acúmulo de gás, resulta em deslocamentos do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre descompressão.

Este modelo não é recomendado para instalações de grande porte devido uma parcela do gás formado ser liberada para a atmosfera, para reduzir a pressão interna.

Neste modelo, a concentração de sólidos totais também não deve ultrapassar 8%, pelo mesmo motivo do modelo indiano (SEIXAS *et al.*, 1981; DEGANUTTIL, 2002; PECORA, 2006).

A Figura 4 mostra o esquema do modelo chinês:

Figura 4 – Modelo chinês



Fonte: Adaptado de Lustosa *et al.* (2014).

O modelo indiano apresenta maior eficiência quanto a produção de biogás e a redução de sólidos no substrato, ainda assim, não são valores muito acima. A Tabela 5 mostra o desempenho dos biodigestores:

Tabela 5 – Produção média de biogás e de substrato

	Biodigestor indiano	Biodigestor chinês
Redução de sólidos (%)	38	37
Produção média (m ³ .dia ⁻¹)	3,0	2,7
Produção média (L.m ⁻³ de substrato)	538	489

Fonte: Adaptado de Pecora (2006).

Esses dados são de modelo indiano e chinês, com capacidade de 5,5 m³ de biomassa, operados com esterco bovino.

Os modelos também se diferem nas características construtivas, conforme Tabela 6:

Tabela 6 – Comparação de características de construção

	Sistema indiano	Sistema chinês
Materiais	Tijolo, pedra, concreto, areia, cimento, ferro.	
Sistema	Abastecimento e esvaziamento periódicos.	Abastecimento periódico, esvaziamento não-periódico.
Possibilidade de auto instalação	Pode ser montado pelo usuário, mas a câmara de gás deve ser feita em oficina metalúrgica.	Pode ser montado inteiramente pelo usuário, desde que tenha bastante habilidade como pedreiro.
Isolamento térmico	Tem perdas de calor pela câmara de gás metálica, difícil de isolar, menos indicado para climas frios.	Feito dentro da terra, tem bom isolamento natural e a temperatura é mais ou menos constante. Pode-se melhorar o isolamento fazendo o biodigestor sob currais ou estábulos.
Perdas de gás	Sem problemas.	A parte superior deve ser protegida com materiais impermeáveis e não-porosos.
Matérias-primas usadas	Esterco, excrementos e materiais fibrosos acrescentados como aditivo.	Esterco e outros restos orgânicos (incluindo materiais fibroso), excrementos humanos.
Produtividade	Tempo de digestão 40-60 dias, produção 400 a 600 L/m ³ /dia.	Tempo de digestão 40-60 dias; produção de 150 a 350 L por m ³ do volume do digestor/dia. Se for perfeitamente estanque pode produzir até 600 L/m ³ /dia
Manutenção	A câmara de gás deve ser pintada uma vez por ano.	Deve ser limpadado uma ou duas vezes por ano.
Custo	Mais caro (depende do custo da campânula).	Plausível.
Melhorias possíveis	Campânula inoxidável, melhoria no isolamento térmico da mesma.	Abóbada impermeável, adoção de agitadores, montagem de aquecimento.

Fonte: Adaptado de Seixas *et al.* (1981).

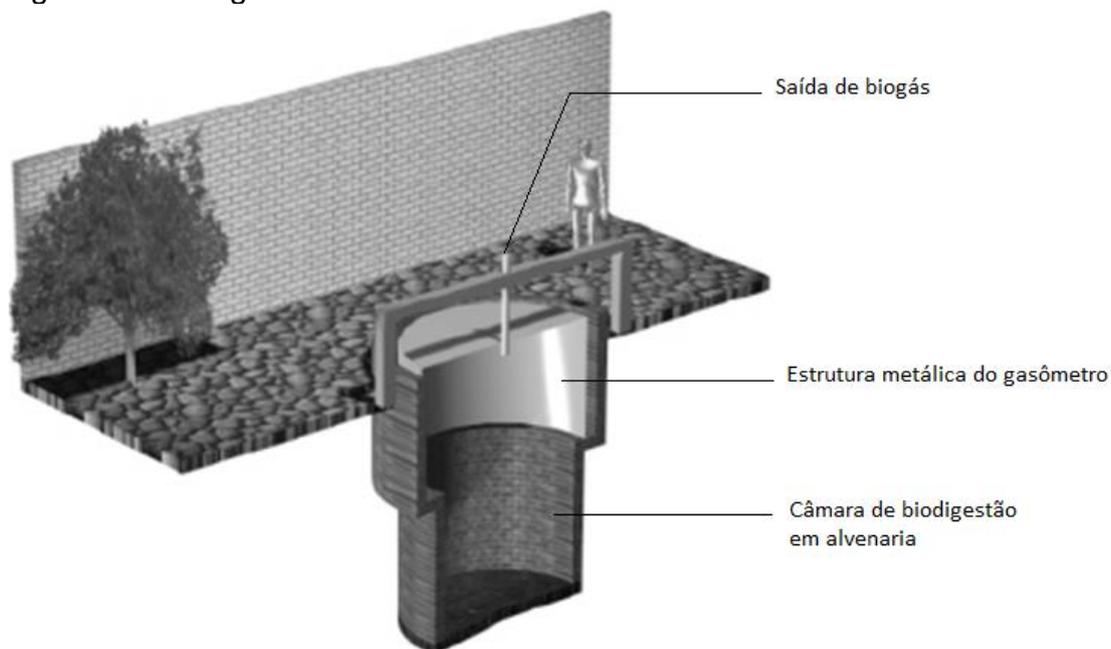
2.6.3 Biodigestor modelo batelada

Este modelo é um sistema bastante simples e de pequena exigência operacional. Sua instalação poderá ser apenas um tanque anaeróbio, ou vários tanques em série. Diferente dos outros modelos apresentados, esse modelo recebe abastecimento de uma só vez, é fechado e mantém fermentação, podendo ser descarregado e recarregado apenas quando cessar a produção de gás, movendo a estrutura metálica do gasômetro. Esse modelo adapta-se melhor a instalações em que a disponibilidade de matéria orgânica ocorre em períodos longos, dando assim, tempo

de concluir uma produção de biogás para se iniciar a próxima (DEGANUTTIL, 2002; PECORA, 2006).

A Figura 5 apresenta a estrutura simples do modelo batelada.

Figura 5 – Biodigestor modelo batelada



Fonte: Adaptado de Coelho (2012).

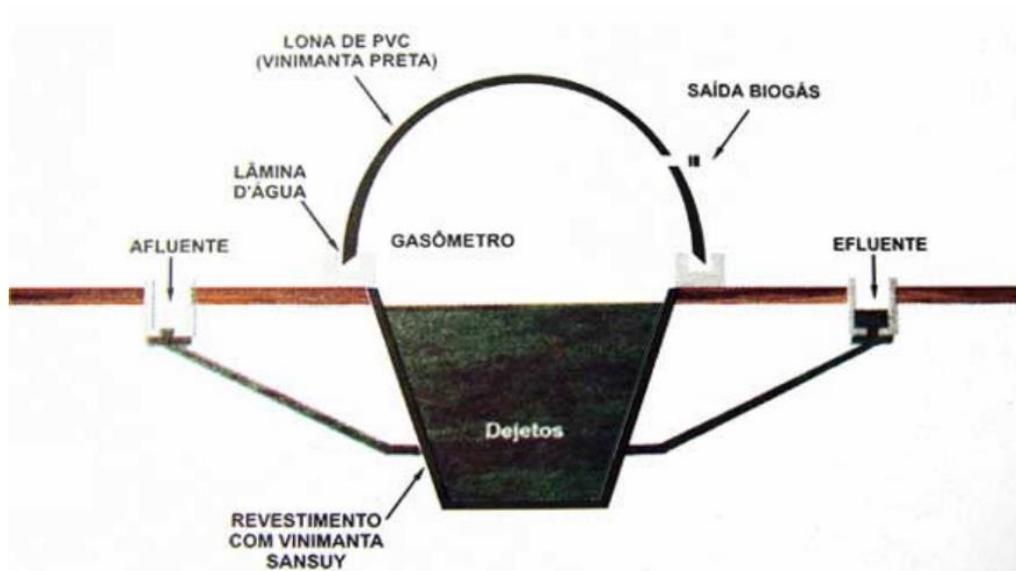
2.6.4 Biodigestor modelo canadense

O modelo canadense é de simples construção, embora seja de tecnologia mais moderna. Utiliza-se plástico em quase totalidade de sua construção, como lonas de PVC que diminuem o custo de implantação.

O modelo canadense é horizontal, com uma caixa de entrada em alvenaria, de pequena profundidade e largura maior. A vantagem é que devido o formato, quase toda a matéria orgânica aproveitará a radiação solar, mantendo alta a temperatura para biodigestão e conseqüentemente aumentando a produção de biogás, segundo Empresa Júnior de Meio Ambiente e Saneamento (2018).

A Figura 6 ilustra o modelo canadense:

Figura 6 – Biodigestor modelo canadense



Fonte: Adaptado de Lustosa *et al.* (2014).

3 METODOLOGIA

Este capítulo trata da metodologia empregada no trabalho, desde a descrição da matéria orgânica utilizada, materiais e métodos para produção do biogás em laboratório, até a captação do gás.

3.1 Materiais

- Amostras de restos de alimentos
- KOH 1,5 molar
- Água destilada
- Água Potável (para resfriamento)
- Mini processador de alimentos
- Balança de precisão
- pHmetro
- Condutivímetro
- Béqueres (1000 mL, 250 mL, 2000 mL, 50 mL)
- Proveta (1000 mL)
- Bastões de vidro
- Espátulas
- Biorreator TE-2007-E4 TECNAL
- Mangueiras
- Cronômetro

3.2 Preparação do composto

A matéria orgânica objeto deste estudo foi gentilmente cedida pelo RU da UNIPAMPA, coletada após descartes feitos pelos universitários. Foi separado 0,65 kg de resíduos para os testes. Após conferir o peso, os restos de alimento foram triturados e diluídos em 542 mL de água destilada, a fim de se obter uma proporção próxima de 1,2:1. A adição de água é necessária para conseguir uma aceleração das reações e assim agilizar o tempo de início de produção de gás em laboratório.

A Figura 7 mostra o composto antes de ser submetido a biodigestão.

Figura 7 – Composto para retenção



Fonte: Autora (2018).

O pH do composto foi de aproximadamente 5, corrigido com gotas de hidróxido de potássio (KOH) (1,5 molar) para 6,5. A correção do pH foi necessária pois a ação de microrganismos para a produção de metano é melhor nas proximidades do pH neutro (SAWAZAKI, 1985).

Foi realizada ainda a medida de condutividade elétrica no composto, à medida que se aumenta o teor de ácido acético (CH_3COOH) no composto submetido a fermentação, existe aumento da condutividade elétrica (CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 2012).

A capacidade do biorreator utilizado é 1,6 L, para segurança, foi adicionado cerca de 70% de sua capacidade, 1,12 L de composto.

Com o biorreator devidamente fechado, foi conectada à saída de gás uma base de Bernoulli, conforme pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura de produção e captação de gás



Fonte: Autora (2018).

A temperatura foi controlada nas proximidades de 32 °C, valendo-se de manta térmica e sistema de resfriamento hidráulico do próprio equipamento.

O gás produzido era lido com auxílio de uma proveta invertida, imersa em água. Uma mangueira conectada em uma das saídas do biodigestor foi introduzida no fundo da proveta, conforme deslocamento do nível de água era possível fazer a leitura do gás produzido. A fim de evitar perdas e acidentes, foi utilizado um controle de fluxo, tipo pinça rolete, que permitia o controle da passagem de gás apenas para a leitura diária.

Com recurso do próprio equipamento, a mistura foi submetida a rotação de 200 rpm, sendo realizada uma vez por dia, durante 20 minutos, antes da aferição do gás produzido.

3.3 Retenção hidráulica

Foi possível perceber a ocorrência da decomposição aeróbica da matéria orgânica no início da retenção, ainda com a presença de oxigênio no biorreator, com a diminuição da granulometria dos resíduos e a ocorrência de pequenas bolhas de ar, podendo ser deduzido que ainda existisse oxigênio dentro do resíduo, conforme Figura 9.

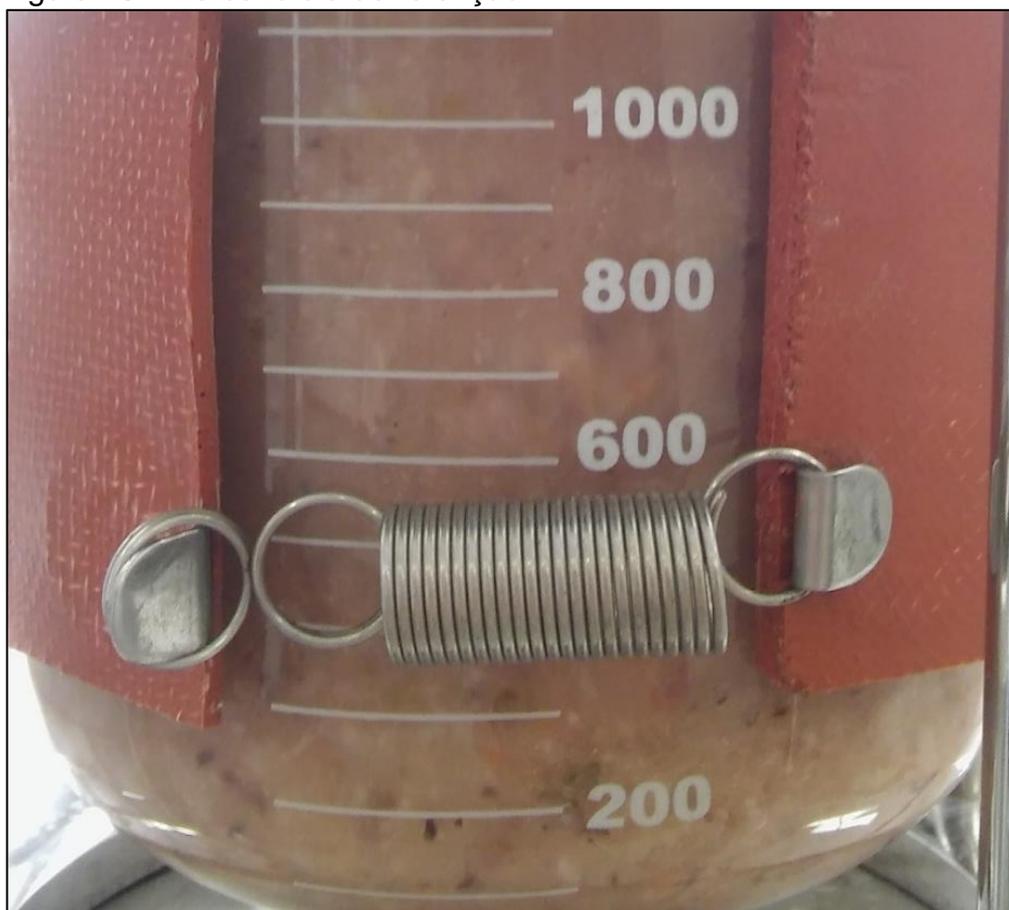
Figura 9 – Início da retenção



Fonte: Autora (2018).

Após o oxigênio no biorreator ser consumido, ocorria a transição da condição aeróbica para anaeróbica. Com a diminuição ainda mais perceptível da granulometria do resíduo, entende-se que essa seja a fase de transição, onde o oxigênio é consumido e surgem nitratos e sulfatos, conforme Figura 10.

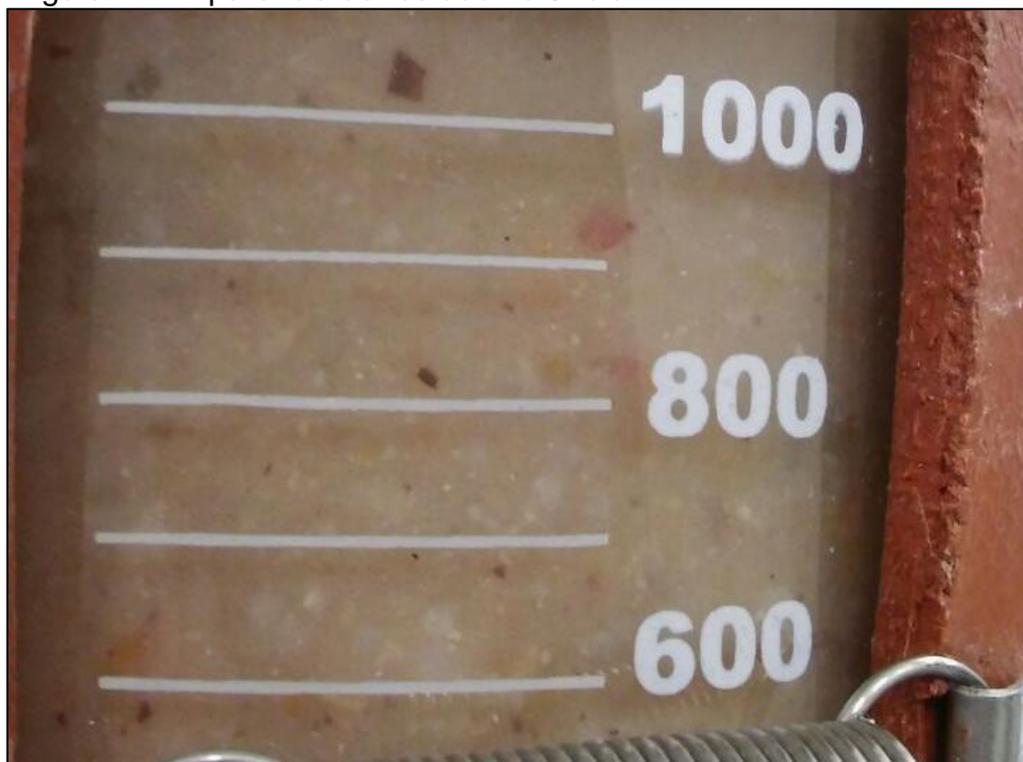
Figura 10 – Terceiro dia de retenção



Fonte: Autora (2018).

A etapa de acidez é marcada por uma queda de pH que não pôde ser lida, devido a abertura do biorreator ocasionar perda de gás e inserção de oxigênio no sistema. Pôde ser observado um clareamento da mistura no biorreator, conforme apresenta Figura 11.

Figura 11 – Aparência do resíduo no 8º dia



Fonte: Autora (2018).

Neste momento, o composto no biorreator já se tornava pastoso, conforme mostra a Figura 12, com produção de biogás em volume superior aos tempos anteriores, acredita-se ser a fase metanogênica, onde há predomínio de microrganismos estritamente anaeróbicos e metanogênicos, com maior produção de CH_4 e CO_2 .

Figura 12 – Dezesesseis dias de retenção



Fonte: Autora (2018).

Acredita-se que a etapa de maturação tenha sido alcançada no vigésimo dia de análise, onde não se observou quantidade significativa de biogás. Acreditando que esta seja a fase de dormência da atividade biológica, se deu por cessada a produção de gás.

3.4 Retirada de biogás

O biogás obtido foi observado a partir do deslocamento da coluna d'água na proveta utilizada na base de Bernoulli. Com auxílio de um controle de saída na mangueira coletora, o fluxo de gás era medido e fechado imediatamente, para se evitar perdas e eliminar possibilidades de acidentes.

O volume de biogás obtido passou por correção com relação a unidade e temperatura (TOLEDO *et al.*, 2010):

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} F \quad (2)$$

$$F = 1,0568 - 0,0034 \cdot T_c = 0,948 \quad (3)$$

Onde:

P_1 – Pressão na CNTP (1 atm)

V_1 – Volume na CNTP

T_1 – Temperatura na CNTP (293 K)

P_2 – Pressão local de Bagé (1 atm)

V_2 – Volume medido (ml)

T_2 – Temperatura medida (K)

F – Fator de correção de umidade à temperatura de medição de gás

T_c – Temperatura em °C

4 SIMULAÇÃO

Este capítulo mostra a influência na quantidade de biogás produzido, caso haja retenção no biodigestor, através de simulações considerando equações obtidas de modelagem matemática de Oro *et al.* (2017), regidas pelo sistema de equações diferenciais ordinárias, onde a quantidade de bactérias anaeróbicas no sistema é representada pela derivada de x em função do tempo. A segunda equação do sistema se refere a quantidade de biogás produzido, representada pela derivada de y em relação ao tempo:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = F(x) - pxy \\ \frac{dy}{dt} = kx - h(y, t) \end{cases} \quad (4)$$

Onde:

t é o tempo;

p e k são constantes positivas;

$F(x)$ define o fator de inibição, que mesmo sem a presença de biogás, mostra a variação de bactérias;

$h(y, t)$ função responsável pelo tipo de retirada de biogás.

Como na fase inicial pode não haver biogás, o termo inibidor é desconsiderado e a medida em que as bactérias crescem e se alimentam, produzem o biogás e se estabelece o fator inibidor.

A análise do sistema será realizada de duas formas, considerando o gás mantido dentro do biodigestor, e o gás retirado do biodigestor.

4.1 Gás Confinado no biodigestor e a influência da retirada

O termo responsável pelo tipo de retirada de biogás, inicialmente é zero. Considera-se que o crescimento das bactérias seja proporcional à quantidade de bactérias existentes. A reta de equilíbrio é dada por $x = 0$, pois não havendo bactérias, não há fermentação.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = F(x) - pxy \\ \frac{dy}{dt} = kx - 0 \end{cases} \quad (5)$$

O ajuste do modelo feito por Oro *et al.* (2017), teve como base o biodigestor da fábrica da Brahma, em Passo Fundo, RS, pois o comportamento do sistema para os biodigestores será o mesmo. As constantes para a simulação foram:

$$\alpha = 2; p = 0,001; k = 0,25; \beta = 1.$$

onde:

α : taxa de crescimento de bactérias;

p : taxa de inibição;

k : taxa de variação do produto;

β : taxa de coleta.

As variáveis para as condições iniciais consideram a quantidade de resíduos utilizados no biorreator, sendo $x_{(0)} = 650 \text{ mL}$ de substrato e $y_{(0)} = 0$, pois no início do processo não existe biogás.

Para esta situação, utilizou-se $\beta = 0.9$ como a taxa de coleta, pois numa situação real não se extrairia totalmente o gás confinado e o resto do sistema permanece o mesmo.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha x - pxy \\ \frac{dy}{dt} = kx - \beta y \end{cases} \quad (6)$$

Os pontos de equilíbrio são $(0,0)$ e $(\frac{\alpha\beta}{kp}, \frac{\alpha}{p})$. Para o tempo tendendo a infinito:

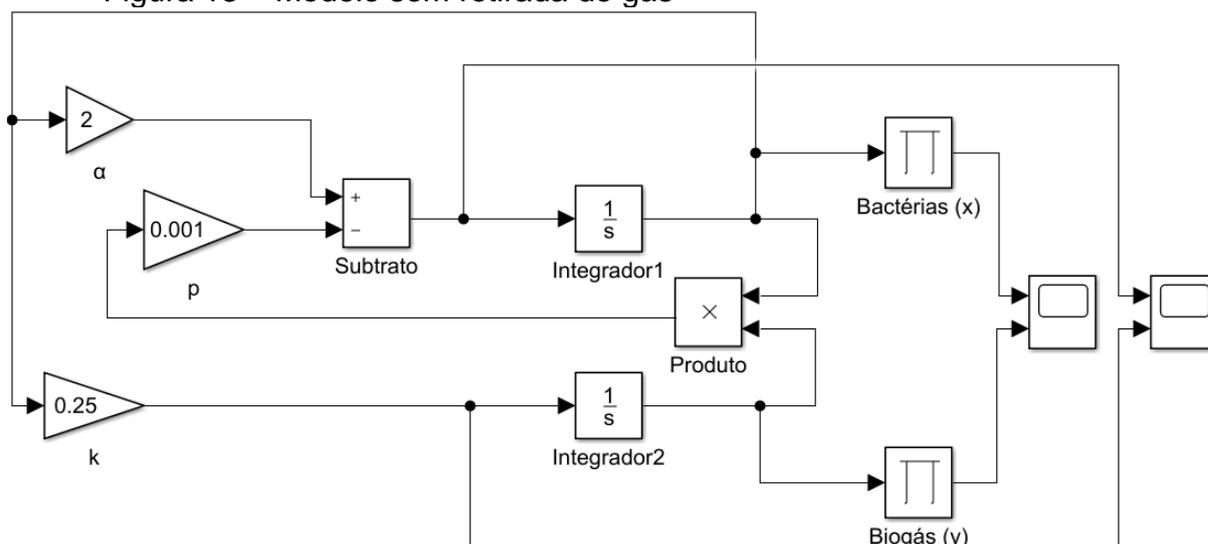
$$x(t) \rightarrow \left(\frac{\alpha\beta}{kp}\right) \text{ e } y(t) \rightarrow \frac{\alpha}{p}.$$

4.3 Ensaio com diagramas de blocos

Para a simulação foi utilizado o recurso *Simulink* do *Matlab* para projetar o sistema em diagrama de blocos.

A Figura 13 e a Figura 16 mostram os sistemas em diagramas de blocos, para os modelos de produção de biogás e crescimento de bactérias anaeróbicas, considerando sem e com retirada de biogás, respectivamente.

Figura 13 – Modelo sem retirada de gás



Fonte: Autora (2019).

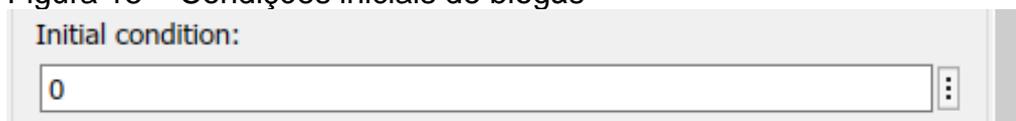
Figura 14 – Condições iniciais de bactérias



Fonte: Autora (2019).

Nos blocos integradores do sistema foram informadas as condições iniciais para x e para y , conforme Figura 14 e Figura 15, respectivamente.

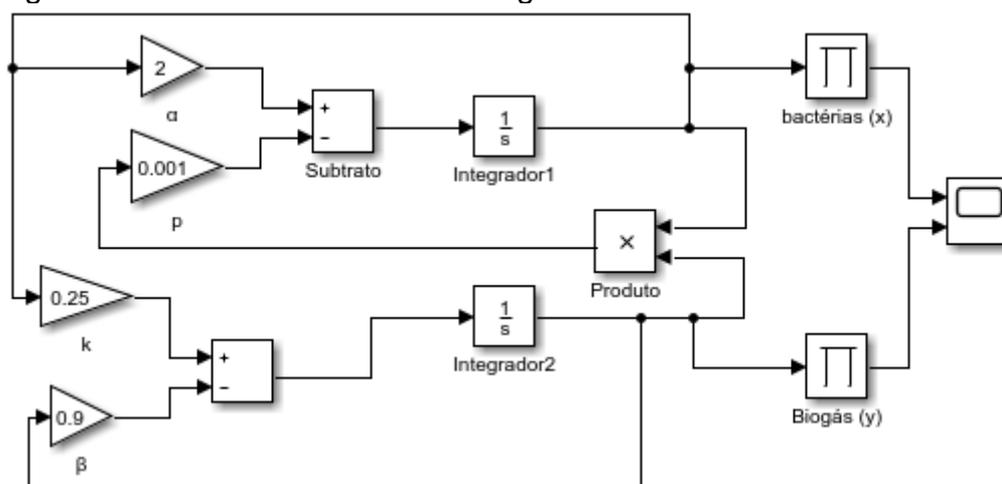
Figura 15 – Condições iniciais de biogás



Fonte: Autora (2019).

O bloco *Scope* capta o sinal de $x(t)$ e $y(t)$, ou seja, a relação entre bactérias e produção de biogás, com o passar do tempo.

Figura 16 – Modelo com retirada de gás



Fonte: Autora (2019).

O sistema apresentado para situações onde há retirada de gás é idêntico ao primeiro, com exceção da realimentação negativa com um valor quase unitário representando a retirada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 7 apresenta os valores de biogás medidos diariamente, durante 20 dias.

Tabela 7 – Produção diária de biogás

T(dias)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vol (ml)	0	35	50	50	55	60	75	110	110	160	180	165	150	150	190	290	500	-	600	680	680

Fonte: Autora (2019).

5.1 Oferta x demanda do RU

A partir dos resultados obtidos na Tabela 7 pôde-se estimar a produção anual de biogás, utilizando apenas resíduos do RU, conforme Tabela 8:

Tabela 8 – Possibilidade de geração do RU a partir do teste de laboratório

	Resíduos	Volume de biogás estimado
Laboratório	0,65 kg	0,00068 m ³
RU (dia)	85,7 kg/dia	0,0896 m ³
RU (ano) dias úteis	20568 kg/ano	21,52 m ³

Fonte: Autora (2019).

A Tabela 9 apresenta a demanda de GLP do restaurante e a estimativa de produção de biogás, valendo-se da equação 2 para corrigir o volume.

Tabela 9 – Demanda de GLP do RU

(Considerando dias úteis)	Demanda de GLP	Biogás produzido
RU (ano)	28,8 m ³ /ano	21,52 m ³ /ano
RU (ano) corrigido		18,27 m ³ /ano

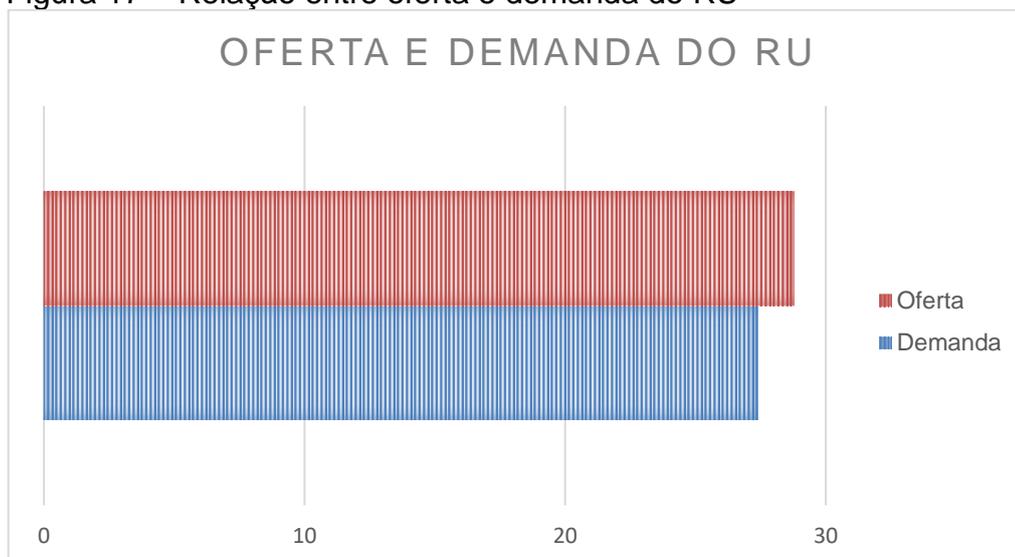
Fonte: Autora (2019).

Estimou-se que podem ser gerados cerca de 21,5 m³ de biogás anualmente a partir dos resíduos do RU, como a equivalência de GLP quanto ao biogás é 1:1,5, o biogás produzido supriria toda a demanda de GLP.

Ao considerar a correção de umidade e temperatura o volume de biogás obtido cai para 0,000888184615m³ kg⁻¹.

O volume estimado de produção de 18,27 m³ano⁻¹, passa para 27,4 m³ano⁻¹, conforme Figura 17, considerando a equivalência do biogás quanto ao GLP (1:1,5) e assim supriria 95,15% da demanda do RU.

Figura 17 – Relação entre oferta e demanda do RU



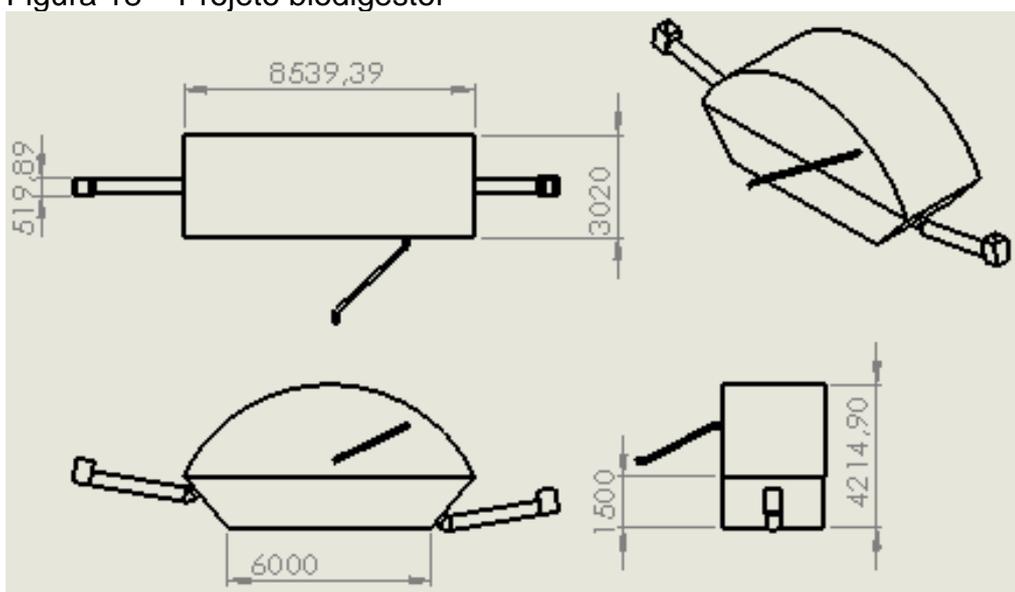
Fonte: Autora (2019).

5.2 Escolha do modelo do biodigestor

O modelo de biodigestor escolhido para o RU foi o modelo canadense que apresenta menor custo de instalação além de aproveitar melhor a radiação solar, o que é uma vantagem para regiões com temperaturas baixas.

Utilizando o software *Solid Works*, foi projetado o modelo canadense para o RU, mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Projeto biodigestor

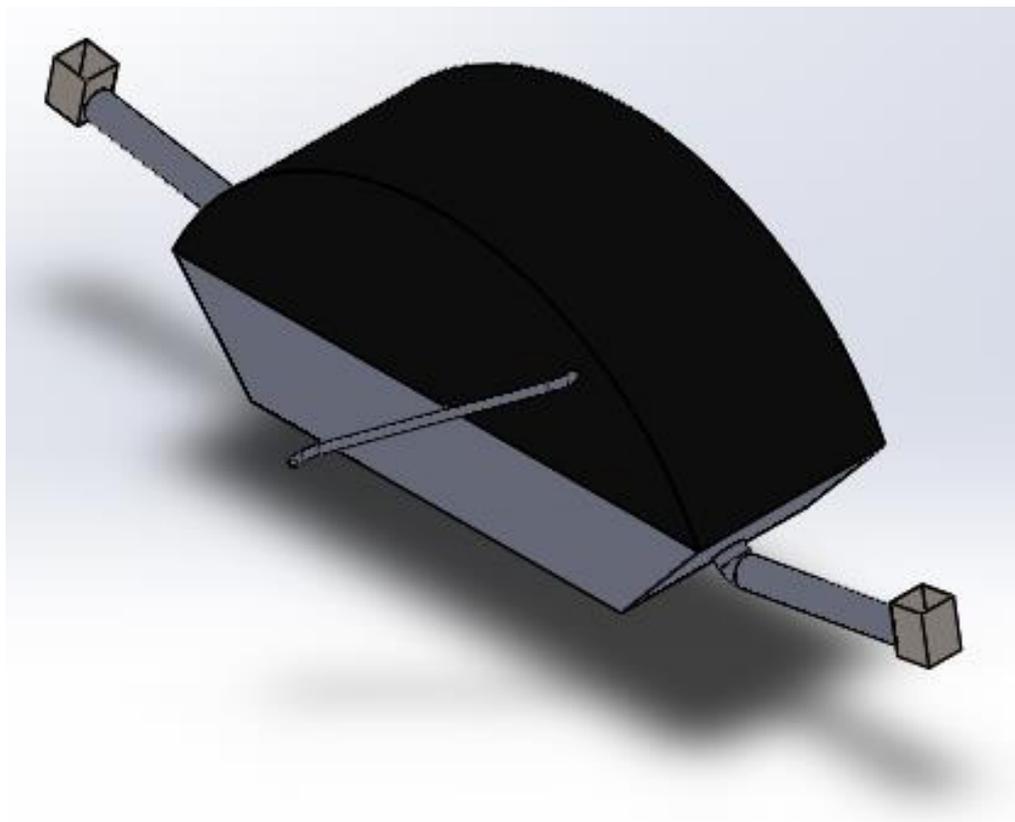


Fonte: Autora (2019).

O modelo projetado conta com uma tubulação para afluente à esquerda, uma tubulação para efluente à direita, um gasômetro de lona PVC com saída de biogás e um tanque para disposição de resíduos, podendo ser construído com vinimanta. As dimensões foram pensadas para atender uma disposição além dos resíduos gerados por mês, pelo RU, pois além do número de pessoas atendidas pelo restaurante não ser fixo, deve-se considerar possibilidade de aumento do restaurante e evitar sobrecarga no tanque. Os materiais utilizados para a construção de um biodigestor modelo canadense podem diminuir o custo de instalação, se comparado aos demais modelos.

A Figura 19 ilustra o resultado do projeto do biodigestor modelo canadense.

Figura 19 – Vista isométrica do biodigestor



Fonte: Autora (2019).

Existem opções no mercado que possibilitam a produção de biogás sem construções complexas, como é o caso do biodigestor *HomeBiogas 2.0*, mostrado na Figura 20, que tem vida útil de 10 anos e já é uma opção adotada por restaurantes, conforme matéria noticiada no JORNAL NACIONAL.

Figura 20 – Partes do biodigestor Homebiogas 2.0



Fonte: Ecoeficientes – Escritório de arquitetura especializado em sustentabilidade.

No momento desta pesquisa, o preço médio de 1000L de GLP foi de R\$2540,00. Como seria possível atender 95,15% da demanda, com biogás produzido no RU, o gasto anual com gás de cozinha passaria de R\$73142,86 para R\$ 3547,43.

A Figura 21 ilustra o retorno do investimento adotando o biodigestor comercial citado.

Figura 21 – Recuperação do investimento



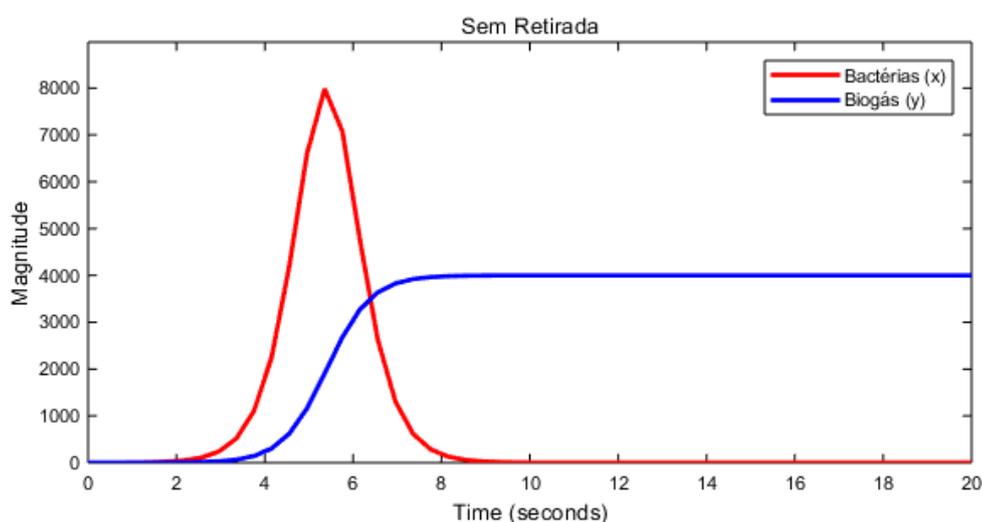
Fonte: Autora (2019).

O gráfico mostra a recuperação do investimento no sexto mês utilizando 4 biodigestores *Homebiogas*, considerando o valor investido inicialmente de R\$5.900,00 por biodigestor, mais R\$6.500,00 referente a tubulação e instalações, até alcançar o lucro líquido acumulado. A economia foi calculada por *payback* para dez anos, por ser o tempo de vida útil do equipamento.

5.3 Influência de retiradas de gás no volume produzido

A Figura 22 apresenta as curvas de bactérias e de biogás em função do tempo (s), considerando um sistema sem retirada de biogás.

Figura 22 – Curvas produção sem retirada

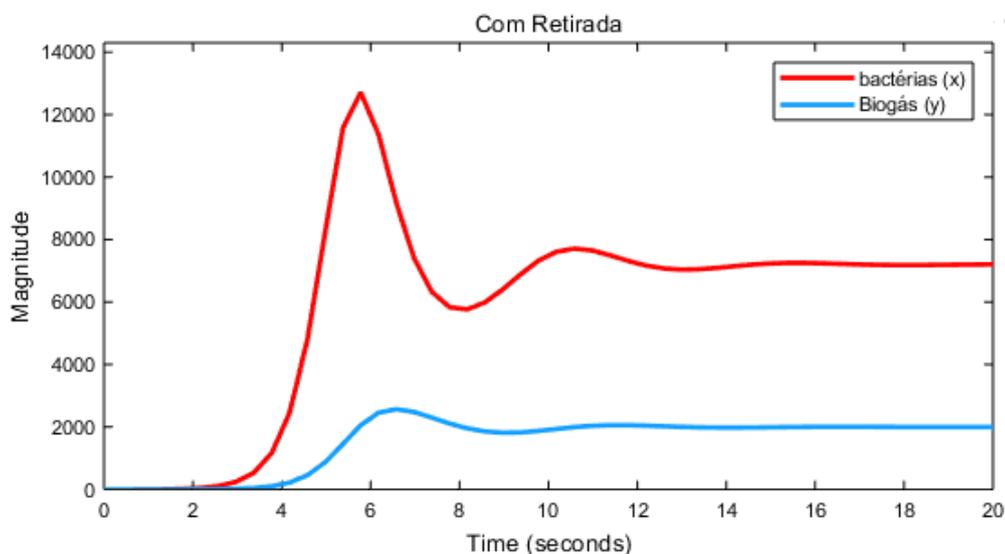


Fonte: Autora (2019).

O resultado aponta o crescimento máximo de bactérias em cerca de 8000 mL de substrato e decresce com o passar do tempo, antes da máxima produção, onde já é considerável a inibição de bactérias. Percebe-se a estabilidade de produção em 4000 mL de biogás e a extinção das bactérias logo em seguida, com o biogás retido no biodigestor.

A Figura 23 apresenta as curvas de bactérias e biogás em função do tempo (s), considerando retirada de biogás do biodigestor.

Figura 23 – Curvas de produção com retirada

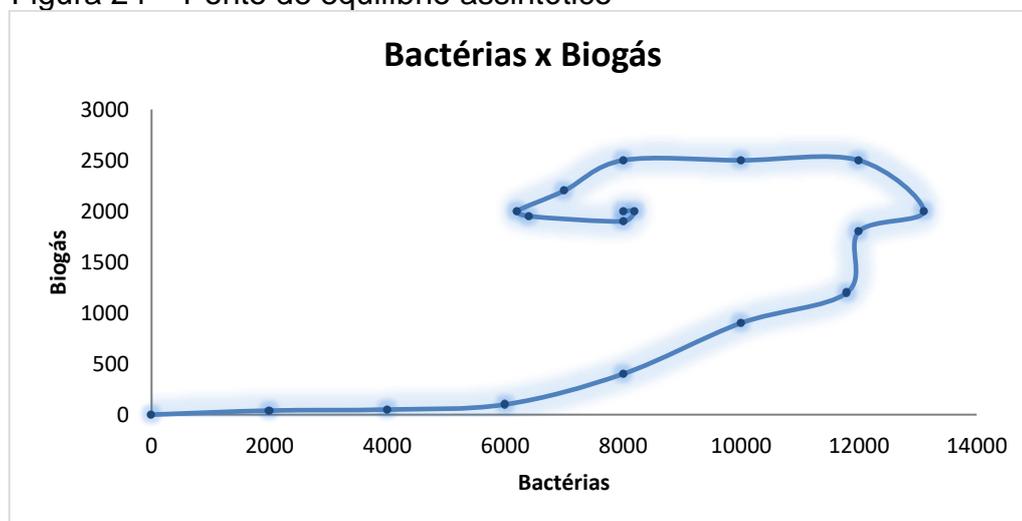


Fonte: Autora (2019).

É notada uma demora na inibição de bactérias quando se faz retirada diária de biogás, as bactérias apresentam crescimento e tendem a estabilizar o crescimento em cerca de 7000 mL, para as condições simuladas. Como existe retirada quase proporcional à quantidade produzida, o sistema demora mais para atingir equilíbrio.

O ponto de equilíbrio assintótico do sistema é uma curva de bactérias x biogás, que pode ser simulada tanto no *Matlab* quanto em qualquer software que plote dispersão. Neste caso utilizou-se o *Excel* por ser um *software* presente na maioria dos computadores, resultando na Figura 24.

Figura 24 – Ponto de equilíbrio assintótico



Fonte: Autora (2019).

A curva gerada lembra um espiral e pode se aproximar ainda mais de um espiral considerando-se mais pontos no gráfico e apresentando o resultado em escala logarítmica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados foram baseados em prática considerando apenas restos de alimentos do RU, o que aponta o atendimento de mais de 95% da demanda de GLP do restaurante, caso os restos de alimentos sejam corrigidos com outro tipo de resíduo, como esterco bovino, de acordo com a literatura, a produção de biogás poderia ser ainda maior. Através de simulação, considera-se ainda uma possibilidade de aumento de produção caso sejam feitas retiradas de biogás proporcionais a quantidade produzida. No que se refere a benefícios socioambientais, um projeto para produção de biogás a partir de restos de alimentos do RU poderia evitar o lançamento de metano na atmosfera e por ser um gás de origem renovável, sua utilização e aproveitamento proporcionaria retorno econômico. O uso dos biodigestores comerciais apresentados poderia proporcionar retorno do investimento já no sexto mês de operação, economizado com compra de GLP e podendo proporcionar benefícios diversos à comunidade acadêmica.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Sandra. **Gases poluentes**. Disponível em: <http://knoow.net/ciencterravida/geografia/gases-poluentes>. Acesso em: 17 maio 2018.
- ANGONESE, André Ricardo. CAMPOS, Alessandro Torres. PALACIO, Soraya Moreno. SZIMANSKI, Nayara. Avaliação da eficiência de um biodigestor tubular na redução da carga orgânica e produção de biogás a partir de dejetos de suínos. **An. 6. Enc. Energ. Meio Rural 2006**. Campinas, 2006. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100022&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 10 fev. 2019.
- ARAUJO, Ana Paula Caixeta. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico**. Monografia (bacharel em engenharia química) – Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de engenharia química, Uberlândia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20292/3/Produ%C3%A7%C3%A3oBio%C3%A1sRes%C3%ADduos.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo: **ABRELPE** -. ISSN 2179-8303. Disponível em: http://www.mpdft.mp.br/portal/pdf/comunicacao/junho_2018/panoramaanexos2016.pdf. Acesso em: 19 abr. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGAS. **Biogás e biometano no Brasil**. Programa RenovaBio. Brasília, 20 dez. 2016. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/4323103/ABioga%CC%81s.pdf/8e80e093-4042-4c24-ad9e-851c6190b399>. Acesso em: 15 out. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGAS. **Proposta de programa nacional do biogás e do biometano**. São Paulo, nov. 2015. Disponível em: <http://www.energiaeclima.com.br/wp-content/uploads/2017/Biogas.pdf>. Acesso em: 21 out. 2018.
- BARCELOS, Beatriz Rodrigues. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. Dissertação (mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos) - Faculdade de tecnologia, departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: https://ptarh.unb.br/wp-content/uploads/2017/03/Beatriz_Rodrigues_de_Barcelos.pdf. Acesso em: 15 dez. 2018.
- BRASIL. **Decreto-lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Câmara dos Deputados, Brasília, DF, n. 81, p. 73, 2012.
- BRASIL. **Norma brasileira nº 10.004, de 31 de maio de 2004**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, p.71, ed. 02, 31 maio 2004.

BRITTO, Maria Lúcia Castro Penas Seara. **Taxa de emissão de biogás e parâmetros de biodegradação de resíduos sólidos urbanos no aterro metropolitano Centro**. Dissertação (mestrado profissional em gerenciamento e tecnologias ambientais no processo produtivo) – Universidade Federal da Bahia. Departamento de engenharia ambiental, Salvador, 2006. Disponível em: http://www.teclim.ufba.br/site/material_online/dissertacoes/dis_maria_britto.pdf. Acesso em: 21 jul. 2018.

CALDERONI, Sabetai. **Os bilhões perdidos no lixo**. São Paulo: Humanitas FFLCH/USP, 2003.

CASARIN, Daiane Schwanz. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos do município de Morro Redondo/RS**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia sanitária e ambiental) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2013. Disponível em: https://wp.ufpel.edu.br/esa/files/2013/10/TCC_DAIANE-CASARIN.pdf. Acesso em: 03 jan. 2018.

COELHO, Pedro. **Biodigestores contínuos e de batelada**. Disponível em: <https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/07/biodigestores.html>. Acesso em: 12 maio 2018.

CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 52., 2012, Recife. **Artigo em anais de congresso**. Utilização da condutividade elétrica no monitoramento de processo fermentativo lento. Ano 52. Recife: Associação Brasileira de Química, 2012. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2012/trabalhos/10/1330-14049.html>. Acesso em: 05 mar. 2019.

CONGRESSO BRASILEIRO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS, 1., 2009, Vitória. **Artigo em anais de congresso**. Potencial de Mitigação de Emissões de Metano via Projetos de Compostagem de Pequena Escala. Viçosa: SBCS, 2009. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/184913/1/Potencial-de-mitigacao-de-emissoes-de-metano-via-projetos-de-compostagem-de-pequena-escala.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2019.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares. **Biomassa para energia**. Campinas: *Editora da UNICAMP*, 2008.

D'ALMEIDA, Maria Luiza Otera; VILHENA, André. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado – Segregação de Materiais, ed.04. 316p. São Paulo: **CEMPRE**, 2018. Disponível em: http://cempre.org.br/upload/Lixo_Municipal_2018.pdf. Acesso em: 05 fev. 2018.

DEGANUTTIL, Roberto.; PALHACI, Maria do Carmo Jampaulo; ROSSI, Marco; TAVARES, Roberto; SANTOS, Claudemilson. Biodigestores rurais: Modelo indiano, chinês e batelada. **An. 4. Enc. Energ. Meio Rural 2002**. Campinas, 2002. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100031&scRipt=sci_arttext&tIng=pt. Acesso em: 20 jan. 2019.

DONHA, Mauro Siqueira. **Conhecimento e participação da comunidade no sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: O caso de Marechal Cândido Rondon - PR**. 2002. Dissertação (mestrado em engenharia de produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pós-graduação em engenharia de produção, Florianópolis, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/82356/189193.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 26 mar. 2019.

ECOEICIENTES – Escritório de arquitetura especializado em sustentabilidade. **Home biogás – os resíduos orgânicos viram gás de cozinha**. Disponível em: <http://www.ecoeicientes.com.br/home-biogas/>. Acesso em: 18 abr. 2019.

EMPRESA JÚNIOR DE MEIO AMBIENTE E SANEAMENTO. **Tipos de biodigestor**. Disponível em: <https://emasjr.com.br/2018/04/22/tipos-biodigestor/>. Acesso em: 19 abr. 2019.

ENSINAS, Adriano Viana. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas SP**. 2003. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Federal de Campinas. Faculdade de engenharia mecânica, Campinas, 2003. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264904>. Acesso em: 22 jan. 2019.

FARIA, Rui Alexandre Pereira. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – Estudo de caso**. 2012. Dissertação (mestrado em engenharia na agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de pós-graduação em energia na agricultura, Cascavel, 2012. Disponível em: http://portalpos.unioeste.br/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Rui_A_P_Faria.pdf. Acesso em: 03 dez. 2018.

FERREIRA, Carla Miranda. FERNANDES, Carla Barbosa. VIEIRA, Aline Vieira da Silva e. MELO, Cibelly Caroliny Santos. SALES, Jeferson Santos. Biodigestor para o gás do lixo orgânico. **E-xacta**. v. 4, n. 2, p. 5-17. Belo Horizonte, set/out. 2011. Disponível em : <https://docplayer.com.br/2097864-Biodigestor-para-o-gas-do-lixo-organico.html>. Acesso em: 07 maio 2018.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Vérdis de. **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – Estudo de caso**. 2007. Trabalho de graduação interdisciplinar (bacharelado em engenharia mecânica) – Universidade Presbiteriana Mackenzie. Escola de engenharia, São Paulo, 2007. Disponível em: <http://143.107.4.241/download/publicacoes/Natalie.pdf>. Acesso em 21 out. 2018.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Biogás, energia por meio do lixo**. Disponível em: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/biogas-energia-por-meio-lixo.htm>. Acesso em: 03 abr. 2018.

GASPAR, Rita Maria Bedran Leme. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: Um estudo de caso na região de Toledo-Pr.** 2003. Dissertação (mestrado em engenharia de produção) - Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pós-graduação em engenharia de produção, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/85585/224646.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 nov. 2018.

GENOVESE, Alex Leão. UDAETA, Miguel Edgar Morales. GALVAO, Luiz Claudio Ribeiro. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. **An. 6. Enc. Energ. Meio Rural 2006.** São Paulo, ano 6, 2006. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100021&script=sci_arttext. Acesso em: 15 maio 2019.

GONÇALEZ, Juliana Justi. MOLITERNO, Marcos. **Geração de energia elétrica por meio de biogás extraído do aterro sanitário bandeirantes e o mecanismo de desenvolvimento limpo como indutor e investimentos socioambientais.** Monografia (gestão ambiental e negócios no setor energético) – Universidade de São Paulo. Instituto de eletrotécnica e energia, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/sites/default/files/Juliana%20Gon%C3%A7alves%20Justi%20et%20al.pdf>. Acesso em: 14 set. 2018.

JORNAL nacional. Direção Ali Kamel. Produção: Carolina Iskandarian, Dagoberto Souto Maior, Ingrid Kebian, Karina Barros, Rogerio Nery. Editor chefe e apresentador: William Bonner. Editora-executiva e apresentadora: Renata Vasconcellos. Matéria: Comida que ia para o lixo pode se transformar e ser reaproveitada, 2019. 1 vídeo (4 min. e 48 seg.). Publicado pelo portal G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2019/05/14/comida-que-ia-para-o-lixo-pode-se-transformar-e-ser-reaproveitada.ghtml>. Acesso em: 15 maio 2019.

LEONARDO, Kurdian Castanho Afonso. Avaliação e otimização de biodigestor. **Departamento de ciência dos materiais e metalurgia**, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2006/Resumos%202006/CTC/DCMM-OK/Carlos%20Leonardo%20Kurdian%20Castanho%20Afonso.pdf. Acesso em: 03 mar. 2019.

LUSTOSA, Gleidson Neres. MEDEIROS, Icaro Hendrix Borges de. **Proposta de um biodigestor anaeróbio modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos orgânicos.** 2014. Monografia (bacharelado em engenharia civil) – Universidade de Brasília, departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, 2014. Disponível em: http://bdm.unb.br/bitstream/10483/12346/1/2014_GleidsonNeresLustosa_IcaroHendrixBorgesdeMedeiros.pdf. Acesso em: 06 fev. 2019.

MACHADO, Gleysson. **Biodigestão anaeróbica**, 10 maio 2013. Portal do biogás. Disponível em: <https://www.portaldobiogas.com/biodigestao-anaerobia/>. Acesso em: 05 mar. 2019.

MATOS, Julio Cesar de Souza. **Influência do eletromagnetismo na biodigestão anaeróbia**. 2017. Dissertação (mestrado em geociências e meio ambiente) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2017. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/152094/matos_jcs_me_rcla.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em 13 jan. 2019.

MEDEIROS, José Humberto Dantas de. **Gestão de resíduos sólidos para municípios de pequeno e médio porte à luz da política nacional de resíduos sólidos**. Monografia (bacharel em ciência e tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Angicos, 2012. Disponível em: <http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/232/TCC%20-%20Jos%C3%A9%20Humberto.pdf>. Acesso em 02 out. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural. Balanço de gás natural. **Secretaria de petróleo, gás natural e combustíveis renováveis**, n. 110, abr. 2016. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/10584/3821524/Boletim_Gas_Natural_nr_110_ABR_16.pdf/b77b7897-320d-40ab-903b-2592c4374b27. Acesso em: 25 fev. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural. Balanço de gás natural. **Secretaria de petróleo, gás natural e combustíveis renováveis**, n. 134, abr. 2018. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138769/0/Boletim_Gas_Natural_nr_134_ABR_18.pdf/4e49ca76-ad57-4b4f-b30d-f8d3ce0669c9. Acesso em: 25 fev. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural. Balanço de gás natural. **Secretaria de petróleo, gás natural e combustíveis renováveis**, n. 146, abr. 2019. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138769/0/Boletim_Gas_Natural_nr_146_ABR_19%2B.pdf/16d24556-9622-4938-88e5-9aaa8808bb8d. Acesso em: 02 jun. 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>. Acesso em: 03 abr. 2019.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Biodigestão: a alternativa energética. São Paulo: **Nobel**, 1986.

OLIVEIRA, Paulo Armando Victória de.; HIGARASHI, Martha Mayumi.; **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. Concórdia: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -. ISSN 0101-6245, 2006. Disponível em: http://www.cnpa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/publicacao_l4l77t4r.PDF. Acesso em: 12 jan. 2019.

ORO, Neuza Terezinha. SAUSEN, Airam Tereza Zago Romcy. SAUSEN, Paulo Sergio. Modelagem e simulação do processo de produção de biogás num biodigestor urbano. **CIATEC**, v. 9, n. 1, p. 25-35, jun. 2018. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/ciatec/article/download/6603/4195/>. Acesso em: 15 mar. 2019.

PECORA, Vanessa. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de caso**. 2006. Dissertação (mestrado em energia) – Universidade de São Paulo. Programa interunidades de pós-graduação em energia, São Paulo, 2006. Disponível em: http://www.iee.usp.br/producao/2006/Teses/tese_vanessapecora.pdf. Acesso em 25 mar. 2019.

PINTO, Deíza Maria Correa Lara. POVINELLI, Jurandyr. **Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolado**. Tese (doutorado em engenharia hidráulica e saneamento) – Universidade de São Paulo. Escola de engenharia de São Carlos, São Paulo, 2000.

PORTAL SÃO FRANCISCO. **Aterro sanitário**. Disponível em: <https://www.portalsaofrancisco.com.br/meio-ambiente/aterro-sanitario>. Acesso em: 02 jul. 2019.

PORTAL SÃO FRANCISCO. **Destino do lixo**. Disponível em: <https://www.portalsaofrancisco.com.br/meio-ambiente/destino-do-lixo>. Acesso em: 19 abr. 2019.

POSSAMAI, Fernando Pagani. VIANA, Ednilson. SCHULZ, Edmar Harry. COSTA, Marcel Madeira da. CASAGRANDE, Everson. Lixões inativos na região carbonífera de Santa Catarina: análise dos riscos à saúde pública e ao meio ambiente. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 12, n. 1, p. 171-179. ISSN 1413-8123, mar. 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-81232007000100020>. Acesso em: 20 abr. 2019.

REATOR BATELADA. Disponível em: <http://www.marco.eng.br/reatores/reatorbatelada.html>. Acesso em: 12 jun. 2019.

REIS, Pedro. Energia do biogás. **Portal Energia**, 10 nov. 2015. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/energia-do-biogas/>. Acesso em: 04 fev. 2019.

RODRIGUES, Waldecy. FILHO, Luiz Norberto Lacerda Magalhães. PEREIRA, Regiane dos Santos. Análise dos determinantes dos custos de resíduos sólidos urbanos nas capitais estaduais brasileiras. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 8, n. 1, p. 130-141, jan./abr. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.008.001.AO02>. Acesso em: 02 maio 2019.

SAWAZAKI, Haiko Enok. TEIXEIRA, João Paulo Feijão. MORAES, Roberto Machado de. O pH e a temperatura na produção de biogás a partir de casca de arroz. **Bragantia**, v. 44, n. 2, p. 715-721, ISSN 0006-8705. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87051985000200019>. Acesso em: 25 fev. 2019.

SCHALCH, Valdir. LEITE, Wellington Ciro de Almeida. JUNIOR, José Leomar Fernandes. CASTRO, Marcus Cesar Avezum Alves de. **Gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos**. Tese (doutorado em engenharia hidráulica e saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: http://www.deecc.ufc.br/Download/Gestao_de_Residuos_Solidos_PGTGA/Apostila_Gestao_e_Gerenciamento_de_RS_Schalch_et_al.pdf. Acesso em 18 set. 2018.

SEIXAS, Jorge. FOLLE, Sérgio. MARCHETTI, Delmar. Construção e funcionamento de biodigestores. Brasília: **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 1981. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/549425/1/cirtec04.pdf>. Acesso em: 21 maio 2019.

SILVA, Jaqueline dos Santos. BOSCO, Tatiane Cristina Dal. Crescimento de bactérias heterotróficas e fungos em processos de compostagem e vermicompostagem de lodo biológico de laticínio. Londrina: **Blucher**, 2017.

SÍNTESE NATURAL MEIO AMBIENTE. **Tratamento de água com biodigestores – bio-digestão enzimática**. Disponível em: <http://www.snatural.com.br/tratamento-efluentes-biodigestores/>. Acesso em: 17 mar. 2019.

SOUTO, Gabriel D'arrigo de Brito. **Efeito da variação gradual da taxa de recirculação do lixiviado em reatores anaeróbios híbridos na digestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Universidade de São Paulo. Escola de engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-09112005-115427/publico/GABRIEL_SOUTO_2005.pdf. Acesso em 02 ago. 2018.

SOUZA, Ozair. FEDERIZZI, Mauri. Coelho, Bruna. Wagner, Theodoro. Wisbeck, Elizabeth. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 04, ISSN: 1807-1929. Campina Grande, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000400014>. Acesso em: 28 abr. 2019.

STREB, Cleci Schalemburger. **A coleta informal de lixo no município de campinas: uma análise na perspectiva das questões energéticas e da qualidade de vida**. Dissertação (mestrado em planejamento de sistemas energéticos) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de engenharia mecânica, Campinas, 2001. Disponível em: https://www.unimep.br/phpg/bibdig/pdfs/docs/25052015_155521_magdapiresmombri ni_ok.pdf. Acesso em 12 dez. 2018.

SUA PESQUISA.COM. **Biogás**. Disponível em: http://www.suapesquisa.com/o_que_e/biogas.htm. Acesso em: 18 maio 2018.

TOLEDO, Arestides Roberto Cavalcante. MIRANDA, Renato Menezes Barbosa de. SANTOS, Millane Barbosa dos. FARIAS, Edcarlos Cardoso de. CEZAR, Vicente Rodolfo Santos. Avaliação do funcionamento de biodigestores anaeróbios de fases separadas e leito fixo abastecidos com substrato proveniente da mistura de manipueira e H₂O. *In*: SIMPÓSIO ALAGOANO DE GESTÃO AMBIENTAL, 1., 2010, Arapiraca. **Anais** [...]. Arapiraca: Universidade Estadual de Alagoas., 2010. p. 51-61 p. Disponível em: <http://files.simagauneal.webnode.com.br/200000058-aff70b0f11/Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20funcionamento%20de%20biodigestores%20anaer%C3%B3bios%20de%20fases.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2019.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. **Biogás para geração de energia elétrica cresce 30% em um ano**. Disponível em: <https://www.abiogas.org.br/biogas-energia-eletrica>. Acesso em: 02 abr. 2018.

VANZIN, Emerson. **Procedimento para análise de viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica**. Dissertação (mestrado em engenharia civil e ambiental) - Universidade de Passo Fundo. Programa de pós-graduação em engenharia, Passo Fundo, 2006. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/230#preview-link0>. Acesso em: 03 maio 2018.

VESPA, Isabel Cristina Galbiatti. JÚNIOR, Jorge de Lucas. **Características minerais e energéticas do lixo urbano em processos de compostagem e biodigestão anaeróbia**. Dissertação (mestrado em energia na agricultura) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/90575>. Acesso em: 12 ago. 2018.

ZENATTI, Dilcemara. Biogás. **PALOTINA**. 05 maio 2019. Disponível em: <http://www.palotina.ufpr.br/portal/bioenergia/wp-content/uploads/sites/5/2019/05/Biogas.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2019.

ANEXO A – Artigo publicado em 2018

Anais do 10º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNIPAMPA

Carla Daniela Cordeiro Luiz ¹
Amanda Neres Martinello ²
Sabrina Neves da Silva ³

Resumo:

A crescente demanda de energia, a poluição ambiental e o aumento do desenvolvimento econômico vêm estimulando pesquisas com foco no aumento de fontes alternativas de energias renováveis. É grande a preocupação com o aumento na produção de resíduos sólidos, que acarreta problemas sociais e econômicos. Problemas de demanda de energia e descartes de lixo podem ter uma solução viável a partir do biogás. O biogás é resultado da digestão anaeróbica da biomassa por bactérias. A proposta deste trabalho é avaliar o potencial de biogás dos resíduos alimentares do restaurante universitário da UNIPAMPA, campus Bagé. As análises foram realizadas em laboratório de biocombustíveis da UNIPAMPA, valendo-se de um biorreator com capacidade de 1,6 L. Foi triturado 0,65 kg de restos de alimentos com água destilada, na proporção de 1,2:1. O pH do composto foi de aproximadamente 5, corrigido com gotas de hidróxido de potássio (KOH) 1,5 Molar, para 6,5. A condutividade elétrica lida foi de 5,87 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Durante 18 dias de retenção foi obtido 600 mL de biogás, submetido a teste de chama que comprovou Inflamabilidade. Os resultados do teste apontam produção de biogás em cerca de 98% da demanda do RU, sendo a produção de biogás viável se adotadas parcerias para aumento da matéria prima.

Palavras-chave: Biogás. Biocombustíveis. Energia. Reciclagem. Lixo.

Modalidade de Participação: Iniciação científica

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DO RU A PARTIR DE RESTOS DE ALIMENTOS

¹ Aluna de graduação. c.danielacordeiro@gmail.com. Autora principal

² Aluna de Graduação. amandamartinello12@gmail.com. Co-autora

³ Docente. sabrinasilva@unipampa.edu.br. Orientadora

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESTOS DE ALIMENTOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UNIPAMPA, CAMPUS BAGÉ

1 INTRODUÇÃO

Um foco de grande relevância atualmente é a demanda e a produção de energia, dentre os processos existe a preocupação com o fim dos recursos, atualmente amenizado por alternativas renováveis. A demanda de gás natural no Brasil está em torno de 98 milhões de m^3 por dia em junho de 2018, onde o biogás se

quer é citado no Boletim mensal de oferta e demanda da Agência Nacional do Petróleo, mas algumas usinas já operam a partir de resíduos sólidos. O Brasil tem estimativa de produção diária de 10,7 milhões de m³ por dia para 2025, hoje tem potencial de produção de 7 milhões de m³ de biogás por dia, a partir de saneamento (AUTOMOTIVEBUSINESS, 2018) (MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2018) (RODRIGUES, 2018).

A crescente demanda de energia, a poluição ambiental e o aumento do desenvolvimento econômico vêm estimulando pesquisas com foco no aumento de fontes alternativas de energias renováveis (ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS, 2010).

É grande a preocupação com o aumento na produção de resíduos sólidos (lixo), que acarreta problemas sociais e econômicos. Uma alternativa para esse cenário é a utilização dos resíduos como biomassa para produção de biogás (COSTA, 2017).

O biogás é resultado da digestão anaeróbica da biomassa por bactérias (BUENO, 2010), divididas em quatro principais etapas: Consumo de oxigênio, acidez, fase metanogênica (predomínio de produção de metano) e maturação dando fim ou diminuindo a produção (VANZIN, 2006).

A proposta deste trabalho é avaliar o potencial de produção de biogás a partir de restos de alimentos do restaurante universitário da UNIPAMPA, campus Bagé.

2 METODOLOGIA

Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizados: Amostras de restos de alimentos, hidróxido de potássio (KOH) 1,5 molar, água destilada, água (potável para resfriamento), mini processador de alimentos Britânia, balança de precisão, pHmetro, condutivímetro, béqueres (1000 mL, 250 mL, 2000 mL, 50 mL), proveta (1000 mL), bastões de vidro, espátulas, biorreator TE-2007-E4 *Tecnal*, mangueiras e cronômetro.

Preparação do composto

A matéria orgânica objeto deste estudo foi cedida pelo restaurante universitário da UNIPAMPA, coletada no mesmo dia em que foi gerada, após descartes feitos pelos universitários. Foram separados 0,65 kg de resíduos para os testes. Após conferir o peso, os resíduos foram triturados e diluídos em 542 mL de água destilada, a fim de se obter uma proporção próxima de 1,2:1. A adição de água foi necessária para acelerar as reações e agilizar o tempo de produção de biogás em laboratório.

O pH do composto foi de aproximadamente 5, corrigido com gotas de KOH (1,5 molar) para 6,5. A correção do pH foi necessária pois a ação de microorganismos para a produção de metano é melhor nas proximidades do pH neutro (SAWAZAKI, 1985). A condutividade elétrica inicial do composto foi de 5,87 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sabe-se que à medida em que se aumenta o teor de ácido acético no composto submetido a digestão, a produção de biogás é prejudicada, aumentando a condutividade elétrica (CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 2012).

A capacidade do biorreator utilizado é 1,6 L, para segurança, foi adicionada cerca de 70% de sua capacidade, 1,12 L de composto.

Com o biorreator devidamente fechado, foi conectada à saída de gás uma base de Bernoulli, conforme mostra a Figura 1.

Figura 25– Estrutura de produção e captação de gás



Fonte: Autora (2018).

A temperatura foi controlada nas proximidades de 32 °C, pelo sistema de resfriamento hidráulico do próprio equipamento.

O gás produzido era lido com auxílio de uma proveta invertida, imersa em água. Uma mangueira conectada em uma das saídas do biorreator foi introduzida no fundo da proveta, conforme deslocamento do nível de água era possível fazer a leitura do gás produzido. A fim de evitar perdas e acidentes, foi utilizado um controle de fluxo, tipo pinça rolete, que permitia o controle da passagem de gás apenas para a leitura diária.

Com recurso do próprio equipamento, a mistura foi submetida a rotação de 200 rpm, sendo realizada uma vez por dia, durante 20 minutos, antes da aferição do gás produzido.

Retenção hidráulica

Figura 26– Aparência dos resíduos com a evolução da biodigestão



Fonte: Autora (2018).

Nos primeiros dias de retenção foi observada a diminuição da granulometria dos resíduos e a ocorrência de pequenas bolhas de ar, que podem representar a presença de oxigênio dentro do biorreator.

Após a queda de oxigênio no biorreator é esperada uma queda mais acentuada do pH do composto, para a ocorrência da fase anaeróbica. A queda de pH não pôde ser lida, devido a abertura do biorreator ocasionar perda de gás e inserção de oxigênio no sistema. Com a granulometria ainda menor ocorria digestão dos resíduos orgânicos.

Nos últimos dias de retenção, o composto no biorreator já se tornava com aspecto pastoso, e produção de biogás intensa. Tais características, segundo (VANZIN, 2006), apontam o predomínio de microrganismos estritamente anaeróbicos e metanogênicos, que convertem ácido acético e hidrogênio em metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Portanto, a fase metanogênica deve apresentar a melhor qualidade de biogás.

Não foi alcançada esta etapa no trabalho, devido o tempo curto para as análises. Na maturação, deve ocorrer dormência da atividade biológica, os nutrientes tendem a se tornar limitantes, deveria haver reaparecimento do oxigênio, espécies bacterianas oxigenadas e a redução ou mesmo cessação da produção de gás (VANZIN, 2006).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, na Tabela 1 é mostrada a evolução do volume de biogás produzido durante 18 dias.

Tabela 1– Produção diária de biogás

T(dias)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Vol (ml)	0	35	50	50	55	60	75	110	110	160	180	165	150	150	190	290	500	-	600

Fonte: Autora (2018).

Já no primeiro dia de retenção foi possível observar uma produção de 35 mL de gás, por se tratar das primeiras 24 horas, deduz-se que este gás ainda não tenha uma parcela significativa de metano. Até o quinto dia, a taxa de produção de biogás foi mais lenta.

No sexto dia de retenção a produção começa a progredir confirmando a elevação das atividades de micro-organismos que agem na ausência de oxigênio.

Houve uma elevação expressiva no volume gasoso obtido no décimo dia. Acredita-se que este esteja no início da fase metanogênica.

Nos quatro últimos dias de análise, foi observado um aumento irregular no volume de gás produzido, acredita-se estar nas proximidades do final da fase metanogênica.

A seguir, na Tabela 2, é mostrada uma estimativa da quantidade de biogás que pode ser gerada a partir dos resíduos alimentares do RU.

Tabela 2– Possibilidade de geração do aterro a partir do teste de laboratório

	Resíduos	Volume de biogás estimado
Laboratório	0,65 kg	0,6 L
R.U (ano) dias úteis	20568 kg/ano	18,98 m ³

Fonte: Autora (2018).

Tabela 3– Demanda de GLP do RU

	Demanda de GLP	Biogás produzido
R.U (ano) (Dias úteis)	28,8 m ³ /ano	18,98 m ³ /ano

Fonte: Autora (2018).

Estimou-se que podem ser gerados cerca de 18,98 m³ de biogás anualmente a partir dos resíduos do RU, como o biogás tem equivalência de 1:1,5 de GLP, a produção estimada supriria 98,8% da demanda de GLP.

Figura 27– Demanda do RU e produção estimada de biogás



Fonte: Autora (2018).

Pelo teste de chama foi demonstrado que o biogás gerado é inflamável e pode ser utilizado em substituição ao GLP.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Valendo-se da produção de biogás em laboratório e das informações de demanda de gás e resíduos produzidos fornecidas pela RU foi possível concluir que o biogás obtido dos descartes de alimentos do restaurante universitário atenderia cerca de 98,8% do gás necessário para preparação das refeições.

REFERÊNCIAS

ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS. Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho. **FAPESP**, 300 p. ISBN 978-90-6984-531-9. São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>. Acesso em 02 jan. 2018.

AUTOMOTIVEBUSINESS. **Biogás tem alto potencial de produção e uso no Brasil**. Disponível em: <http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/27425/biogas-tem-alto-potencial-de-producao-e-uso-no-brasil>. Acesso em 04 jun. 2018.

BUENO, Rodrigo de Freitas. Comparação entre biodigestores operados em escala piloto para produção de biogás alimentado com estrume bovino. **Holos Environment**, v. 10, n. 1, p. 111-125, ISSN: 1519-8634. São Paulo, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v10i1.2547>. Acesso em: 17 abr. 2018.

CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 52., 2012, Recife. **Artigo em anais de congresso**. Utilização da condutividade elétrica no monitoramento de processo fermentativo lento. Ano 52. Recife: Associação Brasileira de Química, 2012. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2012/trabalhos/10/1330-14049.html>. Acesso em: 05 mar. 2019.

COSTA, Ingrid Parente. ABREU, Yolanda Vieira. Estudo sobre a possibilidade de geração de energia a partir de resíduos de saneamento (Lixo, Esgoto). **Desafios**, v. 5, n. 1, 2018. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/desafios/article/download/4843/12667/>. Acesso em 15 jan. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural. Balanço de gás natural. **Secretaria de petróleo, gás natural e combustíveis renováveis**, n. 134, abr. 2018. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138769/0/Boletim_Gas_Natural_nr_134_ABR_18.pdf/4e49ca76-ad57-4b4f-b30d-f8d3ce0669c9. Acesso em: 25 fev. 2018.

SAWAZAKI, Haiko Enok. TEIXEIRA, João Paulo Feijão. MORAES, Roberto Machado de. O pH e a temperatura na produção de biogás a partir de casca de arroz. **Bragantia**, v. 44, n. 2, p. 715-721, ISSN 0006-8705. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87051985000200019>. Acesso em: 02 abr. 2018.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. **Biogás para geração de energia elétrica cresce 30% em um ano**. Disponível em: <https://www.abiogas.org.br/biogas-energia-eletrica>. Acesso em: 02 abr. 2018.

VANZIN, Emerson. **Procedimento para análise de viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica**. Dissertação (mestrado em engenharia civil e ambiental) - Universidade de Passo Fundo. Programa de pós-graduação em engenharia, Passo Fundo, 2006. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/230#preview-link0>. Acesso em: 03 maio 2018.