

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VANESSA LAURA DOS SANTOS

**ESTUDO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS
SÓLIDOS ORGÂNICOS DE UM RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO
COM BIODIGESTOR ANAERÓBIO DOMÉSTICO**

CAMPO MOURÃO

2017

VANESSA LAURA DOS SANTOS

**ESTUDO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS
SÓLIDOS ORGÂNICOS DE UM RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO
COM BIODIGESTOR ANAERÓBIO DOMÉSTICO**

Projeto de pesquisa apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC 2), do curso de Engenharia Ambiental, do Departamento Acadêmico de Engenharia Ambiental (DAAMB), do Câmpus Campo Mourão, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dra. Maria Cristina Rodrigues Halmeman

Co-orientador: Prof. Dr. Eudes José Arantes

CAMPO MOURÃO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS DE UM RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO COM BIODIGESTOR ANAERÓBIO DOMÉSTICO

por

VANESSA LAURA DOS SANTOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 20 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a banca examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof. Dr. Maria Cristina Rodrigues Halmeman

Prof. Dr. Eudes José Arantes

Prof. Dr. Morgana Suszek Gonçalves

Prof. Dr. Radames Juliano Halmeman

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na coordenação do curso de Engenharia Ambiental.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho com muito carinho ao meu pai Everaldo Cesar dos Santos e a minha mãe Sônia Marina Ferrari dos Santos, por sempre acreditarem em mim e nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida por sempre caminharem comigo e abençoarem minha vida, meu trabalho, minha família e por colocarem em meu caminho amigos abençoados que me ajudaram durante toda a trajetória na Universidade.

Aos meus pais, Everaldo e Sônia, por todo amor, carinho, incentivo, conselhos, ensinamentos e confiança depositado a mim durante os meus estudos. Gratidão e amor incondicional são as palavras que resumem o que sinto por tudo que fizeram e ainda fazem por mim.

Aos meus irmãos Vinicius Afonso dos Santos e Bruna Marina Ferrari dos Santos por todo amor, carinho, e suporte durante a caminhada.

Ao meu namorado, Patrick McCarthy, que mesmo com a distância sempre me apoiou me incentivou, e me aconselhou com muito amor, carinho e paciência.

À minha orientadora e amiga, Maria Cristina Rodrigues Halmeman, por todo carinho, confiança, discernimento, amizade, dedicação e por ter acreditado em meu trabalho.

Ao meu co-orientador e amigo, Eudes José Arantes, pela amizade, carinho e dedicação com meu trabalho.

Ao Prof. Thiago Morais, pelo auxílio nas análises e interpretação dos resultados.

À nutricionista e gerente do restaurante universitário Prato Certo, pela oportunidade concedida para o desenvolvimento do meu trabalho.

Aos meus amigos, em especial, Gabriela Meira pelo carinho e pela ajuda com as análises.

A todos os docentes e técnicos pela amizade, troca de experiências, ajuda e conselhos durante a caminhada universitária.

EPÍGRAFE

“(...) Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu
É sobre escalar e sentir que o caminho te fortaleceu
É sobre ser abrigo e também ter morada em outros corações
E assim ter amigos contigo em todas as situações (...)”

Ana Vilela.

RESUMO

Em decorrência da grande geração de resíduos sólidos e da problemática dos combustíveis fósseis, tecnologias estão sendo empregadas para a minimização da poluição. A digestão anaeróbia em biodigestores é uma das alternativas para a remoção da carga poluidora, produção de energia e biofertilizante, rico em nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. Existem vários modelos e formas de operação dos biodigestores, desde os mais robustos até os mais simples. Em vista disso, este trabalho teve como objetivo geral o estudo da produção de biogás e do efluente biofertilizante a partir de um biodigestor doméstico de baixo custo instalado em um restaurante universitário de Campo Mourão. O reator foi alimentado com 8% de restos de comida provenientes do restaurante e dejetos suínos de uma fazenda próxima. Foi feito o acompanhamento da digestão anaeróbia por 60 dias utilizando o manômetro em U, o termômetro digital a laser e o aparelho sensor de gases CO e H₂S. Apesar da produção de gases serem eficientes, o volume não foi o suficiente para a queima, um dos fatores que influenciou foi a temperatura a qual oscilou significativamente. Em relação ao efluente gerado, este obteve 52% de remoção de DQO, não apresentando Sólidos Sedimentáveis e pH 6,51. Não há legislação específica para biofertilizantes com padrões estabelecidos, sendo assim, o efluente pode servir como corretivo em solos acidificados.

Palavras – chave: Energia Renovável; Sustentabilidade; Biofertilizante.

ABSTRACT

Due to the large generation of solid waste and the problems of fossil fuels, technologies are being used to minimize pollution and reduce carbon admissions. Anaerobic digestion in biodigestors is one of the alternative for the removal of pollutant, biogas and biofertilizer production which is rich in nutrients and is essential for the development of plants. There are several types of models and ways of operating biodigesters, from the most robust to the simplest. As a result, the aim of this project was the study of the biogas production and the biofertilizer effluent from a low cost domestic biodigester built in a university restaurant in Campo Mourão city. The biodigester was fed with 8% of food waste from the restaurant and swine manure from the closest farm. The anaerobic digestion was monitored for 60 days using the U-manometer, the digital laser thermometer and the CO and H₂S gas detection equipment. Although the production of gases was efficient, the volume was not enough for the porpoise of burning, one of the factors that influenced this was the temperature which oscillated significantly. In relation to the generated effluent, it obtained 52% of COD removal, with no sedimentable solids and pH 6.51. In Brazil, there is no specific legislation for biofertilizers with established standards, thus, at the moment, the effluent can serve as a corrective in acidified soils.

Key words: Renewable Energy; Sustainability; Biofertilizer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstração do uso do biogás a partir de biodigestores para fins energético.....	19
Figura 2 - Temperatura associada ao rendimento da digestão anaeróbia e a atividade microbiológica.....	22
Figura 3 - A) Dermacação com caneta do local de instalação dos registros. B) Instalação dos registros de PVC no biodigestor doméstico.....	29
Figura 4 - Teste de vazamento dos registros instalados no biodigestor doméstico, utilizando água. A) Enchimento do biodigestor com água. B) Abertura dos registros para detecção de vazamentos.....	30
Figura 5 - Perfuração da tampa e instalação do registro de gás, A) e B), respectivamente.	31
Figura 6 - Biodigestor doméstico com filtro de PVC contendo palha de aço.....	32
Figura 7 - Biodigestor doméstico e Manômetro em U.....	33
Figura 8 - Teste de vazamento do biodigestor utilizando ar de compressor.....	33
Figura 9 - Biodigestor contendo água, resíduos orgânicos e dejetos suínos.....	34
Figura 10 - Agitação da mistura para obter uma consistência homogênea.	35
Figura 11 - Termômetro digital utilizado durante a fase de operação do biodigestor. A) Termômetro digital, B) Forma de operação.	36
Figura 12 - Sensor de gases Ventis MX 4 utilizado para registro dos gases COx e H2S.	37
Figura 13 - A) Biodigestor vazio, B) Biodigestor alimentado e fechado por 5 dias para acumulação de gases.....	44
Figura 14 - A) Coleta do biofertilizante após 60 dias de digestão anaeróbia. B) Material sólido não digerido e concentrado no fundo do reator.....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
3.1 Biogás.....	13
3.1.1 Breve histórico do biogás	13
3.1.2 Digestão anaeróbia e formação dos gases	14
3.2 Biomassa	18
3.3 Fatores que influenciam na produção do biogás	20
3.3.1 Massa Seca, TDH e relação Carbono/Nitrogênio.....	20
3.3.2 Temperatura e pH	21
3.4 Biodigestores	23
3.4.1 Definição	23
3.4.2 Operação do biodigestor e modelos	23
3.5 Biofertilizantes	26
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 Caracterização do Restaurante	28
4.2 Equipamentos utilizados para montagem do biodigestor.....	28
4.3 Montagem do biodigestor e instalação do manômetro.....	29
4.4 Alimentação do biodigestor	34
4.5 Operação do biodigestor	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Dimensionamento e construção do biodigestor doméstico	41
5.2 Produção de biogás.....	41
5.3 Caracterização do biofertilizante.....	46
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

É notável que nos últimos anos o Brasil e o mundo apresentaram um crescimento intenso na urbanização, e conseqüentemente aumento no consumo de produtos e geração de resíduos sólidos. Portanto, a lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), tem como objetivo o gerenciamento da carga poluidora para melhorar a qualidade do meio ambiente e a saúde da população.

Entretanto, no Brasil, cerca 41,6% dos resíduos sólidos gerados são enviados para lixões ou aterros controlados, onde ambos não possuem medidas adequadas para a proteção do meio ambiente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2014). Nesse sentido, é imprescindível a necessidade de um gerenciamento, infraestrutura e investimentos em alternativas que possam adequar a carga poluidora com a finalidade de evitar a poluição e degradação do meio ambiente, assegurando a saúde pública.

Dentro desse contexto, surgem as fontes alternativas e renováveis de energias que são uma das mais recentes pesquisas na aplicação para geração de energia e tratamento de resíduos. São formas de conciliar o consumo de recursos naturais com a eficiência energética, sem que isso traga impactos negativos ao meio ambiente. Essa atitude preza, portanto, a sustentabilidade (CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL, 2016).

Uma das fontes alternativas que está ganhando espaço no Brasil é o uso da biomassa para a produção de etanol e biogás a partir da decomposição de resíduos orgânicos em biodigestores no sul do país (GONÇALVES et. al., 2009).

A produção de biogás a partir da decomposição da biomassa traz vantagens tanto para o produtor quanto para o meio ambiente uma vez que há uma destinação para o resíduo e há geração de energia limpa, além disso, junto a produção do gás, há a produção de adubo orgânico que pode ser utilizado em hortaliças proporcionando economia para o agricultor, conhecido como biofertilizante (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010; MARQUES et. al., 2014).

Vale ressaltar que existem vários tipos de biodigestores desde os robustos e sofisticados até os domésticos, e todos apresentam eficiência em relação a produção de gases, entretanto, sua eficiência pode ser influenciada pelo tipo de biomassa, temperatura, e outros fatores. Para este trabalho, a ideia da construção do biodigestor caseiro foi inspirada no Homebiogas, o qual utiliza restos de comida como biomassa para a produção de biogás e funcionamento de um fogão (HOMEBIOGAS, 2016).

Nesse sentido, este trabalho utilizou a técnica de biodigestão no restaurante universitário Prato Certo da Universidade Tecnológica Federal de Campo Mourão com o objetivo de analisar a viabilidade da produção do biogás a partir da decomposição da matéria orgânica utilizando biodigestor anaeróbio doméstico de baixo custo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade da produção do biogás a partir da decomposição da matéria orgânica utilizando biodigestor anaeróbio doméstico de baixo custo no restaurante universitário.

2.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar equipamentos necessários para montagem do biodigestor de baixo custo no restaurante universitário;
- Construir um biodigestor doméstico para a execução do experimento;
- Quantificar o total de biogás produzido em função da operação do biodigestor e realizar testes de chama;
- Monitorar a temperatura do biodigestor durante o processo de anaerobiose;
- Quantificar os gases (CO+CO₂) e sulfídrico (H₂S) produzidos diariamente;
- Quantificar e qualificar o biofertilizante gerado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Biogás

3.1.1 Breve histórico do biogás

A digestão anaeróbia e formação de gases podem acontecer naturalmente ou artificialmente. Para Villen (2001), o processo ocorre naturalmente em pântanos, estuários, lagos, mares e jazidas petrolíferas em decorrência da baixa produção de oxigênio. Assim, a partir desse fenômeno, o ser humano tomou ciência da possibilidade de produzir o biogás de modo artificial com a decomposição de resíduos orgânicos em ambientes anóxicos.

Relatos históricos indicam que o uso do biogás iniciou-se por volta do século X a.C onde era utilizado para manter a água do banho aquecida. Em meados do século XIII a. C, os chineses cobriam os tanques de esgoto com o intuito de proporcionar um ambiente anóxico para a decomposição do material e produção de energia. E somente no século XVII, o cientista e pesquisador Jan Baptista Van Helmont provou a existência dos gases e sua inflamabilidade (BLEY JUNIOR, 2015).

Em continuidade, em meados de 1776, o físico italiano Alessandro Volta concluiu a relação entre a quantidade de material decomposto com a quantidade de gás inflamável produzido. Em seguida, no ano de 1884 e 1895, houve a comprovação da presença do metano e o seu uso como energia para a iluminação da cidade de Exeter na Inglaterra, respectivamente. Entretanto, foi apenas em 1960 na Índia, que o biogás destacou-se como energia para uso do fogão (BLEY JUNIOR, 2015). Na China, biodigestores foram instalados em inúmeras cidades na região do Rio Amarelo a partir de 1980, para suprir a necessidade energética, principalmente da zona rural, (GASPAR, 2003; BLEY JUNIOR, 2015).

Segundo Oliveira e Santos (2010), o interesse pelas fontes de energia inesgotáveis, surgiu a partir da década de 70 com a crise do petróleo. Com isso, estudos e pesquisas estão sendo realizados desde então por diversos países para o uso de energia limpa e segura. Diante dessa situação, em 1979, a EMBRATER implantou o primeiro biodigestor modelo chinês na Granja do Torto em Brasília, que ganhou impulso devido à crise do petróleo (PALHARES, 2008).

No Brasil, os biodigestores destacaram-se na década de 80, onde foi instalado cerca de oito mil unidades, entre eles, o modelo chinês, indiano e alguns caseiros (plástico). Mas, em decorrência

da ausência de investimentos e operação inadequada, houve um decréscimo significativo na instalação de biodigestores no país por alguns anos (COELHO; PALETTA; FREITAS, 2000).

Mas, devido à inúmeras vantagens do biogás, o incentivo retornou e foi registrada no Brasil em 2013, a captação do biogás de 22 aterros para a distribuição e abastecimento de casas de 1,67 milhões de brasileiros (BLEY JUNIOR, 2015)

O biogás por apresentar grande concentração de metano é considerado inflamável e de alto teor energético. Portanto, ele pode ser usado em sua forma direta ou convertido na forma de energia elétrica, térmica e mecânica, podendo ser empregado no funcionamento de produtos como, fogões domésticos; geladeiras e refrigeração em geral; secadores de grãos e diversos; lampiões; aquecedores; iluminação; acionamento de motores de combustão interna; e até em indústrias de destilaria e fábricas de papel substituindo parte da energia elétrica, (COMASTRI FILHO, 1981; SILVA, 2011).

Atualmente, encontra-se um número significativo de biodigestores em zonas rurais no país, principalmente em fazendas com criação de suínos e bovinos. Pois, é uma técnica que destina e trata os dejetos animais garantindo energia ao estabelecimento.

3.1.2 Digestão anaeróbia e formação dos gases

O biogás é formado a partir da decomposição da matéria orgânica em ambientes com a ausência do oxigênio. O processo de digestão anaeróbia tem como finalidade, a remoção da matéria orgânica, a produção do biogás e a produção do fertilizante orgânico líquido rico em nutrientes (PECORA, 2006).

A composição do biogás pode variar a partir do tipo de material (biomassa) utilizado na decomposição mas, em geral, o biogás é constituído tipicamente por, metano, dióxido de carbono e uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, amins voláteis, oxigênio e gás sulfídrico (WEREKO-BROBBY, C. Y., HAGEN, E.B, 2000). Genoseve (2006), apresenta a composição do biogás de forma mais detalhada, conforme Tabela 1. Portanto, deve-se levar em consideração que além das características do material utilizado, a constituição do biogás pode variar em relação aos fatores como pressão atmosférica e temperatura.

Tabela 1 - Composição média do biogás.

Elemento	Quantidade
Metano (CH₄)	50 a 75%
Dióxido de Carbono (CO₂)	25 a 40%
Hidrogênio (H₂)	1 a 3%
Azoto (N₂)	0,5 a 2,5%
Oxigênio (O₂)	0,1 a 1%
Sulfato de Hidrogênio (H₂S)	0,1 a 0,5%
Amoníaco (NH₃)	0,1 a 0,5%
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0,1%

Fonte: Adaptado de Genoseve (2006).

O processo de formação do biogás é considerado renovável por fazer parte do ciclo biogeoquímico, Fluxograma 1. Nele, todo material orgânico é atacado por microorganismos detritívoros (BLEY JUNIOR, 2015). Nesse sentido, Siqueira (2008) descreve que a degradação biológica pode ser dividida em cinco etapas consecutivas conhecidas como:

- **Hidrólise:** Nessa etapa ocorre a quebra de materiais particulados complexos em materiais dissolvidos mais simples através de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Portanto, os principais compostos hidrolisados são, as celuloses, os lipídios e as proteínas.
- **Acidogênese:** Os produtos oriundos da fase anterior (hidrólise) são metabolizados pelas bactérias fermentativas transformando-os em compostos mais simples constituídos de álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, ácidos graxos voláteis, amônia, sulfeto e novas células bacterianas. Esse estágio é feito por bactérias acidogênicas devido aos produtos gerados.
- **Acetogênese:** Nesse estágio ocorre a oxidação dos produtos gerados na fase da acidogênese, pelas bactérias acetogênicas, onde os produtos gerados são: o hidrogênio, o acetato e o dióxido de carbono.
- **Metanogênese:** Etapa em que as bactérias metanogênicas degradam os compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono. As bactérias dessa etapa podem ser divididas em dois grupos de acordo com a magnitude de produção de metano e substrato. Portanto, existe o grupo das Metanogênicas acetoclásticas: formação de metano a partir do metanol ou ácido acético. E o grupo das Metanogênicas hidrogenotróficas: produção de metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono.
- **Sulfetogênese:** Durante esse estágio, o sulfato, o sulfeto e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto pelas bactérias sulforedutoras. As bactérias

reduzidas passam a competir com os microorganismos acetogênicos e metanogênicos pelos substratos disponíveis, dessa forma, observa-se o aumento da concentração de relativa de SO_4^{-2} em relação a concentração de DQO.

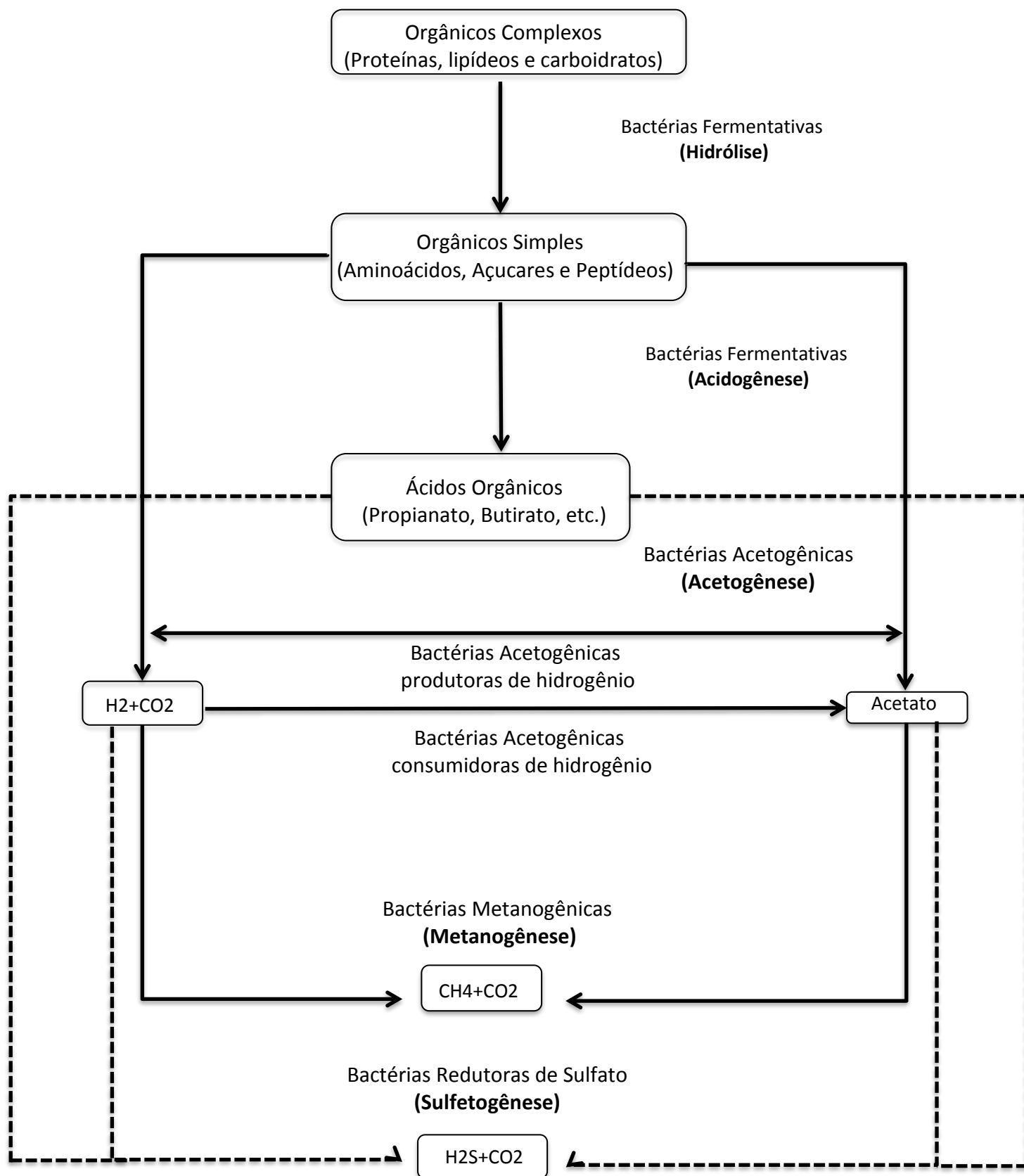
O uso do biogás com teor de metano entre 50% a 80%, terá um poder calorífico entre 4,95 e 7,92 kWh/m³. A utilização dessa energia produzida pelo biogás pode ser aproveitada para refrigeração, cozimento, energia elétrica, aquecimento, misturadores de ração, entre outras aplicações (COLDEBELA, 2004).

O biogás é considerado um gás corrosivo em consequência da presença do sulfeto de hidrogênio (ácido sulfídrico – H₂S). No Brasil, o CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente limitou a emissão de sulfetos a 1,0mg/l S em decorrência de ser um poluente atmosférico (SALOMON, 2007).

O ácido sulfídrico (H₂S) pode ser encontrado em diversas concentrações no biogás, e por ser considerado poluidor, deve ser feita sua remoção pois pode causar até a corrosão dos equipamentos do reator (WELLINGER et al., 1999). Além de ser corrosivo, o H₂S é considerado tóxico, podendo causar danos ao meio ambiente devido a formação do enxofre após a combustão ou até afetar o processo de fermentação no reator por inibição (SALOMON, 2007).

Assim, um dos principais métodos de remoção de H₂S é chamado de processo seco de oxidação por adsorção utilizando óxidos de ferro. (WELLINGER et al., 1999). Os pedaços ou *pellets* de óxido de ferro removem o H₂S, entretanto, o processo torna-se ineficiente quando há presença de água no biogás (SALOMON, 2007). Com a remoção do H₂S e do gás carbônico CO, o biogás ficará mais limpo e com poder calorífico maior.

Fluxograma 1 - Etapas do processo da digestão anaeróbia e formação do biogás.



Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997).

3.2 Biomassa

A biomassa é considerada uma fonte de energia antiga em relação a sua descoberta mas ao mesmo tempo nova em relação as suas aplicações. Atualmente, fontes de biomassa estão sendo como combustíveis alternativos para transporte devido ao preço elevado do petróleo (HINRICHS; KLEINBACH, 2004).

Entende-se por energia da biomassa a matéria viva como grãos de milho, trigo, entre outros, resíduos agrícolas, plantas aquáticas, árvores e resíduos sólidos urbanos. Para Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2002), a biomassa é toda matéria orgânica que possa ser convertida em energia térmica, elétrica ou mecânica. Nesse sentido, a biomassa pode ser usada como combustível sólido (casca de madeira), combustível líquido (conversão da biomassa em etanol), e o combustível gasoso através de altas temperaturas e pressão, Figura 1 (HINRICHS; KLEINBACH, 2004).

Silva (2014) destaca três principais grupos mais utilizados de biomassa para obtenção do biogás, sendo o primeiro grupo caracterizado como os compostos rejeitados pelas atividades urbanas incluindo o esgoto, o resíduo sólido urbano, e os restos de comida de restaurantes; o segundo são os industriais como a celulose (papel), restos animais (frigoríficos) e outros materiais orgânicos; e o terceiro grupo sendo os materiais gerados em atividades agrícolas como folhas e galhos, esterco e cascas (milho, arroz, etc).

As biomassas mais utilizadas na produção de biogás são os dejetos de animais, resíduos agrícolas incluindo as cascas e folhagens, e resíduos industriais e urbanos tais como bagaços e restos de comida de restaurantes (METZ, 2013).

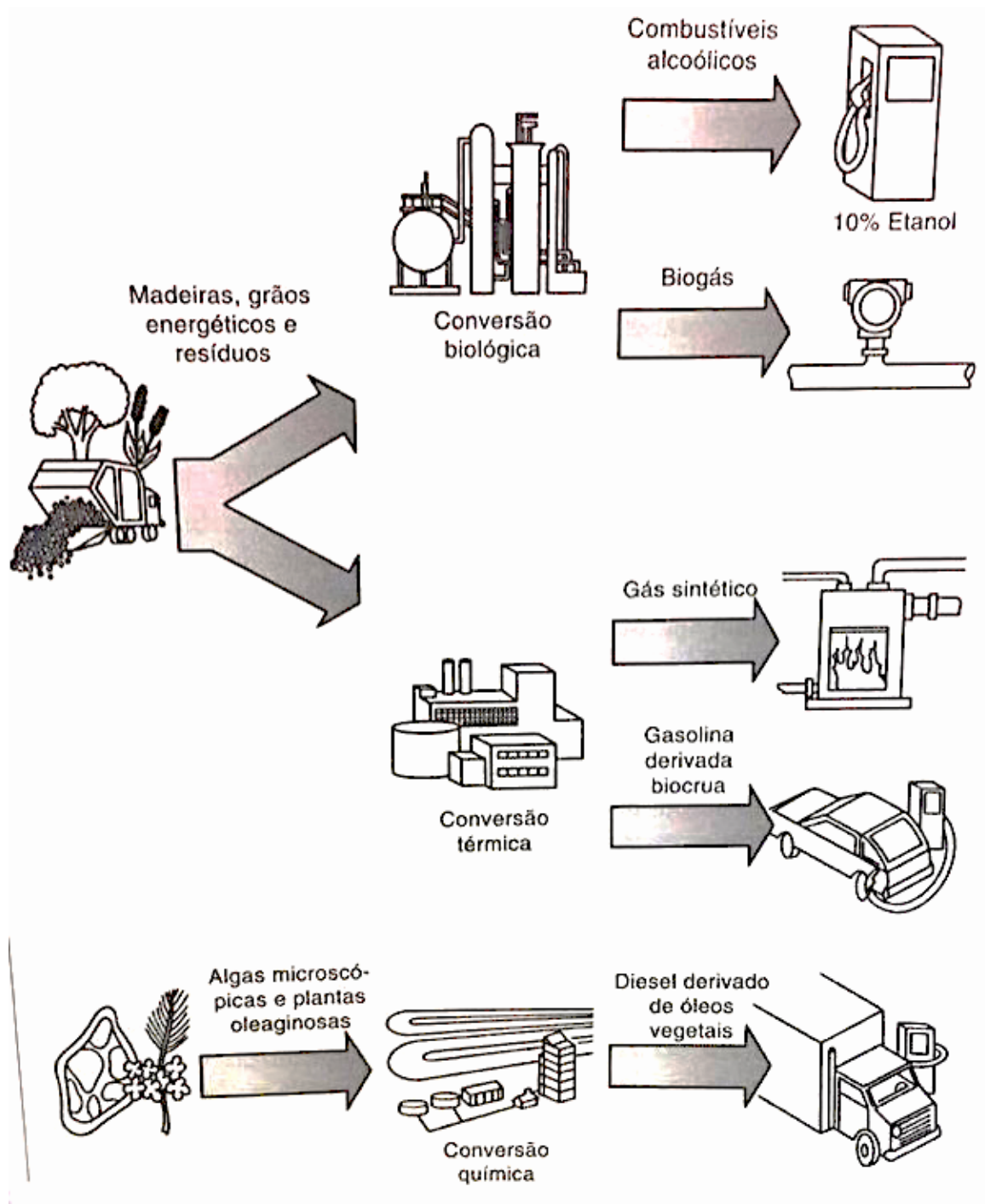
Atualmente, a maioria dos países, desenvolvidos ou não, incentivam o uso da biomassa como energia alternativa em decorrência da necessidade de redução do uso de derivados do petróleo e conseqüentemente a dependência energética em relação aos países exportadores de petróleo. Além disso, com a redução do uso de derivados do petróleo, espera-se a redução de emissão de gases causadores do efeito estufa (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008).

Dessa forma, a biomassa esta sendo utilizada em diversos países, principalmente, como fonte de energia para aquecimento de casas e preparo de alimentos com fogo (MATIAS, 2014).

A biomassa para fins energéticos é muito vantajoso por não ser poluente (energia limpa) e por ser encontrado facilmente em todo o mundo em diversas formas, (GENOVESE; UDAETA;

GALVAO, 2006; LIPPEL, 2017). Entretanto, quando comparado com combustíveis fósseis, a biomassa apresenta baixo poder calorífico (GENOVESE; UDAETA; GALVAO, 2006).

Figura 1 - Demonstração do uso do biogás a partir de biodigestores para fins energéticos.



Fonte: Adaptado de Hinrichs e Kleinbach (2004).

3.3 Fatores que influenciam na produção do biogás

Para um bom funcionamento do biodigestor e produção de biogás é necessário ter cuidados no manuseio e na instalação dos equipamentos além de proporcionar um ambiente favorável às bactérias metanogênicas haja vista que são muito sensíveis a diversos fatores que poderão influenciar no processo (COMASTRI FILHO, 1981; SILVA, 2014).

Oliver (2008) e Silva (2011) citam que a composição do biogás pode sofrer variações de acordo com o tipo de matéria orgânica utilizada, o modelo de biodigestor, o ambiente favorável com temperatura favorável, ausência de ar, e ausência de substâncias tóxicas que podem prejudicar o desenvolvimento microbiológico ou partículas grosseiras que possam a vir danificar o reator.

3.3.1 Massa Seca, TDH e relação Carbono/Nitrogênio

Para uma produção satisfatória de biogás, aconselha-se utilizar de 3 a 25 % de sólidos. No entanto, quando há presença de dejetos de animais, a porcentagem deve ser menor e ficar entre 3 e 12%, para que não haja problemas de entupimento e ocorra, assim, uma boa digestão e conseqüentemente, boa produção de biogás (POULSEN, 2003).

Na seleção do material a ser decomposto, deve-se evitar substâncias e produtos que possam causar inibição e toxicidade nos biodigestores, tais como, cobre, zinco, antibióticos, sais e metais pesados. Esses compostos podem até causar a morte das bactérias e tornar a produção do biogás ineficiente (NOGUEIRA,1992).

Outro fator importante que influencia na produção do biogás é o tempo de retenção, que nada mais é do que o tempo de digestão do material no interior do biodigestor. De acordo com Neves (2010), o tempo de retenção pode variar de 30 a 45 dias. Entretanto, segundo Comastri Filho (1981) e Mazzucchi (1980) o tempo de retenção pode chegar até 60 dias pois depende da biomassa utilizada. Tempos curtos de TRH indica que o material orgânico não foi completamente degradado, resultando em menores rendimentos de biogás produzido (POULSEN, 2003).

Para finalizar, quanto maior a concentração de sólidos voláteis, maior será a produção de gases (COMASTRI FILHO, 1981). Além disso, a agitação é um fator importante, pois com sua ausência o material ficará concentrado no fundo influenciando na eficiência da produção de gases, enquanto que, ao provocar movimentos, haverá o deslocamento do material e novos pontos para reprodução desses microorganismos decompositores.

A relação carbono/nitrogênio é outro fator que está ligado diretamente com a produção do biogás, portanto, o valor ideal é de 20 a 30:1, ou seja, de 20 a 30 partes de carbono para 1 parte de nitrogênio (COMASTRI FILHO, 1981).

3.3.2 Temperatura e pH

O processo de fermentação do material é influenciado diretamente pela temperatura, interferindo na velocidade do tempo de retenção e quantidade de metano produzido, haja vista que, temperaturas altas garante um melhor desenvolvimento do processo de digestão e, conseqüentemente, maior poder calorífico (SILVEIRA, 2012).

Lema, Mendez, Soto, (1997), citam em seu trabalho que existem três faixas de temperatura associadas com o crescimento microbiano, tais como:

- faixa psicofílica: entre 0 e aproximadamente 20 °C;
- faixa mesofílica: entre 20 e aproximadamente 45 °C;
- faixa termofílica: entre 45 e aproximadamente 70 °C.

Para que o desenvolvimento microbiano seja satisfatório, a temperatura deve ficar em torno de 20 a 45 °C, entretanto, de acordo com Poulsen (2003), o biodigestor apresenta melhor eficiência quando situado a temperaturas entre 35 a 37 °C, Figura 2.

Segundo Nogueira (2012), a taxa da produção de biogás pode aumentar significativamente com o aumento de 10 °C da temperatura, enquanto que a queda de 3°C pode causar o desequilíbrio e até a morte das bactérias biodigestoras (OLIVEIRA JUNIOR, 2013). Além disso, é importante ressaltar que as variações de temperatura em decorrência da sazonalidade ou a variação de temperaturas diurnas e noturnas afetam no processo de digestão e na quantidade de produção do biogás (DENNIS; BURKE, 2001).

É possível obter gases a partir do processo de fermentação situada à temperatura de 10 °C, entretanto, a eficiência do processo e a carga orgânica diminuem significativamente (VAN HAANDEL E LETTINGA, 1994).

Outro fator importante é o potencial hidrogeniônico (pH), o valor ideal é 7, podendo variar entre 6 a 8. Segundo Marchaim (1992), a variação do pH pode afetar no metabolismo dos microorganismos e causar um desequilíbrio químico podendo até destruir as enzimas.

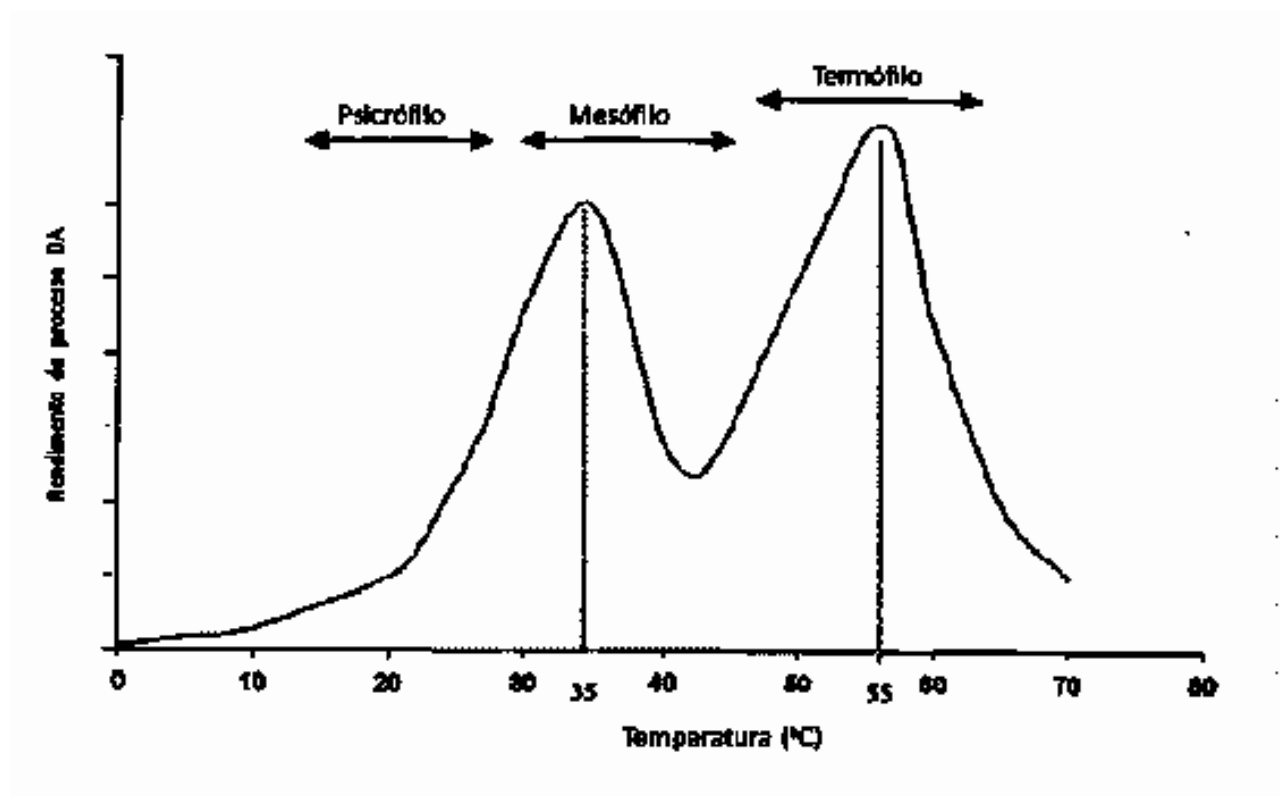
De acordo com Nogueira (1992), na fase da acidogênese, as bactérias são responsáveis por degradar a matéria orgânica produzindo ácidos orgânicos, portanto, nessa fase pode ocorrer o

declínio do pH tornando o meio ácido em torno de 5,2 e 6,3. A partir disso, as bactérias acetogênicas convertem esses ácidos em substratos que serão utilizados na produção de metano na fase metanogênica que faz com que o meio fique neutro. Dessa forma conclui-se que, cada fase da digestão anaeróbia, apresenta o seu ponto ideal de pH.

No entanto, valores de pH tornam-se inúteis quando analisados individualmente, sendo necessário correlacioná-los com teores de alcalinidade total e ácidos voláteis, tais indicadores auxiliam a identificar se o processo de biodigestão anaeróbia está ou não em equilíbrio (KOTZÉ; THIEL; HATTINGH, 1969).

O pH também influencia na distribuição do sulfeto, pois quanto maior o pH, maior será a porcentagem de H_2S , tanto na fase líquida quanto na fase gasosa. Enquanto que, a diminuição do pH pode causar a dissociação do H_2S , causando sua redução (LIMA, 2015).

Figura 2 - Temperatura associada ao rendimento da digestão anaeróbia e a atividade microbiológica.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2005).

3.4 Biodigestores

3.4.1 Definição

Biodigestores são tanques isolados sem o contato com o ar atmosférico podendo ser construídos de alvenaria, concreto ou outro tipo de material onde, em seu interior, há a fermentação da biomassa úmida por bactérias anaeróbias produzindo o gases e o fertilizante líquido (SILVA, 2011).

A implantação e uso de biodigestores podem trazer muitos benefícios, dentre eles, destacam-se a melhora da qualidade do meio ambiente e o fornecimento de energia elétrica ao produtor através da produção do biogás (SANSUY, 2004).

Gaspar (2003) ressalta que o biodigestor em si não tem a capacidade de produzir o biogás, haja vista que sua função é de fornecer as condições favoráveis para a reprodução de bactérias digestoras de material orgânico e assim produzir os gases.

3.4.2 Operação do biodigestor e modelos

Existem duas formas de operação de biodigestores podendo ser contínuo ou descontínuo batelada. Em geral os biodigestores são estruturados da seguinte forma, um local de acondicionamento dos resíduos (câmara), tubulação para saída do biogás produzido conhecido como gasômetro ou cúpula e tubulação ou caixa para acondicionar o biofertilizante (OLIVER, 2008;GASPAR, 2003).

No modelo de funcionamento contínuo há a produção de biogás e biofertilizante a todo o momento, assim o reator deve ser alimentado continuamente com grande quantidade de biomassa líquida ou semilíquida e de fácil degradação, para isso existe um coletor de dejetos o qual enviará para o biodigestor para a decomposição. Existe na forma horizontal ou vertical, sendo que nesta, a alimentação é feita pela parte inferior enquanto que o gás é liberado na parte superior, já os horizontais têm sua alimentação feita por um de seus lados, enquanto é feito a retirada do biofertilizante no lado oposto. Os biodigestores contínuos mais comuns são o Canadense, o Indiano e o Chinês citados no item anterior (CASTANHO; ARRUDA, 2008; FERREIRA, 2013).

O biodigestor de funcionamento em batelada é utilizado quando não há disponibilidade de grande quantidade de biomassa ou quando seu processo de decomposição for lento como, por

exemplo, restos de comida, e quando a produção de biogás é baixa. Nesse caso, a biomassa e a água são introduzidas no interior do reator e posteriormente é feito o isolamento para evitar o contato com o ar por um período determinado propiciando assim a fermentação. A produção e o armazenamento do gás são feitos no mesmo recipiente onde houve a digestão da matéria, e poderá ser aberto somente quando houver uma diminuição da produção do gás, fator indicativo para a troca de uma nova carga de biomassa, pois a carga anterior já foi decomposta (DONGALA, 2010; JORGE; OMENA, 2012).

Existem vários tipos de biodigestores de formas e funcionamento diferentes, mas todos possuem a mesma função, entretanto uns são mais vantajosos que outros, Quadro 1. Os modelos mais comuns são o Chinês, o Indiano e o Canadense (CASTANHO; ARRUDA, 2008).

Atualmente, no Brasil, o modelo canadense é o mais utilizado em comparação aos outros modelos devido a facilidade de implantação (OLIVEIRA, 2012).

Com base nesses biodigestores mais sofisticados, existem os domésticos que são construídos em menor escala e com equipamentos acessíveis, logo são de baixo custo. Geralmente, esse tipo de biodigestor pode ser feito com tambores de plástico e com sistemas de tubulações em PVC.

A escolha do melhor biodigestor vai depender, principalmente, de fatores como: o tipo e disponibilidade da biomassa; o local da instalação (próximo a cozinha, preferencialmente) e sem sombreamento já que o calor auxilia na decomposição do material; o investimento envolvido e as condições locais (COMASTRI FILHO, 1981).

Quadro 1 - Principais características dos biodigestores Indiano, Chinês e Canadense.

Modelo Canadense	
<p>O modelo Canadense é do tipo horizontal possuindo uma área maior de exposição ao calor do sol já que sua largura é maior que a profundidade, fator que auxilia na maior produção de biogás. A principal desvantagem do biodigestor é o alto custo devido à cúpula ser feita de material PVC e ser um dos mais recentes (CASTANHO; ARRUDA, 2008). O biogás gerado, é enviado para um gasômetro separado, enquanto que o biofertilizante segue para uma lagoa de equalização, e em seguida pode ser aplicado no solo (RICARDO, 2012).</p>	
Modelo Chinês	
<p>O modelo chinês é normalmente feito de alvenaria e deve ser enterrado no solo, portanto ocupa menos espaço. Em comparação ao modelo anterior (Canadense), ele é considerado de baixo custo já que sua cúpula também pode ser feita em alvenaria (PERMINIO, 2013). Esse modelo torna-se inviável para instalações de pequeno porte, uma vez que parcelas de gás podem ser liberados para a atmosfera ocasionando perdas que reduzem parcialmente a pressão interna do gás (DEGANUTTI; PALHACI; ROSSI, 2002). Os vazamentos podem ocorrer devido ao material utilizado (alvenaria) .</p>	
Modelo Indiano	
<p>O biodigestor Indiano ocupa menos espaço ainda em relação aos outros modelos pois é um modelo subterrâneo. O processo de fermentação e a produção de gases é mais rápido devido à temperatura do solo. A cúpula desse biodigestor pode ser feita de fibra ou de ferro podendo haver corrosão do material com o tempo e necessidade de manutenções frequentes (OLIVER, 2008).</p>	

Fonte: Adaptado de Castanho, Arruda (2008); Ricardo (2012); Perminio (2013); Deganutti, Palhaci, Rossi, (2002); Oliver (2008).

3.5 Biofertilizante

O biofertilizante é o efluente gerado a partir da matéria orgânica que foi digerida pelas bactérias no interior do reator. Sua consistência é líquida e rica em nutrientes podendo ser utilizada como adubo agrícola em hortaliças diminuindo o custo de pequenos produtores (OLIVER, 2008; BONTURI; DIJK, 2012).

O adubo produzido pela digestão anaeróbia é de alta qualidade e possui muitas vantagens, dentre elas destaca-se, a composição rica em nutrientes para o solo e a proteção da planta como agente defensivo natural. Assim, Bonturi e Dijk (2012) explicam que o biofertilizante é facilmente absorvido pelo solo devido ao alto grau de decomposição que se encontra a matéria orgânica.

No estado do Paraná, por exemplo, o biofertilizante proveniente de biodigestores é frequentemente utilizado em lavouras de soja, feijão, tomate, cebola, hortaliças em geral, podendo ser aplicado por sistemas de irrigação e pulverização sobre as lavouras, (TESSEROLI NETO, 2006).

Segundo Seixas et. al. (1980), após a digestão anaeróbia, o material decomposto apresenta alta qualidade para uso como fertilizante, devido sua composição rica em nutrientes. Para Santos (1992), o efluente (biofertilizante) possui nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, ferro, molibdênio, sódio, manganês e zinco, TABELA 2 . O autor ainda diz que o pH do material pode variar entre 7,0 a 8,0 podendo apresentar valores abaixo de 7,0 quando a digestão for incompleta.

Tabela 2 – Principais nutrientes presentes na composição química do biofertilizante.

Nutrientes	Quantidade presente
Nitrogênio (N)	1,5 a 2%
Fósforo (P)	1,0 a 1,5%
Potássio (K)	0,5 a 1,0%

Fonte: Adaptado de Coelho e Junqueira (2014).

O biofertilizante pode atuar como corretivo de pH de solo em decorrência de sua composição (NPK). Além disso, esse tipo de fertilizante não apresenta odor forte e é considerado economicamente viável quando comparado aos fertilizantes químicos (BARROS, 2012).

Outro benefício desse produto da digestão anaeróbia é a reprodução de microorganismos, proporcionando mais saúde ao solo e oxigenação das raízes das plantas devido a penetração de ar ocasionada pela porosidade da terra (BARROS, 2012).

No Brasil, não existe uma legislação específica com padrões para biofertilizantes. Segundo Silva et. al. (2006), existem vários estudos para definição de parâmetros e aplicações de efluentes tratados, entretanto, continuam em processo de aprimoramento.

Em 2005, o CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos) lançou as Resoluções nº 54/05 e nº 121/10, que estabelecem critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água mas não estabelecem parâmetros.

A Resolução nº 121/10 diz em seu Art. 4º que a aplicação de água de reuso poderá ser condicionada, pelo órgão ou entidade competente, à elaboração de projeto que atenda os critérios e procedimentos por estes estabelecidos. Seguindo de seu Art. 5º que diz que a água não potável para reuso não poderá trazer problemas ou riscos ambientais e a saúde pública.

Contudo, a água residual pode ser utilizada como biofertilizante, aumentando a capacidade do solo de reter água. Entretanto, o efluente não substitui uma adubação convencional, ainda que disponibilize uma boa quantidade de macro e micronutrientes (COSTA et al., 2009).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do Restaurante

O trabalho foi desenvolvido no restaurante universitário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

O Restaurante Universitário é gerenciado pela equipe Prato Certo e conta com aproximadamente 18 colaboradores para execução de seus serviços.

Em média, são servidas 1300 refeições por dia (almoço + jantar), seis dias por semana (de segunda a sábado) beneficiando estudantes e colaboradores da Universidade.

O cardápio é bem diversificado, contendo desde grãos e massas até hortaliças e tubérculos em geral. Além do prato principal, é servido á vontade o suco e a sobremesa (frutas e doces).

4.2 Equipamentos utilizados para montagem do biodigestor

Para a construção do biodigestor doméstico foi necessário o uso dos seguintes equipamentos:

- Bombona de 80 litros : para armazenamento dos resíduos;
- Furadeira : utilizado para perfuração da tampa para a instalação do registro de gás;
- Serrinha: utilizada para serrar a mangueira;
- Mangueira cristal: canalização do biogás;
- Abraçadeira: fixar a mangueira cristal no registro;
- Lixadeira elétrica: utilizada para ajustar a cinta de ferro com a tampa da bombona para causar maior pressão e evitar possíveis vazamentos de gases;
- Dois registros de PVC: foi instalado um no meio da bombona para eliminação do excesso da água (se necessário). E o segundo registro mais abaixo para a retirada do biofertilizante;
- Cola trava rosca : utilizada para fixar e vedar o registro de gás na tampa da bombona;
- Durepoxi: utilizado para fixar os dois registros na bombona;
- Registro de gás: controle do biogás com o auxílio da válvula;
- Cano PVC com tampas e palhas de aço: filtro com palha de aço (filtrar os gases);

- 2 bicos de pneu: instalados na entrada e saída do filtro;
- Lixa preta: utilizada para eliminar toda e qualquer elemento que poderia ser cortante bem como para aparar os cortes.

4.3 Montagem do biodigestor e instalação do manômetro

Para a montagem do biodigestor, foi adquirido uma bombona de 80 litros, o tamanho foi escolhido pela facilidade de transporte, manuseio, e disponibilidade de resíduos orgânicos do restaurante e dos rejeitos de suínos.

Antes da construção, a bombona foi lavada três vezes com jatos de água para evitar qualquer contaminação e odor. Em seguida, com o auxílio de uma caneta, foram demarcados os locais onde seriam instalados os registros de PVC, e em seguida, com uma serrinha, foi feito o corte, Figura 3.

Figura 3 - A) Demarcação com caneta do local de instalação dos registros. B) Instalação dos registros de PVC no biodigestor doméstico.



Fonte: Do autor.

Para evitar qualquer tipo de vazamento, os registros foram fixados e vedados com massa adesiva. O primeiro registro foi colocado no meio do biodigestor com o intuito de eliminar água colocada acidentalmente em excesso. Já o segundo registro foi colocado mais abaixo com o intuito de retirar o biofertilizante após a decomposição do material orgânico. Logo após, completou-se a bombona com água para verificar se a mesma apresentava algum tipo de vazamento, Figura 4.

Figura 4 - Teste de vazamento dos registros instalados no biodigestor doméstico, utilizando água. A) Enchimento do biodigestor com água. B) Abertura dos registros para detecção de vazamentos.



Fonte: Do autor.

Na tampa da bombona, foi feito um furo com a furadeira e em seguida foi introduzido o registro de gás com válvula para o controle do biogás durante a biodigestão. O registro foi vedado com cola trava rosca, Figura 5.

Figura 5 - Perfuração da tampa e instalação do registro de gás, A) e B), respectivamente.



Fonte: Do autor.

A partir do registro, foi instalado uma mangueira flexível de gás, fixado com abraçadeira, que chega até a tubulação contendo palha de aço que servirá como filtro de remoção de H_2S , Figura 6. Em seguida, foi feita a continuação da mangueira de gás seguido de mangueira de silicone adaptado para o manômetro em U.

O manômetro em U foi escolhido devido sua precisão para medições de pressões relativamente baixas através do equilíbrio em coluna de água. O equipamento foi disponibilizado

pela própria Universidade para a realização das leituras e verificação da produção do biogás, Figura 7.

Antes de colocar o biodigestor para funcionamento foram feitos 3 testes de vazamento com o auxílio de um compressor de ar, Figura 8. Encheu-se o biodigestor com ar e em seguida mergulhou-se o mesmo em uma piscina de aproximadamente 250 litros. O objetivo era observar se havia algum tipo de aborbulhamento, o que não ocorreu nos três testes realizados.

Figura 6 - Biodigestor doméstico com filtro de PVC contendo palha de aço.



Fonte: Do autor.

Figura 7 - Biodigestor doméstico e Manômetro em U.



Fonte: Do autor.

Figura 8 - Teste de vazamento do biodigestor utilizando ar de compressor.



Fonte: Do autor.

4.4 Alimentação do biodigestor

Foi autorizado a instalação do biodigestor aos fundos do restaurante junto aos botijões de gás GLP. O local é aberto e quente durante o dia todo devido a insolação frequente.

De acordo com a revisão bibliográfica, optou-se por utilizar 8% de resíduos sólidos orgânicos oriundos do restaurante para a execução do teste de produção do biogás. Dessa forma, levando em consideração o tamanho do biodigestor, calculou-se que seria necessário cerca de 5,6 kg de resíduos para 64,4 litros de água, deixando 10 litros de espaço livre no biodigestor para a circulação dos gases.

Dessa forma, com o auxílio de uma balança comercial digital, pesou-se a quantidade de resíduos orgânicos que seria necessário.

Dos 5,6 kg de resíduos sólidos, 1,8kg foram de dejetos suínos para melhor eficiência na produção do biogás enquanto que, 3,8 kg foram com os restos de comida do restaurante, tais como, cascas de pepino, repolho, arroz, feijão preto, farofa de milho, cascas de laranja, de limão e de cebola, Figura 9.

Com o auxílio de um balde graduado preencheu-se o biodigestor com 64,4 litros de água e acrescentou-se em seguida os resíduos. A mistura foi agitada com um cabo de madeira até que se obtivesse uma trituração e homogeneidade, Figura 10.

Depois de ter feito todo o processo, o biodigestor foi fechado e pressionado com a cinta de ferro para o início da operação.

Figura 9 - Biodigestor contendo água, resíduos orgânicos e dejetos suínos.



Fonte: Do autor.

Figura 10 - Agitação da mistura para obter uma consistência homogênea.



Fonte: Do autor.

Vale ressaltar que não foram colocados restos de carne e ossos para evitar o mau cheiro e também o entupimento da tubulação na retirada do biofertilizante.

4.5 Operação do biodigestor

Depois de alimentado e devidamente vedado, iniciou-se a fase de operação do biodigestor onde consistia na medição da produção do biogás diariamente, medição da temperatura, quantificação dos gases dióxido de carbono ($\text{CO}+\text{CO}_2$) e sulfídrico (H_2S), agitação e testes de chama.

As leituras foram feitas 2 vezes ao dia no manômetro, sendo que a primeira era por volta da 13:00h e a segunda às 17:00h durante todo o processo de biodigestão. As duas leituras em horários diferentes possibilitariam uma melhor visualização do desempenho da digestão.

Entretanto, em decorrência das variações de temperatura, optou-se por fechar o biodigestor durante 5 dias, 2 vezes durante todo o processo de digestão anaeróbia para observar se o teste de chama iria ser mais eficiente. Neste trabalho, essas fases são chamadas de fase de fechamento e são representadas nos gráficos com a data seguido da letra “F”.

Para a medição da temperatura, utilizou-se o termômetro digital infravermelho com mira a *laser* que abrange de -50°C a 420°C . O equipamento fornece o resultado instantaneamente sem necessidade de contato físico com o biodigestor, Figura 11.

Figura 11 - Termômetro digital utilizado durante a fase de operação do biodigestor. A) Termômetro digital, B) Forma de operação.



Fonte: Do autor.

Os gases CO+CO₂ e H₂S foram medidos com o sensor de gases Ventis MX 4, Figura 12. A escolha de medir apenas esses gases deu-se devido a falha de leitura do gás metano e outros, pelo aparelho. A quantificação dos gases iniciou-se depois do primeiro mês de digestão do material pois, nos primeiros dias, não havia valores significativos. A medição passou a ser feita todos os dias no segundo horário da leitura, junto ao teste de chama.

Figura 12 - Sensor de gases Ventis MX 4 utilizado para registro dos gases COx e H₂S.



Fonte: Do autor.

A agitação foi feita manualmente para que houvesse a homogeneidade do material bem como o deslocamento dos microorganismos no interior do reator.

Para realização dos testes de chama, optou-se pela instalação do bico de Bunsen cuja mangueira era acoplada à saída de gás do biodigestor.

Foram feitos todos os procedimentos acima descritos repetidamente por 60 dias, no total de 9 semanas.

Para a quantificação do volume de biogás produzido durante o experimento, utilizou-se o sistema de gás ideal bem como o uso da equação dos gases perfeitos de Claperyon, (adaptado de METZ, 2013).

$$P*V = n*R*T \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

p = Pressão;

V = Volume;

n = Número de mols,

R = Constante universal dos gases

T = Temperatura

A partir da equação 1 , isola-se o lado direito formando a equação 2.

$$\frac{p*V}{T} = n*R \quad \text{Equação 2}$$

Assim, admitindo que o lado direito é constante durante todo o processo de biodigestão, tem-se a Equação 3.

$$\frac{P_{ext}*V_{ext}}{T_{ext}} = \frac{P_{int}*V_{int}}{T_{int}} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

P_{ext} = Pressão externa

V_{ext} = Volume externo

T_{ext} = Temperatura externa

P_{int} = Pressão interna

V_{int} = Volume interno

T_{int} = T

Dessa forma, obtêm-se a Equação 4 assumindo que existe a influência da pressão externa (atmosférica) na pressão manométrica (*phid*), portanto:

$$V_{ext} = \frac{(P_{atm} + P_{hid}) * V_{int}}{P_{atm}} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

V_{ext} = Volume externo

P_{atm} = Pressão atmosférica

P_{hid} = Pressão hidrostática (interna)

V_{int} = Volume interno

Para este trabalho, utilizou-se a pressão atmosférica referente aos respectivos dias e horários da estação meteorológica de Campo Mourão onde os resultados ficam registrados no computador da universidade. Então, sabendo-se que $V_{int} = 10$ litros (espaço livre para circulação dos gases) obtêm-se a Equação 5.

$$V_{ext} = \frac{(P_{atm} + P_{hid}) * 10}{P_{atm}} \quad \text{Equação 5}$$

Lembrando que V_{ext} é o volume livre ocupado pelos gases sob pressão atmosférica exibido na (Equação 4) tem-se que a produção efetiva do gás é dado pela Equação 6.

$$\Delta V = V_{ext} - V_{int} \quad \text{Equação 6}$$

Logo, foi possível obter a equação que relaciona a leitura da pressão hidrostática (P_{hid}) com o volume de gás produzido (V_{gp}) em um período de 24 horas, Equação 7, através da combinação das Equações 5 e 6 e levando em consideração a influência da pressão atmosférica.

$$V_{gp} = 10 * P_{hid} \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

$V_{gp} = \Delta V$ = Volume de gás produzido

$P_{hid} = ((P_{atm} + P_{hid}) / P_{amt})$ pressões atmosféricas diferentes, (adaptado para este trabalho).

Após 60 dias de digestão anaeróbia, foi retirado o efluente para quantificação e análises físico-químicas. Os dados de temperatura e pH foram obtidos através do phmetro digital portátil com temperatura, modelo PH-221, enquanto que os demais parâmetros como ácidos voláteis, sólidos, fósforo total, nitrogênio total, demanda química de oxigênio e sólidos sedimentáveis foram realizados através da metodologia descrita por Garcez (2004).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dimensionamento e construção do biodigestor doméstico

Para o dimensionamento e construção do biodigestor, levou-se em consideração o investimento, a quantidade de resíduos gerados no restaurante, a disponibilidade de material para construção e a facilidade de transporte. Portanto, optou-se por construir um biodigestor pequeno para teste de formação dos gases e biofertilizante.

De acordo com o item 4.2 deste trabalho, observou-se que o biodigestor doméstico construído é de fácil manuseio e transporte para diversos ambientes. Além disso, deu-se preferência por ferramentas de fácil acesso e materiais baratos para que o biodigestor seja, ao total, de baixo custo e que apresente boa eficiência.

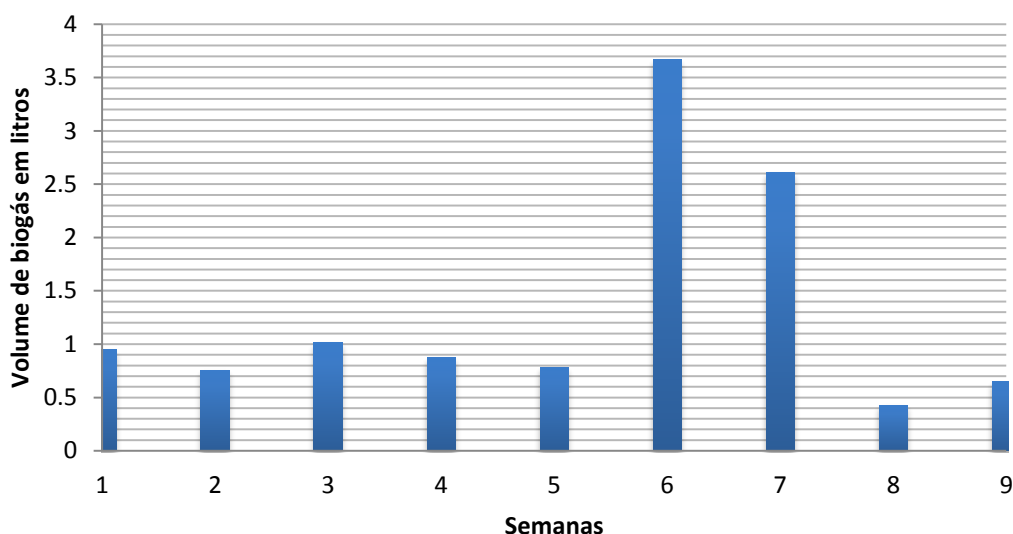
5.2 Produção de biogás

Com a equação descrita no item 4.5 deste trabalho, foi possível calcular o volume de biogás produzido diariamente durante os 60 dias de digestão e comparar com os resultados obtidos por Metz (2013), Tabela 4 e Gráfico 1.

Tabela 4 – Volume de biogás produzido em litros durante 60 dias de anaerobiose comparado com os resultados obtidos por Metz (2013).

Semana	Volume de biogás em litros (L)	Volume de biogás acumulado em litros (L)	Volume de biogás em litros (L) adquirido por Metz (2013)	Volume de biogás acumulado em litros (L) adquirido por Metz (2013)
1	0,95	0,95	26,5	26,5
2	0,756	1,706	13,4	39,9
3	1,015	2,751	10,2	50,1
4	0,876	3,627	17,2	67,3
5	0,784	4,411	61,4	128,7
6	3,673	8,084	46,1	174,8
7	2,609	10,693	37,1	211,9
8	0,429	11,122	18,7	230,6
9	0,653	11,775	8,0	238,6

Gráfico 1 - Volume de biogás produzido em litros durante 60 dias de anaerobiose.



Fonte: Do autor.

De acordo com os resultados verificou-se que, inicialmente, a produção de biogás era quase estável, sem muitas oscilações, entretanto, na sexta semana, notou-se um volume significativo de biogás, 3,6 litros. Destaca-se que a produção de biogás foi similar a outros trabalhos de mesmo teor, por exemplo, Metz (2013) cita em seu trabalho o desempenho semelhante a este experimento mas utilizando um biodigestor maior e com mais biomassa para decomposição.

Segundo Metz (2013), a quinta semana apresentou volume de biogás significativo, enquanto que a nona apresentou baixo volume, aumentando na semana seguinte.

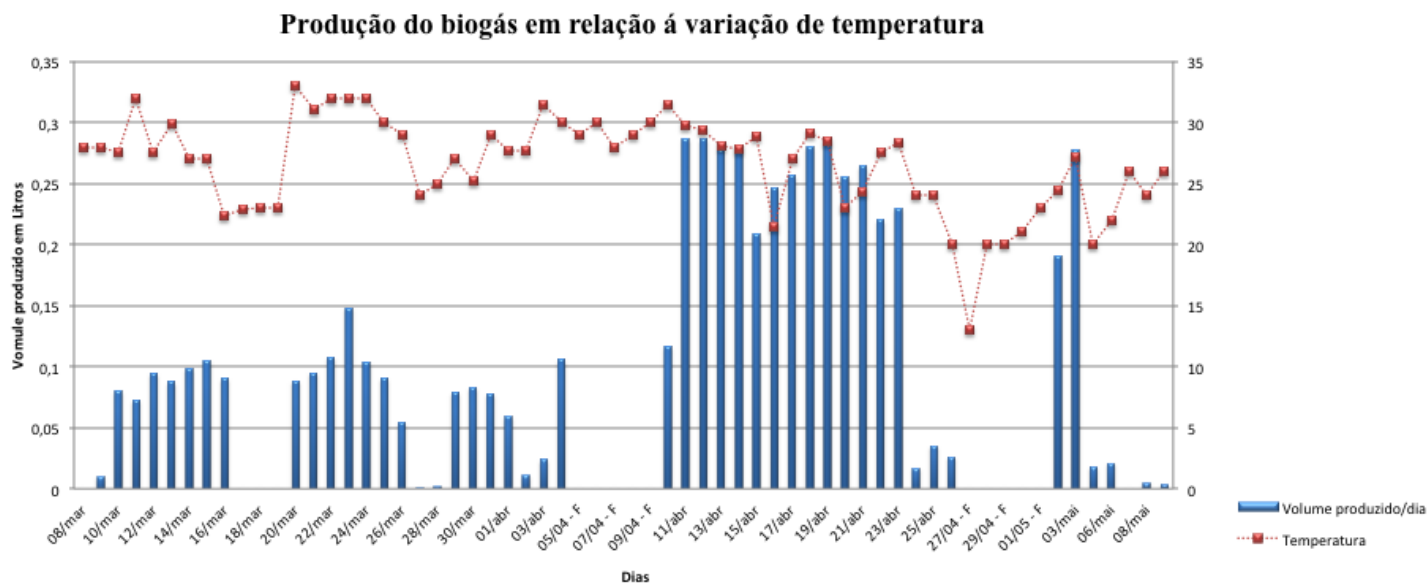
Para o presente trabalho, a semana de destaque foi a sexta, seguida de baixo volume na oitava semana e um leve aumento na nona semana.

Apesar dos dados dos trabalhos serem semelhantes, constata-se que Metz (2013) obteve maiores valores de biogás em seu experimento, isso pode ser devido ao tamanho do biodigestor utilizado (200 litros) e quantidade de biomassa (50% de restos de comida e 50% de água).

Juntamente com as leituras diárias, foi efetuado testes de chama, entretanto, não houve chama. O mesmo resultado foi relatado por Metz (2013). Apesar disso, foi identificado gases pelo aparelho sensor de gases Ventis MX4 e pelo odor característico.

Além das leituras de biogás, com o termômetro digital, foi possível gerar o gráfico de oscilação da temperatura em relação a produção de biogás durante a anaerobiose, Gráfico 2.

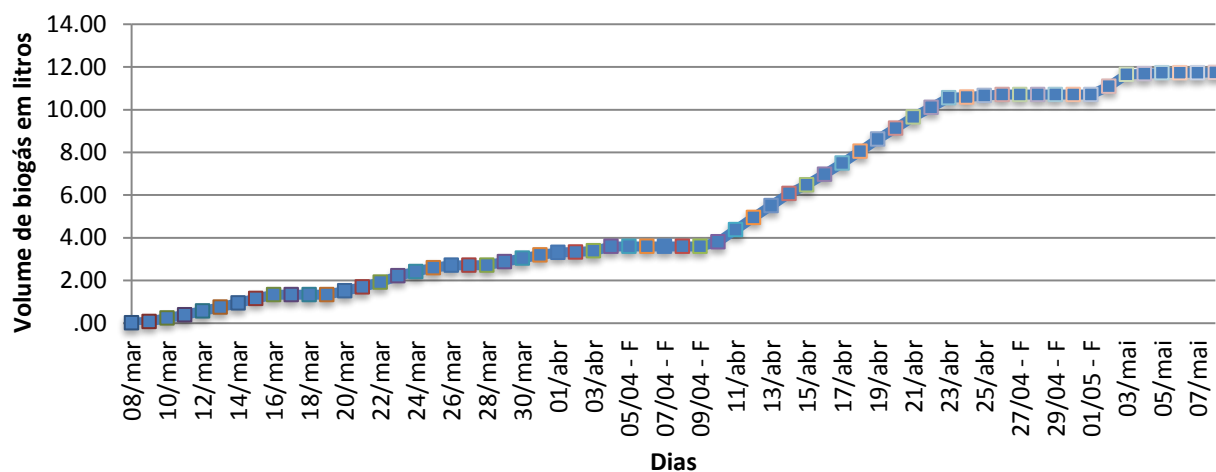
Gráfico 2 – Produção de biogás em relação a variação de temperatura (F – biodigestor fechado).



Fonte: Do autor.

Dessa forma, conclui-se que a temperatura influenciou diretamente na produção dos gases. Os dias 11 a 23 de abril apresentaram volumes maiores de gás, a partir desse dia, a temperatura caiu consideravelmente afetando a digestão anaeróbia e o volume de biogás. Observa-se também que entre os dias 25 de abril a 5 de maio, houve um leve aumento da temperatura e consequente leve aumento do volume de gases, no entanto, houve a queda de aproximadamente 5 °C, ocasionando uma possível morte das bactérias e zerando a produção nos dias seguintes. Assim, o biodigestor em 60 dias de trabalho totalizou cerca de 12 litros de biogás, Gráfico 3.

Gráfico 3 – Volume de biogás acumulado em litros, (F– biodigestor fechado).



Fonte: Do autor.

A partir do dia 05 ao dia 09 de abril, o biodigestor permaneceu fechado para acumulação de gases e teste de chama. Apesar de não ter dado chama, foi possível constatar aumento na tampa do reator em decorrência dos gases, Figura 13.

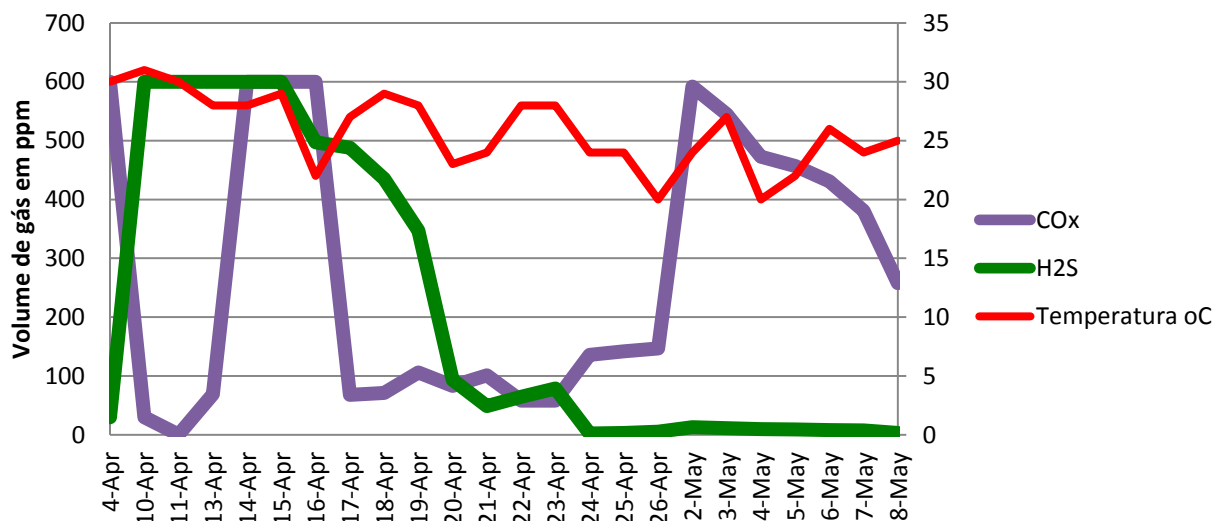
Figura 13 - A) Biodigestor vazio, B) Biodigestor alimentado e fechado por 5 dias para acumulação de gases.



Fonte: Do autor.

Quando decorridos aproximadamente 20 dias de biodigestão, iniciou-se os registros dos gases dióxido de carbono ($\text{CO}+\text{CO}_2$) e sulfídrico (H_2S) onde obteve-se os seguintes resultados, Gráfico 4.

Gráfico 4 – Volume de CO_x e H_2S durante o processo de anaerobiose.



Fonte: Do autor.

Nota-se que os gases identificados permaneceram praticamente estáveis durante os primeiros dias de registro, isso se deve principalmente pela temperatura que também encontrava-se relativamente alta e com poucas variações. A partir do dia 16 de abril, observa-se a queda da temperatura e juntamente a queda dos gases, seguido da oscilação de ambos.

Durante o processo de fermentação foi feita a agitação manual do reator, exceto nos dias 21, 22 e 23 de abril, retomando no dia 24. A agitação tem papel importante na produção e movimentação dos gases, justificando outra hipótese para a redução dos gases.

No dia 27 de abril, o biodigestor foi fechado novamente por 5 dias corridos para verificar se haveria influência positiva na produção do biogás. A partir do dia 28, o CO_2 retomou sua produção com valores significativos enquanto que o H_2S cessou e não retornou até o dia 08 de maio.

Apesar da digestão não ter sido completa, é possível perceber o aumento do CO_2 , que depois do metano, é o gás de maior presença no biogás.

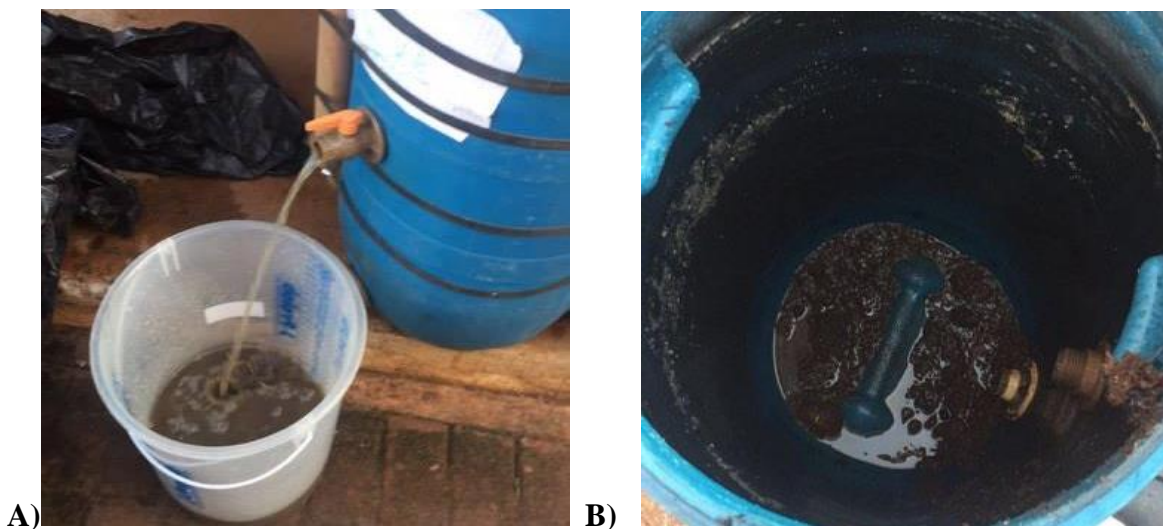
5.3 Caracterização do biofertilizante

Após 60 dias, o biodigestor foi aberto para quantificação e qualificação do efluente, o qual, apresentou forte odor, semelhante ao cheiro do chorume.

No total, foram cerca de 67 litros de efluente, com alguns pedaços pequenos resíduos orgânicos e dejetos suínos que não foram totalmente decompostos, boa parte desse material sólido estava concentrado no fundo do reator, Figura 14.

O efluente foi coletado e armazenado em um recipiente com tampa na geladeira do laboratório para a conservação da amostra. O pH e a temperatura foram medidos no ato da coleta para evitar alteração. Em seguida iniciou-se as demais análises para caracterização do biofertilizante final.

Figura 14 - A) Coleta do biofertilizante após 60 dias de digestão anaeróbia. B) Material sólido não digerido e concentrado no fundo do reator.



Fonte: Do autor.

A Tabela 5 apresenta os resultados referentes à caracterização do efluente final após 60 dias de biodigestão.

Tabela 5 – Caracterização físico-química do efluente biofertilizante.

Parâmetros	Resultados
pH	6,51
Temperatura °C	21,00
DQO (mg L⁻¹)	956,03
Nitrogênio Total (mg L⁻¹)	156,00
Fósforo total (mg L⁻¹)	56,70
Sólidos Totais (mg L⁻¹)	3.900,00
Sólidos Fixos (mg L⁻¹)	3.100,00
Sólidos Voláteis (mg L⁻¹)	800,00
Sólidos Suspensos Totais (mg L⁻¹)	1.400,00
Sólidos Suspensos Fixos (mg L⁻¹)	1.200,00
Sólidos Suspensos Voláteis (mg L⁻¹)	200,00
Sólidos Sedimentáveis (mL L⁻¹)	0,00
Ácidos Voláteis (mg HAc L⁻¹)	2.430

Fonte: Do autor.

De acordo com a Tabela 5, é possível concluir que o efluente estava acidificado, fator que pode explicar o forte odor observado pois indica que o processo de anaerobiose não foi completo, haja vista que Meynell (1976) ressalta que um efluente bem digerido deve apresentar um odor suave e inofensivo. A interrupção do processo de decomposição pode ser explicada pela morte das bactérias com a queda da temperatura.

Os micro-organismos anaeróbios metanogênicos são bastante sensíveis aos valores do pH; taxas elevadas de metanogênese desenvolvem-se apenas quando pH se mantém em uma faixa estável, próxima do valor neutro. Se o pH estiver abaixo de 6,3 ou superior a 7,8, a taxa de metanogênese diminui rapidamente e significativamente (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1999).

A acidificação se deve também pelo volume de ácidos voláteis, uma vez que o valor ideal seria abaixo de 500 mg/L, valores altos indicam desequilíbrio do sistema (SOARES, 2014). O equilíbrio na concentração dos ácidos voláteis totais é um bom indicador do funcionamento adequado de um reator anaeróbio, e quando o valor é alto, associado a um pH baixo, indica falência do processo de anaerobiose e morte das bactérias (SILVA & NOUR, 2004).

Já a Demanda Química de Oxigênio (DQO), apresentou valor menor em relação aos obtidos pelos autores Maciel (2016) e Pessuti et. al. (2015) com 2.003 (mg/L) e 2.470 (mg/L),

respectivamente, para biofertilizante a partir da digestão anaeróbia. Em termos de remoção, para este trabalho, houve a eficiência de 52%, resultado próximo foi citado por Sakuma (2013) com média de 43%. O autor explica que o baixo rendimento pode ser associado à baixa temperatura no reator.

O resultado em relação ao Nitrogênio Total foi menor quando comparado com os resultados obtidos por Pessuti et. al. (2015) que conseguiu cerca de 650 (mg/L) com digestão anaeróbia de efluente industrial de processamento da mandioca. Entretanto, o valor foi próximo ao obtido por Mendonça (2016) para biofertilizante proveniente do tratamento da água residuária da bovinocultura de leite, com cerca de 94, 23 mg/L.

Neste trabalho, o nitrogênio teve um aumento de aproximadamente 8 vezes em relação ao material antes do processo de biodigestão. Isso se deve ao fato de que a matéria orgânica, ao ser digerida, perde carbono na forma CH_4 e CO_2 , diminuindo a relação C/N e aumentando o teor de nitrogênio e outros nutrientes dando forma ao biofertilizante.

Assim como o nitrogênio, o fósforo é um dos principais nutrientes para os processos biológicos, ou seja, é um dos chamados macronutrientes (BRANCO, 2013). No Brasil, os esgotos apresentam, tipicamente, concentração de fósforo total na faixa de 6 a 10 mg/L, não exercendo efeito limitante sobre os tratamentos biológicos (PIVELI; KATO, 2006). Neste trabalho, em decorrência do efluente possuir característica de fertilizante, a concentração atingida foi em média 7 vezes maior que os resultados encontrados para efluentes sanitários. Mendonça (2016) conseguiu 31,64 mg/L para fósforo total em biofertilizante a partir da anaerobiose, com uma diferença de 25,06 mg/L em relação ao adquirido nesse trabalho.

Assim como resultados das análises anteriores, os sólidos também apresentaram valores semelhantes aos de Pessuti et. al. (2015) que encontrou 4.960 mg/L de sólidos totais e 2.300 mg/L para sólidos voláteis. Segundo Machado (2011), sólidos é todo material presente no dejetos que não seja água. Os sólidos voláteis indicam todo o material carbonáceo que será digerido e transformado em biogás. Sendo assim, o presente trabalho ainda restava cerca de 800mg/L a ser decomposto para formação de gases.

Percebe-se também que além do odor citado inicialmente, a coloração do efluente apresentou-se bem escura por razão do grande volume de sólidos suspensos dissolvidos comprovado com a análise da amostra.

Para sólidos sedimentáveis o resultado foi excelente quando comparado com a Resolução CONAMA nº 430/2011 para descarte em corpos hídricos, em que o valor máximo é 1,0 mL/L.

Entretanto, vale ressaltar que esse efluente, no geral, apresenta características que não se enquadram em resoluções para descarte em corpos hídricos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos, é possível apresentar um panorama geral sobre o trabalho e a viabilidade do emprego do biogás no restaurante. Em geral, foi possível verificar que os resultados obtidos foram similares aos de outros trabalhos de mesmo teor.

Em termos de eficiência, o biodigestor, pelo seu tamanho, mostrou-se satisfatório em relação a produção dos gases, entretanto, o volume não foi o suficiente para a queima tornando o reator inviável para geração de energia.

Entretanto, deve-se levar em consideração também que, fenômenos como a oscilação e queda da temperatura bem como a abertura da válvula todos os dias para detecção de gases podem ter afetado no resultado do volume total de biogás.

Em decorrência da ausência de legislação específica para biofertilizantes e da padronização de parâmetros, uma boa opção para a destinação final do efluente seria o descarte em solos para proporcionar a correção do pH, levando em consideração que o pH do solo é acidificado e o biofertilizante gerado resultou em pH 6,51.

Outra hipótese para este trabalho é o fato da digestão ter sido incompleta, portanto, nesse caso, o efluente poderia também permanecer no biodigestor por mais alguns dias para que haja o tratamento completo efetuado pelos microorganismos.

Para finalizar, conclui-se que o emprego do biodigestor em um restaurante de médio a grande porte torna-se viável em relação ao tratamento de resíduos sólidos orgânicos, uma vez que há uma destinação ambientalmente correta, gerando energia e biofertilizante. Ademais, como sugestão de trabalhos futuros, seria interessante a elaboração de um biodigestor com sistema de aquecimento e agitação constantes para melhores resultados e eficiência do processo e assim, possível substituição do gás GLP pelo biogás. A substituição têm como benefícios, a utilização de uma fonte de energia renovável, economia, e o bem estar sócio- ambiental.

7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos, em geral, mostraram-se similares aos de outros trabalhos utilizando biodigestores com digestão anaeróbia.

No total foi gerado cerca de 12 litros de biogás o qual não mostrou-se o suficiente para queima e substituição do gás GLP do restaurante. Entretanto, deve-se levar em consideração os fatores de influência da produção dos gases e o tempo de decomposição do material que, para este trabalho, foi interrompido para a análise físico-química do efluente gerado.

Apesar da ineficiência do biogás, o biodigestor mostrou-se ser de fácil operação, transporte e com peças acessíveis de baixo custo.

O biofertilizante gerado em 60 dias, apesar de acidificado pH 6,51, destacou-se rico em nutrientes como nitrogênio com 156mg/L e fósforo total com aproximadamente 57mg/L podendo servir como corretivo para solos ácidos.

Para finalizar, além da produção do biogás e do biofertilizante, a digestão anaeróbia garantiu, de forma correta, a destinação dos resíduos sólidos orgânicos provenientes do restaurante universitário.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2014. Disponível em:

<<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>. Acesso em: 01 Dez. 2016

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL. **Biomassa: Fontes renováveis**. 1 ed. 153 p. 2002. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 15 set. 2016.

BARICHELLO R., HOFFMANN R., FILHO N. C., DEIMLING M. F. Pequeno condomínio de agroenergia a partir do biogás proveniente do tratamento de dejetos suínos: Um estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXXII, 2012, Rio Grande do Sul. **As Contribuições da Engenharia de Produção**. Bento Gonçalves, RS. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2012_TN_STO_165_960_19897.pdf>. Acesso em: 15 set. 2016.

BARROS T. D. **Biofertilizante**. 2012 . Embrapa Informática Agropecuária. Disponível em <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fjaakw3q02wyiv809gkz5151b3dhe.html>> Acesso em 11 mai. 2017.

BLEY JUNIOR C. **Biogás : a energia invisível**. 2015. Livro [prefácio de Leonardo Bo] – 2a ed. rev. e ampl.; São Paulo : CIBiogás.

BRANCO, P. M. P. **Biodigestão anaeróbia de águas residuárias humanas: composição do biogás e qualidade do efluente**. 2013. 80f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Câmpus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2013.

BRASIL. **Resolução nº 54**, de 09 de Março de 2006. Ministério Do Meio Ambiente. Conselho Nacional De Recursos Hídricos.

BRASIL. **Resolução nº 121**, de 16 de Dezembro de 2010. Ministério Do Meio Ambiente. Conselho Nacional De Recursos Hídricos.

BRASIL. **Lei n.12.305**, de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Biblioteca digital da Câmara dos Deputados. Série Legislação, edição 2, Brasília, 2012. Disponível em: <http://fld.com.br/catadores/pdf/politica_residuos_solidos.pdf>. Acesso em 21 Set. 2016.

BONTURI G. L.; DIJK M. Instalações de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagem e desvantagens socioambientais. In: ENCONTRO DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE, I, 2014, Campinas. **Biologia Animal**. Campinas, SP. Disponível em: <http://www.ib.unicamp.br/dep_biologia_animal/BE310>. Acesso em: 16 set. 2016.

CASTANHO, D. S., ARRUDA, H. J. Biodigestores. In: SEMANA DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, VI, 2008, Ponta Grossa, PR. **Tecnologia em Alimentos**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/chines1_000g7gph0mm02wx5ok0wtedt3q5rn9mk.pdf> . Acesso em: 16 set. 2016.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). **Fontes de energia alternativas:** Solar, Eólica, Hidráulica e Vegetal. 2016. Disponível em: <http://cetem.gov.br/images/sustentavel/sustentabilidade/pdf/Energia_solar/Fontes_de_Energia_Alternativas.pdf>. Acesso em 16 Set. 2016.

CERVI, R. G. ESPERANCINI M. S. T., BUENO O. D. C. **Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suínica para geração de energia elétrica**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 30, n.5, p. 831-844, 2010.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias;** reatores anaeróbios. 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1997. v. 5.

COELHO, S. T.; PALETTA, C. E. M.; FREITAS, M. A. V. De. Medidas mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica. Brasília: **Dupligráfica**, 2000.

COELHO, S. L., JUNQUEIRA D. **Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino:** estudo de caso na fazenda Aterrado. 2014. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Engenheiro Mecânico da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica com Biogás da Bovinocultura de Leite**. 2004, 9f. Dissertação (Mestrado em engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel – PR.

COMASTRI FILHO, J. A. Biogás: **Independência energética do Pantanal Mato-Grossense**. Out.1981. Comitê de Publicações da UEPAE de Corumbá, EMBRAPA. Circular técnica N.º 9. 2006. Disponível em: < <http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/online/CT09.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). **Biomassa**. 2016. Disponível em <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F24349F1A246428E1032574240049F201>> Acesso em 12 mar. 2017

CORTEZ, L. A. B., LORA E. E. S., GÓMEZ E. O. **Biomassa para energia**. 2008. Campinas, SP: Editora da Unicamp. 29p.

COSTA, F. X.; LIMA, V. L. A.; BELTRÃO, N. E. D. M.; AZEVEDO, C. A. V.; SOARES, F. A. & Alva, I. D. M. Efeitos residuais da aplicação de biossólidos e da irrigação com água residuária no crescimento do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2009.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. , C.J.P.; ROSSI, M. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, **Anais eletrônicos**, Campinas.

DONGALA, A. M. **Projeto de biodigestor para geração de bioenergia em sistema de produção de suínos**: um estudo de caso da região de Icolo e Bengo – Angola. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, 2010.

DENNIS, A.; BURKE, P.E. **Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook**: Options for Recovering Beneficial Products From Dairy Manure. Environmental Energy Company. Olympia, 2001.

FERREIRA, J. **Produção de biogás e funcionamento de biodigestores no ensino de ciências**. 44 f. Monografia (Especialização no Ensino de Ciências) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

GARCEZ L. N. **Manual de técnicas de laboratório voltado para análises de águas e esgoto sanitário e industrial**. 2004. 113 f. Escola politécnica da Universidade de São Paulo.

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

GENOVESE, A., UDAETA, M. E. M., GALVAO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo.. In: **ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, 6., 2006, Campinas.

GONÇALVES H. F. E., LIMA. R. D. S., WEISS V. A. B., MENEZES V. D. S. **O biodigestor como princípio de sustentabilidade de uma propriedade rural**. Portal de documentos de gestão ambiental da Faculdade Católica do Tocantins, 2009. Disponível em: <http://www.catolica-to.edu.br/portal/portal/downloads/docs_gestaoambiental/projetos2009-1/1periodo/O_biodigestor_como_principio_de_sustentabilidade_de_uma_propriedade_rural.pdf>. Acesso em: 15 set. 2016.

HINRICHS, R.; KLEINBACH, M. H. **Energia e meio ambiente**. São Paulo, SP: Pioneira Thomson Learning, 2004.

HOME BIOGAS. **A Revolutionary Household Biogas System**. 2016. Disponível em: <<http://www.homebiogas.com>>. Acesso em 15 Set. 2016.

JORGE, L., H., A.; OMENA, E. **Biodigestor**. Dossiê Técnico. SENAI/ AM- Escola SENAI Antônio Simões. Março, 2012.

KOTZÉ, J. P.; THIEL, P. G.; HATTINGH, W. H. J. Anaerobic digestion: the characterization and control of anaerobic digestion. **Water Research**, v. 3, n, 7, p. 459-494, July 1969.

- LEMA, J.M.; MENDEZ, R., SOTO, M. **Tratamento de anaeróbios para o tratamento de efluentes líquidos**. In: Curso de digestão anaeróbia aplicada a resíduos sólidos e líquidos. Recife, 1997.
- LIMA, J. F. **Controle e remoção de sulfetos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário**. 2015. 97f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2015.
- LIPPEL. **O que é biomassa**. 2017. Disponível em <<http://www.lippel.com.br/br/o-que-e-biomassa.html>> Acesso em: 19 de mar. 2017
- MACHADO, C. R. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar**. Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu/SP: 2011.
- MACIEL, A. M. **Avaliação da aplicação de biofertilizante de bovinocultura proveniente da digestão anaeróbia em um planossolo**. 2016. 26 f. Trabalho de Conclusão de curso – Faculdade de Engenharia da UFJF, Minas Gerais, 2016.
- MARCHAIM, U. **Biogas process for sustainable development**. 1. ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992. 232 p.
- MARQUES S. M. A. A.; SILVA JÚNIOR F. J.; MONTEIRO M. K. D.; VIEIRA A. S.; VENTURA A. F. A.; VENTURA JÚNIOR R. Produção de biofertilizante, adubo orgânico e biogás para agricultura familiar. **Revista Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Santa Maria - RS, v. 18 n. 3, p. 990-999, 2014.
- MATIAS V. R. S. **Energia e meio ambiente: Aplicações Geoestatísticas**. 2014. In: I Simpósio Mineiro de Geografia, 2014. Alfenas, Minas Gerais.
- MAZZUCCHI, O.A.J. **Biodigestor rural**. São Paulo, CESP, 1980, 29p.
- MENDONÇA, H. V. Curva de crescimento de dois cultivares de cana de açúcar (*Saccharum officinarum*), sob aplicação de biofertilizante e ureia. 2016. In : XIII Congresso Internacional do Leite, XIII Workshop de Políticas Públicas, XIV Simpósio de Sustentabilidade da Atividade Leiteira., Porto Alegre - RS - Brasil., **Anais**. Volume: 1.
- METZ, H. L. **Construção de um biodigestor caseiro para demonstração de produção de biogás e biofertilizante em escolas situadas em meios urbanos**. 2013. 40 f. Monografia (Especialização em Formas Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- MEYNELL, P. J. **Methane: planning a digester**. Ed. Prism Press, 1976. 150 p. (C.T.T. Series, 2).
- NEVES, V. L. V. **Construção de biodigestor para produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino**. 57f. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Faculdade de Tecnologia em Biocombustíveis)- Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2010.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1992. 93 p.

OLIVER, A. P. M. **Manual de treinamento em biodigestão**. 2008. Versão 2.0. Disponível em: <http://www.ieham.org/html/docs/Manual_Biodigestao.pdf>. Acesso em: 14 Set. 2016.

OLIVEIRA, JÚNIOR F. A. **Ensino não formal da diminuição da carga poluidora de dejetos animais a partir da produção de biogás e biofertilizante em pequenas propriedades rurais**. 2013. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Matemática) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

OLIVEIRA, M. M. **Estudo da inclusão de compartimentos em biodigestores modelo canadense**. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Área de Concentração em Desenvolvimento de Processos Agroindustriais e Ambientais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria- RS, 2012.

OLIVEIRA, T. F. F., SANTOS H. I. **Uso da energia eólica como alternativa para mitigar o agravamento do efeito estufa**. 2010. 19f. Universidade Católica de Goiás, 2010.

PALHARES, J. C.P. Biodigestão anaeróbica de dejetos suínos: **aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro**. 2008. Artigo em Hipertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/artigos/2008_1/Biodigestao/index.htm>. Acesso em 12 de abr. 2017

PECORA, V. – Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – **Estudo de caso**, 2006.

PERMINIO, G. B. **Viabilidade do uso de biodigestor como tratamento de efluentes domésticos descentralizado**. Monografia (Especialização em Tratamento de Efluentes) – Universidade Federal de Lavras, Lavras 2013.

PESSUTI, C. A. A., HERMES E., NEVES C., SILVA R. P., PENACHIO M., ZENATTI D. C. Diferentes doses de biofertilizante proveniente da digestão anaeróbia de efluente de processamento de mandioca no cultivo de soja. **Revista gestão e sustentabilidade ambiental**, Florianópolis, n. esp, p.556-564, dez. 2015.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos Físico-Químicos**. Editora ABES, 2006.

POULSEN, T. G. Anaerobic digestion: **Solid Waste Management**. Aalborg University, Denmark, June 2003. p. 93-115.

RICARDO, C. M. **Avaliação econômica de biodigestor de fluxo tubular, com sistema de recirculação, no tratamento de dejetos de suínos**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2012.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. 2007. 247 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

SANSUY. **Primeira unidade de biodigestores do Brasil é inaugurada em Minas**. 16set. 2004. Disponível em: <<http://www.sansuy.com.br/news.php?recid=9>>. Acesso em 10 de mar. 2017.

RODRIGUES, A. A. L. S. **Co-digestão anaeróbia de resíduos de natureza orgânica**. 2005. 164f. (Tese de Doutorado) - Universidade de Aveiro, Portugal, 2005.

SAKUMA, A. C. **Desenvolvimento e análise experimental de biodigestores modulares de baixo tempo de residência**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SANTOS, A. C. V. dos. **Biofertilizante líquido** : o defensivo da natureza. Niterói: EMATER – Rio, 1992. 16 p. (Agropecuária fluminense, 8).

SEIXAS, J. **Construção e Funcionamento de Biodigestores**. 1980. 60p. Brasília.

SILVA, D. J. A. D. Biogás: uma energia limpa. **Revista Novo Enfoque**, Rio de Janeiro, v.13, n. 13, p.142 -149. Set. 2011.

SILVA, E. P. D. **Fontes renováveis de energia**: produção de energia para um desenvolvimento sustentável. 1. ed. Livraria da Física, p. 356, 2014.

SILVA, G. H. R.; NOUR, E. A. A. Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio: sistema de baixo custo para tratamento de esgotos de pequenas comunidades. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.2, p.268-275, 2005.

SILVA, N. P.; JUNIOR, E. G.; CAMARGO, J. R.; CHAVES, C. A. Estudo técnico e econômico para implantação de reúso de água em uma estação de tratamento de efluentes sanitários de uma indústria eletrônica. In: **III Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, Universidade de Taubaté, 2006.

SILVEIRA, M. A. **Energia Renovável: Biogás e Biodiesel**. 2012. 89 f. (Relatório Final de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SIQUEIRA, L. M. **Influência da taxa de carregamento orgânico na degradação anaeróbia da vinhaça em reator de leito fluidizado**. 130 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 2008.

SOARES, A. **Apostila de química analítica experimental**. 2014. Universidade Federal de Pernambuco.

TESSEROLI NETO, E. A. **Biofertilizantes: Caracterização química, qualidade sanitária e Eficiência em Diferentes Concentrações na Cultura da Alfaca**. 2006. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos** : um manual para regiões de clima quente. p.208. Editora Epgraf., 1994.

VILLEN, R. A. Tratamento Biológico de Efluentes. 2001. In: Lima, U. A. L., Aquarone, E., Borzani, W., Schmidell, W (cords.) **Biotecnologia Industrial: Processos fermentativos e enzimáticos**. Vol. 3. São Paulo.

WELLINGER A; LINDEBERG A. Biogás upgrading and utilization. Task 24: **energy from biological conversion of organic wastes**, pp. 1–19, 1999.

WEREKO-BROBBY, C. Y.; HAGEN, E. B. **Biomass conversion and technology**. New York: John Wiley & Sons, 2000.