

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

GUSTAVO DE SOTTI

**BIOGÁS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS
DE RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO COM EFLUENTE SANITÁRIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2014

GUSTAVO DE SOTTI

**BIOGÁS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS
DE RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO COM EFLUENTE SANITÁRIO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de “Engenheiro Ambiental”.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi

LONDRINA
2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário
com efluente sanitário

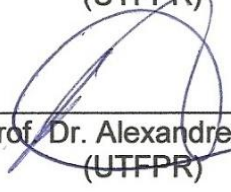
por

Gustavo de Sotti

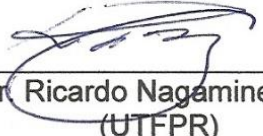
Monografia apresentada no dia 28 de fevereiro de 2014 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).



Prof. Dr. Aulus Roberto Romão Binelli
(UTFPR)



Prof. Dr. Alexandre Sordi
(UTFPR)



Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi
(UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Joseane Débora Peruço Theodoro
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio incondicional ao longo da minha jornada acadêmica e por me prover dos recursos e ferramentas necessárias para que meus objetivos fossem alcançados.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Londrina pelo espaço e equipamentos cedidos para a realização desta pesquisa.

Ao meu orientador, professor Dr. Ricardo Nagamine Costanzi, meus sinceros agradecimentos por ter a mim compartilhado parte do seu vasto conhecimento técnico e de vida durante a orientação deste trabalho. Por ter dedicado e dispendido seu tempo vago inclusive no período de férias permitindo assim a execução deste projeto.

Ao professor Dr. Admir Crésó de Lima Targino e à Fundação Araucária por intermédio do Projeto ICALON, contrato número 470/2010, por disponibilizar o sensor de temperatura e umidade utilizado durante o período de estudo.

Agradeço aos meus amigos pelos momentos de alegria e companheirismo ao longo desses cinco anos. “Pessoas incríveis, grandes histórias e memórias eternas”.

À todos os professores e colaboradores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Londrina, que tiveram influência direta ou indireta para minha formação acadêmica.

RESUMO

SOTTI, Gustavo de. Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário. 2014. 59 f. Monografia (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

Este trabalho possui como escopo a produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos provenientes de restaurante universitário associado a efluente sanitário e sintético. As principais vantagens deste estudo são a redução de custos com o transporte e disposição final da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e a implantação de sistemas de tratamento anaeróbio descentralizados com geração de energia. Desta forma foi avaliada a produção de biogás ao longo do tempo de reatores simplificados associados a gasômetros em escala de laboratório. Foram utilizadas diferentes concentrações de resíduos sólidos orgânicos com efluentes diferentes. Um indicador de controle utilizado foi o volume de biogás produzido parametrizado com a massa de sólidos voláteis. Foram realizados três diferentes ensaios: i) utilização apenas de resíduo orgânico; ii) combinação entre resíduo orgânico e esgoto sintético; iii) combinação entre resíduo orgânico e esgoto bruto da ETE de Ibiporã – PR. Os resíduos orgânicos foram coletados em diferentes dias de funcionamento do Restaurante Universitário. Estas amostras compostas foram caracterizadas qualitativamente e trituradas previamente até ser obtido um material pastoso e visualmente homogêneo. A taxa de diluição utilizada nos ensaios ii) e iii) foi de 100 gramas de resíduo orgânico triturado para 1 litro de esgoto sanitário, em uma proporção de 10%. As amostras foram inoculadas em reatores de PVC com volume útil 0,982L e o biogás foi acumulado e mensurado em gasômetros de PVC de cúpula móvel com volume total de 2,209L. Os parâmetros analisados no decorrer do experimento foram: pH, condutividade elétrica, sólidos totais, sólidos voláteis, sólidos suspensos voláteis, sólidos fixos, alcalinidade e análise qualitativa e quantitativa do biogás produzido. Como principais resultados, obteve-se uma produtividade de biogás de $5,22\text{mL.g}^{-1}$ de sólidos voláteis para o ensaio i), $32,5\text{mL.g}^{-1}$ de sólidos voláteis para o ensaio ii) e $16,965\text{mL.g}^{-1}$ de sólidos voláteis para o ensaio iii). A análise qualitativa do biogás pelo método do borbulhamento em solução de NaOH com 50g.L^{-1} , resultou na concentração de 73,61% de CH_4 para o biogás produzido no ensaio 2 e em 76,2% de CH_4 para o ensaio 3. Dentre os parâmetros analisados, pH e alcalinidade se mostraram essenciais para o bom funcionamento dos reatores, sendo crucial a realização e monitoramento desses parâmetros ao longo do experimento a fim de alcançar a produtividade ótima de biogás. A análise do tempo de retorno para o investimento em uma unidade em escala real para a produção do biogás nas condições de trabalho realizadas nesse trabalho resultou no tempo de retorno de 11 anos para os dados de literatura e no tempo de retorno de 23 e 24 anos para os dados experimentais.

Palavras – chave: Biogás. Resíduo orgânico de Restaurante Universitário. Biodigestão anaeróbia.

ABSTRACT

SOTTI, Gustavo de. Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário. 2014. 59 f. Monografia (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

This work has as its scope the production of biogas from the anaerobic digestion of organic waste from university restaurant associated with sanitary and synthetic sewage. The main advantages of this study are to reduce costs with transportation and final disposal of the organic fraction of municipal solid waste and the implementation of anaerobic treatment with decentralized power generation systems. Thus we evaluated the biogas production over time with simplified reactors associated in gasometers in laboratory scale. Different concentrations of organic solid waste with different sewages were used. A control indicator used was the volume of biogas produced parameterized with the mass of volatile solids. Three different tests were performed: i) use of only organic residue; ii) combination of food waste and synthetic wastewater; iii) combination of food waste and raw sewage from the STP Ibiporã-PR. The food waste were collected on different days of operation of University Restaurant. These composite samples were characterized qualitatively and previously grounded to be obtained a pasty and visually homogeneous material. The dilution rate used in tests ii) and iii) was 100 grams of triturated organic residue in 1 liter of sewage in a proportion of 10%. The samples were inoculated in PVC reactors with a working volume of 0.982 Liter and the biogas was accumulated and measured in free dome gasometers of PVC with total volume of 2,209 Liters. The parameters analyzed during the experiment were: pH, electrical conductivity, volatile suspended solids, fixed solids, total solids, volatile solids, alkalinity and qualitative and quantitative analysis of the biogas produced. The main results obtained were a yield of biogas 5.22mL.g^{-1} of volatile solids for test i), 32.5mL.g^{-1} of volatile solids for testing ii) and 16.965mL.g^{-1} of volatile solids to test iii). The qualitative analysis of the biogas by the method of bubbling in NaOH solution with 50 g L^{-1} , resulted in the concentration of 73.61% for CH₄ biogas produced in trial 2 and 76.2% CH₄ for test 3. Among the analyzed parameters, pH and alkalinity proved essential to the smooth operation of the reactors, crucial to implementation and monitoring of these parameters throughout the experiment in order to achieve the optimum biogas productivity. Time analysis of return on investment in a unit in real time to the production of biogas in working conditions performed in this work resulted in the scale return time of 11 years to the literature data and the turnaround time of 23 to 24 years for experimental data.

Keywords: Biogas. Waste food from. Anaerobic digestion

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Comparativo da geração total de resíduos orgânicos em restaurantes universitários	12
Tabela 2 – Composição do biogás	14
Tabela 3 – Comparação entre biogás e outros combustíveis.....	14
Tabela 4 – Faixa de temperatura para crescimento de bactérias.....	16
Tabela 5 – Caracterização qualitativa da amostra composta para a Fase 1	26
Tabela 6 – Caracterização qualitativa da amostra composta para a Fase 2.....	27
Tabela 7– Caracterização qualitativa das amostras coletadas.....	27
Tabela 8– Composição do esgoto sanitário sintético (continua).....	28
Tabela 9 – Constituintes nos reatores Fase 1	30
Tabela 10– Constituintes nos reatores Fase 2	31
Tabela 11– Constituintes nos reatores Fase 3	32
Tabela 12 – Parâmetros para o dimensionamento e cálculo do tempo de retorno ...	32
Tabela 13 – GLP equivalente produzido	34
Tabela 14 – Economia de GLP	35
Tabela 15 – Listagem de equipamentos baseada na produtividade de Kubaská <i>et al</i> (2010).....	36
Tabela 16 – Listagem de equipamentos baseada no ensaio 2	36
Tabela 17 – Listagem de equipamentos baseada no ensaio 3	36
Tabela 18 – Condutividade elétrica e pH Fase 1.....	39
Tabela 19 – Sólidos totais, voláteis e fixos Fase 1	40
Tabela 20 – pH Fase 2.....	43
Tabela 21 – Condutividade elétrica Fase 2	43
Tabela 22 – Sólidos totais, voláteis e fixos Fase 2.....	44
Tabela 23 – Alcalinidade Fase 2	45
Tabela 24 – pH Fase 3.....	48
Tabela 25 – Condutividade elétrica Fase 3	48
Tabela 26 – Sólidos totais, voláteis e fixos Fase 3.....	49
Tabela 27 – Sólidos suspensos do esgoto bruto.....	49
Tabela 28 – Alcalinidade Fase 3	50
Tabela 29 – Tempo de retorno do investimento em equipamentos.....	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 Geração de resíduos orgânicos em restaurantes universitários	11
2.2 Biomassa	12
2.3 Biogás	13
2.3.1 Hidrólise e acidogênese	14
2.3.2 Acetogênese	15
2.3.3 Metanogênese.....	15
2.3.4 Sulfetogênese	16
2.3.5 Características que influenciam na produção do biogás	16
2.4 Biodigestores	17
3 METODOLOGIA	18
3.1 Local de estudo	18
3.2 A pesquisa	19
3.3 Análises	19
3.1.1 pH.....	20
3.1.2 Condutividade elétrica	21
3.1.3 Alcalinidade	21
3.1.4 Sólidos totais	21
3.1.5 Sólidos voláteis	22
3.1.6 Sólidos fixos	23
3.1.7 Sólidos suspensos	23
3.1.8 Análise do biogás	24
3.4 Resíduos sólidos orgânicos	25
3.4.1 Fase 1	26
3.4.2 Fase 2	27
3.4.3 Fase 3	27
3.5 Efluentes	28
3.5.1 Esgoto sintético	28
3.5.2 Esgoto bruto	28
3.6 Reatores e gasômetros	29
3.7 Montagem	30
3.7.1 Fase 1	30
3.7.2 Fase 2	31
3.7.3 Fase 3	31

3.8 Estimativa para tempo de retorno do investimento	32
4 RESULTADOS.....	37
4.1 Fase 1	37
4.1.1 Produção de biogás	37
4.1.2 Análises laboratoriais	39
4.1.2.1 Condutividade elétrica e pH	39
4.1.2.2 Sólidos totais, Voláteis e Fixos	39
4.2 Fase 2	41
4.2.1 Produção de biogás	41
4.2.2 Análises laboratoriais	42
4.2.2.1 pH.....	42
4.2.2.2 Condutividade	43
4.2.2.3 Sólidos totais, Voláteis e Fixos.....	44
4.2.2.4 Alcalinidade	45
4.2.3 Análise química do biogás.....	45
4.3 Fase 3	46
4.3.1 Produção de biogás	46
4.3.2 Análises laboratoriais	47
4.3.2.1 pH.....	47
4.3.2.2 Condutividade	48
4.3.2.3 Sólidos suspensos, Totais, Voláteis e Fixos.....	49
4.3.2.4 Alcalinidade	50
4.3.3 Análise química do biogás.....	50
4.4 Estimativa do tempo de retorno para o investimento	51
5. CONSIDERAÇÕES GERAIS	52
6. CONCLUSÕES.....	54
7 RECOMENDAÇÕES.....	55
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Devido às condições naturais de relevo e disponibilidade hídrica, o sistema de geração elétrica do Brasil é essencialmente fundamentado na produção hidráulica com o uso de hidrelétricas em toda a extensão territorial. Embora esse modelo de produção seja considerado renovável e limpo, o emprego desta tecnologia possui contradições sociais e culturais locais além de um vasto potencial degradador para o meio ambiente durante a sua instalação, represamento e inundação de vários quilômetros quadrados.

A fim de ampliar a diversidade da matriz energética do Brasil, a utilização outras fontes de energia estão sendo pesquisadas, como parques eólicos, plantas de geração de energia solar e o uso da biomassa. O uso da biomassa recebeu incentivos desde a década de 70 com o programa Pró-Álcool resultando na inserção do etanol na matriz energética renovável brasileira.

No Brasil, a biomassa como fonte de energia possui vantagens significativas, principalmente por vir a diversificar a matriz energética brasileira frente à dependência externa do país com relação aos combustíveis fósseis importados, além de contribuir para um desenvolvimento sustentável do país, em particular com a utilização de mão de obra local, principalmente na zona rural, podendo colaborar na garantia de suprimento de energia a comunidades isoladas, principalmente nas regiões Norte e Centro Oeste do país (GENOVESE, *et al.*, 2006).

Com foco na sustentabilidade e na redução de perdas com potenciais fontes de energia, o uso da biomassa está em amplo crescimento. As três principais rotas tecnológicas disponíveis de conversão da biomassa em energia: Conversão termoquímica, conversão bioquímica e conversão físico-química. (GENOVESE, *et al.*, 2006).

A via bioquímica de conversão energética da biomassa utiliza processos biológicos e bioquímicos, que inclui a digestão anaeróbica, a fermentação / destilação e a hidrólise. Destas, a digestão anaeróbica é a que apresenta as mais adequadas condições para a geração de energia elétrica, através da utilização do biogás (VERINGA, 2000). O biogás produzido é constituído basicamente por metano e dióxido de carbono, sendo o gás metano capaz de conferir ao biogás a capacidade

de ser utilizado como fonte de energia, em especial na substituição do gás natural e/ou do gás liquefeito de petróleo.

Inúmeras podem ser as fontes de resíduo orgânico para a produção do biogás, os resíduos mais utilizados para essa técnica são produzidos na área rural, a exemplo dos dejetos de criadouros de suínos, bovinos, caprinos e cama de aviário. No meio urbano os principais produtores de biogás são as estações de tratamento de efluentes, com o uso de reatores anaeróbios. A área urbana possui um grande potencial gerador de biogás, no Brasil, dos resíduos sólidos urbanos coletados e destinados à aterros sanitários, mais de 50% da massa de resíduos corresponde a fração orgânica (ALBERTONI, 2013).

A utilização do biogás como fonte de produção de energia proveniente da digestão da fração orgânica presente nos resíduos sólidos e efluentes sanitários representa grande benefício socioambiental, principalmente nos grandes centros urbanos, devido à redução na disposição final em aterros e na redução da carga orgânica dos efluentes, bem como na diminuição nas emissões de poluentes, como o metano, gás de grande impacto no efeito estufa que corresponde em até 70% do biogás (FAZOLO, 2011).

A justificativa desse trabalho está, então, na possibilidade de produção e uso de uma forma de energia renovável, utilizando a fração orgânica do resíduo de grandes geradores urbanos, como restaurantes, que são destinadas sem o seu potencial aproveitamento energético.

Assim, os objetivos desse trabalho são: quantificar a taxa de produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia dos resíduos orgânicos gerados em restaurante universitário; identificar a composição química do biogás produzido no processo e, por fim, verificar uma possível aplicação direta desse combustível nos polos geradores de resíduos de refeição.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Geração de resíduos orgânicos em restaurantes universitários

Os restaurantes convencionais são atividades que geram grande quantidade de resíduos sólidos orgânicos, sendo esta geração compreendida em todas as etapas do processo, iniciando na manipulação e preparo dos alimentos até o descarte das sobras contidas nos pratos após a refeição.

Restaurantes universitários não diferem dessa realidade, os estudos mostram que a parcela do resíduo orgânico representa a maior porção em massa e volume dos resíduos gerados neste local. No campus Londrina da UTFPR, Albertoni (2013), realizou a caracterização física dos resíduos gerados no Restaurante Universitário. Para o estudo não houve amostragem por quarteamento, utilizando toda a quantidade de resíduos que foram segregados em: resíduos orgânicos, rejeitos, papéis, plásticos, metal, vidro, madeira e outros. A coleta de dados ocorreu nos meses de junho e julho de 2013, em pleno período de aulas.

Fatores importantes com relação a geração de resíduos são citados em seu estudo. Foi identificado que o dia da semana, o cardápio e o horário (almoço ou janta) influem significativamente para a variação da geração de resíduos no Restaurante Universitário. Dias que contém mais alunos no campus, cardápios que sejam mais agradáveis ao paladar dos comensais e cardápios que possuam mais ossos dentre as opções servidas interferem diretamente no volume dos resíduos produzidos nas refeições.

A quantidade média de resíduos sólidos orgânicos gerada por refeição após quatro semanas de amostragem foi de $0,1941\text{kg.refeição}^{-1}$, essa taxa inclui a fração orgânica proveniente dos restos dos pratos e do descarte da cozinha. Em média eram produzidos $68,92\text{kg.dia}^{-1}$ de resíduos orgânicos para a realidade de junho/julho de 2013, com média de $355\text{refeições.dia}^{-1}$.

Costa *et al.* (2004), em estudo realizado no campus I da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), mostra que nas áreas designadas para a alimentação da comunidade acadêmica, os resíduos orgânicos representam um percentual de 97,21% da massa total gerada. Sendo produzido $450,77\text{ kg/semana}$ de resíduo

orgânico provindo da alimentação de uma média de 800 pessoas/dia. Em um levantamento realizado no restaurante central do campus de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), Menezes, Santos e Leme (2002), encontraram um percentual de resíduos orgânicos de 74,6% da massa total gerada no restaurante. Com 268,6 kg produzidos em 2 dias de análise após serem servidas aproximadamente 2.000 refeições. Napolini *et al.* (2009) em um diagnóstico elaborado no restaurante universitário no campus Cuiabá da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT) durante um período de seis dias, obtiveram que neste período foi gerado 1.195,8 kg de resíduos orgânicos após serem servidas 9.696 refeições.

A Tabela 1 contém os dados dos quatro estudos acima citados como forma comparativa, a fim de facilitar o entendimento dos dados e o potencial gerador de biomassa de um restaurante universitário em pleno funcionamento em razão da geração média de resíduos orgânicos por refeição servida no restaurante.

Tabela 1– Comparativo da geração total de resíduos orgânicos em restaurantes universitários

Universidade	Resíduo Orgânico (Kg)	Refeições	Resíduo Orgânico (Kg) / Refeição
UEPB	450,77	4.000	0,1126
USP	268,6	2.000	0,1343
UFMT	1.195,8	9.696	0,1233
UTFPR-LD	68,92	335	0,1941

Fonte: Adaptado de Albertoni(2013), Costa et al. (2004), Menezes, Santos e Leme (2002) e Napolini et al. (2009)

Comparativamente com os dados da Tabela 1, o Restaurante Universitário do campus Londrina da UTFPR apresenta valores superiores de geração per capita de resíduos orgânicos, realidade que deve ser alterada ao longo do tempo, sendo reduzida para valores próximos da média dos Restaurantes Universitários já consolidados.

2.2 Biomassa

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado externo quanto no interno,

sendo considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (ANEEL, 2008, p. 65)

A biomassa pode ser definida como qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo) quanto da tecnologia de processamento (ANEEL, 2008, p. 67).

Há três fontes básicas da biomassa: vegetais não lenhosos, vegetais lenhosos e resíduos orgânicos. Sendo que o aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio de diversas formas, desde combustão direta, processos termoquímicos ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação). (CENBIO 2013),

2.3 Biogás

O biogás é um subproduto da biodigestão anaeróbia da matéria orgânica que compõe os dejetos animais, resíduos de vegetais, resíduos orgânicos, restos de abatedouros e frigoríficos. Em comparação a massa, o biogás representa de 4 a 7% da massa da matéria orgânica que é utilizada no processo que lhe dá origem. É constituído por uma mistura de gases, principalmente gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (OLIVEIRA, 2009, p. 8).

Inúmeros fatores interferem no processo de metabolismo anaeróbio das bactérias, Oliveira e Higashishi (2006, p.11) e Faria (2012, p. 14) destacam que as atividades metabólicas que ocorrem durante a operação de um biodigestor sofrem influência direta da temperatura, pH, concentrações de sólidos e composição do substrato a ser degradado.

A composição química do biogás sofre variações de acordo com o resíduo degradado, a Tabela 2 contém a composição básica do biogás produzido em biodigestores.

Tabela 2 – Composição do biogás

Componente	Concentração (por volume)
Metano (CH ₄)	40-75%
Dióxido de carbono (CO ₂)	25-40%
Ácido sulfídrico(H ₂ S)	0,1 – 0,5%
Amônia (NH ₃)	0,1 – 0,5%
Nitrogênio (N)	0,5 - 2,5%
Oxigênio (O ₂)	0,1 – 1%
Hidrogênio (H)	1 – 3%
Monóxido de carbono (CO)	0 – 0,1%

Fonte: Castanón (2002)

O processo de digestão anaeróbica, também referida como biometanização, é um processo natural que envolve a decomposição bioquímica dos complexos orgânicos através dos processos biológicos compreendidos em quatro fases: hidrólise, acidificação, metanogênese e sulfetogênese.

A Tabela 3 compara o volume de 1m³ de biogás (CNTP) com outras fontes energéticas.

Tabela 3 – Comparação entre biogás e outros combustíveis

Combustíveis	Equivalência à 1m³ de biogás
Gasolina	0,613 litros
Querosene	0,579 litros
Óleo diesel	0,553 litros
Gás de cozinha (GLP)	0,454 kg
Lenha	1,536 kg
Álcool hidratado	0,790 litros
Eletricidade	1,428 kWh

Fonte: Zilotti (2003)

2.3.1 Hidrólise e acidogênese

A hidrólise é fundamental para o início do processo de produção do biogás, uma vez que os microrganismos envolvidos no processo não são capazes de assimilar matéria orgânica particulada, sendo assim é necessário ocorrer a ação de exoenzimas secretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas, convertendo a matéria orgânica particulada em matéria orgânica dissolvida.

Os produtos originados da hidrólise são metabolizados de forma anaeróbia no interior celular dos microrganismos acidogênicos, que ao processarem açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, resultam em compostos mais simples como: ácidos orgânicos, álcoois, cetonas, dióxido de carbono e hidrogênio. Os produtos metabólicos oriundos da atividade das bactérias acidogênicas são importantes substratos para as bactérias acetogênicas e para as arqueas metanogênicas. (CHERNICHARO 1997, p.32-34)

2.3.2 Acetogênese

Os microrganismos responsáveis pela etapa de acetogênese são as bactérias sintróficas acetogênicas, que oxidam compostos orgânicos intermediários, como por exemplo o propionato e butirato, em compostos adequados para os microrganismos metanogênicos.

No entanto a produção de acetato é inibida em presença de altas concentrações de acetato e hidrogênio dissolvido no meio, sendo isso apenas possível com o consumo destes produtos pelos microrganismos consumidores. (CHERNICHARO 1997, p.34-35)

2.3.3 Metanogênese

A metanogênese corresponde ao processo final da conversão anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, sendo realizada pelos microrganismos metanogênicos.

As arqueas metanogênicas consomem um limitado número de substratos, sendo estes: ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Estes microrganismos são vitais em ambientes anaeróbios, por remover o excesso de hidrogênio e os produtos da fermentação, que são produzidos nas fases anteriores. (CHERNICHARO 1997, p.35-36)

2.3.4 Sulfetogênese

A produção de sulfetos ocorre a partir da ação de bactérias anaeróbias estritas ou bactérias sulforedutoras, que reduzem sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados. No processo de digestão anaeróbia, o metabolismo desses microrganismos é importante devido o produto final, sulfeto de hidrogênio.

A presença de sulfato no meio faz com que muitos compostos intermediários sejam utilizados pelas bactérias sulforedutoras, promovendo uma competição com as bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas. (CHERNICHARO 1997, p.39)

2.3.5 Características que influenciam na produção do biogás

Alterações bruscas do pH podem comprometer a atuação das bactérias inseridas no processo, sendo o ponto ótimo situado na faixa neutra com pH próximo a 7,0. A neutralidade do pH é natural do processo de produção do biogás, indicando condições normais de operação do biodigestor.

As bactérias possuem diferentes faixas de temperatura ideal para a manutenção do seu metabolismo, sendo assim, faz-se necessário identificar o grupo desejado de bactérias (termofílicas, mesofílicas ou psicofílicas) que se pretende utilizar no biodigestor e regular a temperatura a fim de se manter a faixa ótima para esses microrganismos. A Tabela 4 contém os valores de temperatura para cada classe de bactérias.

Tabela 4 – Faixa de temperatura para crescimento de bactérias

Classificação	Faixa	Ótima
Termófilos	25-80°C	50-60°C
Mesófilos	10-45°C	20-40°C
Psicrófilos	5-30°C	10-20°C

Fonte: Araújo et al (2010)

O tempo de retenção é outro fator que pode variar conforme o resíduo orgânico utilizado no reator. Em média o processo ocorre entre 30 e 45 dias, no entanto em algumas situações é possível observar a produção do biogás na primeira semana de retenção hidráulica, mesmo que em proporções reduzidas.

De acordo com a capacidade produtiva de cada reator em operação, é possível a utilização do biogás produzido como forma de substituir fontes de energia utilizadas *in loco* que demandam custos, sendo assim uma forma de reduzir o impacto de destinação do resíduo, tendo aproveitamento energético e redução de gastos com energia.

2.4 Biodigestores

Os reatores são elementos capazes de prover ambientes adequados e propícios à produção do biogás. Um biodigestor ou biorreator pode ser definido segundo Neves (2010, p. 14) como uma câmara de fermentação hermeticamente fechada construído de alvenaria, concreto ou outros materiais, onde a biomassa é degradada a partir da digestão pelas bactérias anaeróbicas, produzindo biogás como subproduto final.

Os biodigestores podem ser do tipo batelada ou contínuo. Os reatores que operam no sistema batelada recebem o resíduo, sem injeção de ar no reator, para que seja realizada a fermentação anaeróbica. O biogás produzido é armazenado no interior do próprio biodigestor ou em um gasômetro acoplado ao sistema. Ao término da produção do biogás, o digestor é aberto e limpo, recebendo uma nova quantidade de substrato para que o processo seja reiniciado (COMASTRI FILHO, 1981)

Os reatores do tipo fluxo contínuo, como os reatores de tecnologia consolidada dos modelos chinês e indiano, recebem resíduos orgânicos continuamente e, por esse motivo, o isolamento hermético do sistema não é realizado. Nesse sistema, a produção do biogás e do lodo ocorre de forma contínua, por isso indica-se que o resíduo seja de fácil degradação e com disponibilidade suficientemente constante de forma a não provocar a interrupção do sistema (COMASTRI FILHO, 1981).

3 METODOLOGIA

3.1 Local de estudo

Este estudo foi realizado na UTFPR campus Londrina localizado nas coordenadas 23°18'25.93"S e 51° 6'57.70"O. O trabalho ocorreu no período de 18/11/2013 à 10/02/2014 junto ao Restaurante Universitário (vide Figura 1) com capacidade máxima para 250 pessoas simultâneas e atendimento no almoço e jantar de segunda à sábado.



Figura 1 – Restaurante Universitário, UTFPR – LD
Fonte: Próprio autor

As análises físico químicas dos resíduos orgânicos e dos efluentes sintético e sanitário foram executadas no Laboratório de Saneamento locado no Bloco S e no Laboratório de Energia locado no Bloco B da Universidade.

3.2 A pesquisa

Para a realização desse estudo utilizou-se dois tipos de pesquisa, a descritiva bibliográfica e a experimental. Na pesquisa descritiva bibliográfica realizou-se um levantamento bibliográfico a partir de trabalhos publicados, visitas à bibliotecas virtuais e presenciais com o objetivo de realizar uma busca por dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos científicos relacionados ao tema pesquisado neste projeto. A pesquisa experimental deu-se em um segundo momento com a finalidade de obter dados práticos a partir da elaboração, dimensionamento e montagem de modelo em escala reduzida de reator anaeróbio utilizado para a produção de biogás.

Três diferentes montagens foram realizadas no decorrer do trabalho, compreendendo portanto três fases de amostragem e coleta de dados, denominadas como Fase 1, Fase 2 e Fase 3, executadas cronologicamente nessa respectiva ordem.

3.3 Análises

A fim de definir a melhor metodologia para as análises físico-químicas das amostras adquiridas ao longo do experimento, é necessário diferenciar as amostras entre resíduo sólido ou resíduo líquido devido a particularidades de cada classe em relação às análises.

Os resíduos de alimentos quando analisados individualmente foram caracterizados como resíduos sólidos. Já as amostras que continham algum efluente ou eram liquefeitas, como exemplo após o período de digestão, foram tratadas como resíduo líquido.

Os equipamentos utilizados para as análises foram:

- pHmetro – modelo mPA-210;
- Condutivímetro elétrico – modelo mCA 150;
- Balança analítica – modelo Q-500L210C;
- Bomba de vácuo; fabricante Exipump, 1/4hp e vácuo máx. de 800mbar;

- Papel filtro de fibra de vidro 4,7cm – Distribuidora Hexis;
- Estufa – fabricante Nova Ética;
- Forno Mufla – modelo MA-385;
- Sensor de temperatura e umidade – modelo HOBO U23.

Desta forma, foram realizadas as análises: pH, condutividade elétrica, alcalinidade, sólidos totais, sólidos voláteis, sólidos fixos, sólidos suspensos e análise qualitativa e quantitativa do biogás.

3.1.1 pH

Standard (2012) indica que a análise de pH deve ser realizada sempre após a calibração do equipamento, segundo as orientações de cada fabricante, devendo-se atentar para o nível de precisão obtida durante esse procedimento. Cuidados específicos para com o eletrodo durante a manipulação e o período de armazenamento entre as análises também devem ser tomados. Com o objetivo de corrigir a leitura do pHmetro em relação à temperatura, utilizou-se o dispositivo de compensação de temperatura em conjunto com o eletrodo de vidro.

As análises de pH do meio foram realizadas no início e no final de cada fase do experimento, para resíduos líquidos utilizou-se o método 4500-H+ B de Standard (2012) e para a análise dos resíduos sólidos a metodologia foi baseada nos procedimentos de aferição de pH em solos de Donagema et al (2011).

A metodologia adotada para a análise dos alimentos foi realizada com uma solução salina de cloreto de cálcio (CaCl_2) $0,01\text{mol.L}^{-1}$. Uma amostra de 10 gramas de resíduo foi adicionada em 100 ml da solução salina com agitação por 30 minutos e posterior filtração para leitura do pH.

3.1.2 Condutividade elétrica

A análise da condutividade elétrica foi realizada por leitura direta com condutivímetro, sendo que as preparações das amostras seguiram os mesmos procedimentos para a leitura de pH descritas no item 3.1.1.

3.1.3 Alcalinidade

Para a aferição da alcalinidade do meio, a metodologia adotada foi baseada no método 2320 B. de Standard (2012) para titulação com solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) $0,01\text{mol.L}^{-1}$, sendo esse aplicado às amostras com volume de 30 ml. A alcalinidade total expressa em mg.L^{-1} de $CaCO_3$ é obtida a partir da equação 1:

$$\text{Alcalinidade total (mg.L}^{-1}\text{CaCO}_3) = \frac{M_{H_2SO_4} \cdot V_{H_2SO_4}}{\text{Volume}_{amostra}} \cdot MM_{CaCO_3} \quad (1)$$

Onde:

$$M_{H_2SO_4} = 0,01 \text{ mol.L}^{-1};$$

$$V_{H_2SO_4} = \text{volume de ácido utilizado na titulação (ml)};$$

$$\text{Volume}_{amostra} = 30 \text{ ml};$$

$$MM_{CaCO_3} = 100.000 \text{ mg.mol}^{-1}.$$

3.1.4 Sólidos totais

Segundo a metodologia exposta por Standard (2012) 2540 B, para a determinação dos sólidos totais em efluentes, deve-se utilizar uma estufa para promover a evaporação da água, sob uma temperatura de $103\text{-}105^\circ\text{C}$.

Para a determinação de sólidos totais de resíduos sólidos, indica-se a secagem em estufa sob temperatura de 65°C pela presença de compostos voláteis

nitrogenados, o que pode ocasionar perdas de massa não correspondentes apenas à evaporação da água.

Para todas as amostras foram adotadas o tempo mínimo de 24 horas de permanência em estufa para secagem, sendo que para as amostras definidas como resíduos sólidos o tempo mínimo utilizado foi de 48 horas. O cálculo do teor de sólidos totais são determinados a partir da equação 2.

$$ST(\text{mg.L}^{-1}) = [(A-B) \times 1000] / \text{volume da amostra (mL)} \quad (2)$$

onde: ST (Sólidos Totais)

A (peso do resíduo seco + recipiente) (mg)

B (peso do recipiente) (mg)

3.1.5 Sólidos voláteis

Para a determinação dos sólidos voláteis segundo Standard (2012) 2540 E, deve-se utilizar a mufla onde a amostra escolhida para a determinação dos sólidos totais deve ser mantida por uma hora após o equipamento atingir a temperatura de 550°C. A massa da amostra deverá ser aferida em balança de precisão para fim de se obter a massa de cinzas. O teor de sólidos voláteis é obtido a partir da equação 3.

$$SV(\text{mg.L}^{-1}) = [(A-B) \times 1000] / \text{volume da amostra (mL)} \quad (3)$$

onde: SV (Sólidos Voláteis)

A (peso do resíduo seco + amostra) (mg)

B (peso do recipiente + cinzas) (mg)

3.1.6 Sólidos fixos

Os sólidos fixos correspondem ao resíduo total (cinzas) que resta após a calcinação em mufla à temperatura de 550°C pelo período de uma hora. Sendo obtido pela equação 4:

$$SF(\text{mg.L}^{-1}) = [(A-B) \times 1000] / \text{volume da amostra (mL)} \quad (4)$$

onde: SF (Sólidos Fixos)

A (peso do recipiente + cinzas) (mg)

B (peso do recipiente) (mg)

3.1.7 Sólidos suspensos

Segundo a metodologia exposta por Standard (2012) 2540 D, para a determinação dos sólidos suspensos em efluentes, é necessário realizar um pré-preparo da membrana filtro de fibra de vidro. O tamanho da amostra deve ser determinado para que a amostra deposite sobre o filtro entre 2,5 e 200mg de resíduo seco e não ultrapasse o tempo total de 10 para a filtração completa.

Após a filtração, a amostra deve ser seca em estufa por pelo menos uma hora sob temperatura de 103°C à 105°C para aferição dos sólidos suspensos totais. Para análise dos sólidos suspensos voláteis e fixos, os filtros devem permanecer por 15 minutos à 550°C na mufla. O cálculo para obtenção dos sólidos suspensos totais está disposto pela equação 5:

$$SST(\text{mg.L}^{-1}) = [(A-B) \times 1000] / \text{volume da amostra (mL)} \quad (5)$$

onde: SST (Sólidos Suspensos Totais)

A (peso do filtro + resíduo) (mg)

B (peso do filtro) (mg)

3.1.8 Análise do biogás

Para a análise do biogás produzido, utilizou-se a técnica de identificação volumétrica do metano pelo método de deslocamento de volume. A montagem do sistema foi baseada na apostila de Foresti et al. (2005) que tem por princípio o uso da solução de hidróxido de sódio (NaOH) 50 g.L⁻¹ para captura do dióxido de carbono (CO₂) e do gás sulfídrico (H₂S).

O sistema conta com duas garrafas de Mariotte, uma contendo a solução de NaOH e a outra contendo água e um recipiente graduado para aferição do volume de água deslocado pelo gás metano (CH₄). O esquema utilizado foi montado conforme a Figura 2 a seguir.

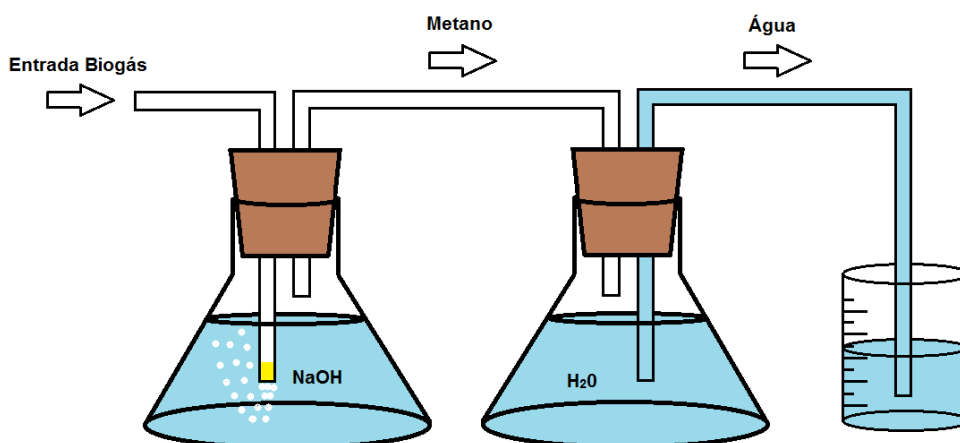
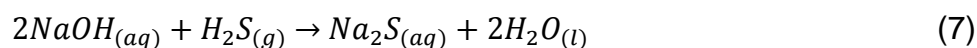
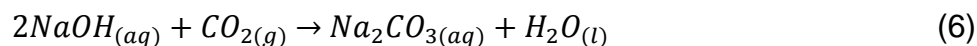


Figura 2 – Conjunto para a análise do metano produzido
Fonte: Próprio autor

O funcionamento consiste no borbulhamento do biogás na solução de hidróxido de sódio 50g.L⁻¹, a fim de absorver o CO₂ e o H₂S, convertendo os gases em carbonato de sódio e sulfeto de sódio respectivamente. As equações 6 e 7 ilustram as reações.



O metano é então transferido para a segunda garrafa de Mariotte, que é então pressurizada pelo gás e desloca o volume de líquido para o recipiente graduado. Assim, o volume de água deslocado corresponderá ao volume de metano (CH₄) produzido no reator.

Com o objetivo de assegurar que o borbulhamento ocorresse de forma mais eficiente, garantindo a reação química entre o biogás e a solução de NaOH, adicionou-se no final da tubulação de entrada do biogás um pedaço de esponja, com a função de criar microbolhas, aumentando assim o tempo de residência das bolhas na solução, conforme sugestão do Professor Dr. Alexei Novaes Lorenzetti.

Os erros embutidos nesse modelo de análise química do biogás devem ser levados em consideração na aferição dos resultados. Os valores obtidos não devem ser tratados como valores absolutos, sendo este um método de estimativa da composição química do gás de entrada.

3.4 Resíduos sólidos orgânicos

A fonte do resíduo orgânico utilizado nesse projeto foi o Restaurante Universitário da UTFPR – campus Londrina, as amostras foram coletadas após as refeições, principalmente após o almoço, devido ao maior volume de resíduos gerados nesse período. As amostras foram armazenadas em temperatura de -20°C até serem processadas para a inoculação do sistema.

No momento da inoculação foram separados os ossos e triturados os resíduos com o auxílio de liquidificadores até a obtenção de um material pastoso com características visuais homogêneas. A Figura 3 ilustra as amostras que foram utilizadas nos ensaios antes de serem trituradas.



Figura 3 – Amostras dos alimentos antes do processamento.
Fonte: Próprio autor

3.4.1 Fase 1

A primeira amostra do resíduo orgânico foi obtida a partir da coleta realizada em dias diferentes na mesma semana, obtendo-se uma amostra composta. A caracterização visual qualitativa da amostra está descrita na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização qualitativa da amostra composta para a Fase 1

Amostra Fase 1	
Arroz	Vegetais
Feijão	Cebola
Peito de frango	Repolho
Bisteca de porco	Tomate
Cenoura	

Fonte: Próprio autor

3.4.2 Fase 2

Para a segunda fase de coleta, repetiu-se o procedimento de coleta do resíduo orgânico efetuado na Fase 1. A Tabela 6 contém a caracterização visual qualitativa da amostra composta obtida para a Fase 2.

Tabela 6 – Caracterização qualitativa da amostra composta para a Fase 2

Amostra Fase 2	
Arroz	Repolho
Feijão	Carne moída
Tutu de feijão	Cebola
Linguiça	Brócolis
Vegetais	Peito de frango
Banana	Cenoura
Beterraba	Milho
Pimentão	Bisteca de porco

Fonte: Próprio autor

3.4.3 Fase 3

A amostragem do resíduo orgânico para a Fase 3 foi obtida a partir da coleta em três dias diferentes na mesma semana, obtendo-se uma amostra composta. A Tabela 7 a seguir ilustra a caracterização qualitativa dos constituintes da amostra.

Tabela 7– Caracterização qualitativa das amostras coletadas

Amostra Fase 3	
Arroz	Chuchu
Feijão	Cebola
Frango	Tomate
Bisteca suína	Repolho roxo
Carne bovina	Bagaço e casca de laranja
Vegetais	Cenoura

Fonte: Próprio autor

3.5 Efluentes

3.5.1 Esgoto sintético

Para o segundo ensaio, foi determinado a realização de mistura do resíduo orgânico com esgoto. Para isso o esgoto sintético foi preparado baseado nos ingredientes utilizados por Callado (2000), descritos na Tabela 8.

Tabela 8– Composição do esgoto sanitário sintético

Composto	% da DQO	Fonte	Concentração para DQO de 500 mg.L ⁻¹	Concentração para DQO de 800 mg.L ⁻¹
Proteínas	50%	Extrato de carne, 50%	1,15mL.L ⁻¹	1,87 mL.L ⁻¹
	40%	Sacarose, 20%	36,0 mg.L ⁻¹	57,6 mg.L ⁻¹
Carboidratos	40%	Amido Comercial, 60%	112,0 mg.L ⁻¹	179,2 mg.L ⁻¹
	40%	Celulose, 20%	41,0 mg.L ⁻¹	65.5 mg.L ⁻¹
Lipídios	10%	Óleo de soja, 10% (emulsionado com 3 gotas de detergente/L)	0,056 mL.L ⁻¹	0,09 mL.L ⁻¹
Lipídios	10%	Solução de CaCl ₂ . 2H ₂ O com 0,9 g/L	5mL.L ⁻¹	5mL.L ⁻¹
		Solução de MgCl ₂ . 6H ₂ O com 1,4 g/L	5mL.L ⁻¹	5mL.L ⁻¹

Fonte: Callado (2000)

3.5.2 Esgoto bruto

Para a Fase 3 do experimento, utilizou-se o esgoto bruto coletado na ETE do SAMAE da cidade de Ibiporã – Pr, o ponto de coleta se deu logo após a operação de gradeamento, garantindo um efluente fresco e com menor exposição à degradação biológica.

3.6 Reatores e gasômetros

Para a recepção dos resíduos orgânicos e/ou esgoto para o processo de biodigestão em sistema de batelada, foram construídos três reatores tubulares hermeticamente fechados em PVC com 50 mm de diâmetro e 50 cm de altura, garantindo um volume total disponível de 0,982 litro.

Para o armazenamento e medição do gás produzido a partir da fermentação, utilizou-se um gasômetro de cúpula móvel de PVC com 75 mm de diâmetro e 50 cm de altura, comportando um volume total de 2,209 litros. O volume de biogás produzido foi aferido periodicamente através da variação vertical da cúpula do gasômetro em relação ao nível da água.

Uma caixa d'água com capacidade de 500 litros modelo Fortlev foi utilizada para acondicionar os gasômetros de cúpula móvel. Tubos de PVC de 100mm foram utilizados como guias para o deslocamento vertical dos gasômetros, atuando como camisas em um sistema pistão. A Figura 4 ilustra a montagem completa do projeto.

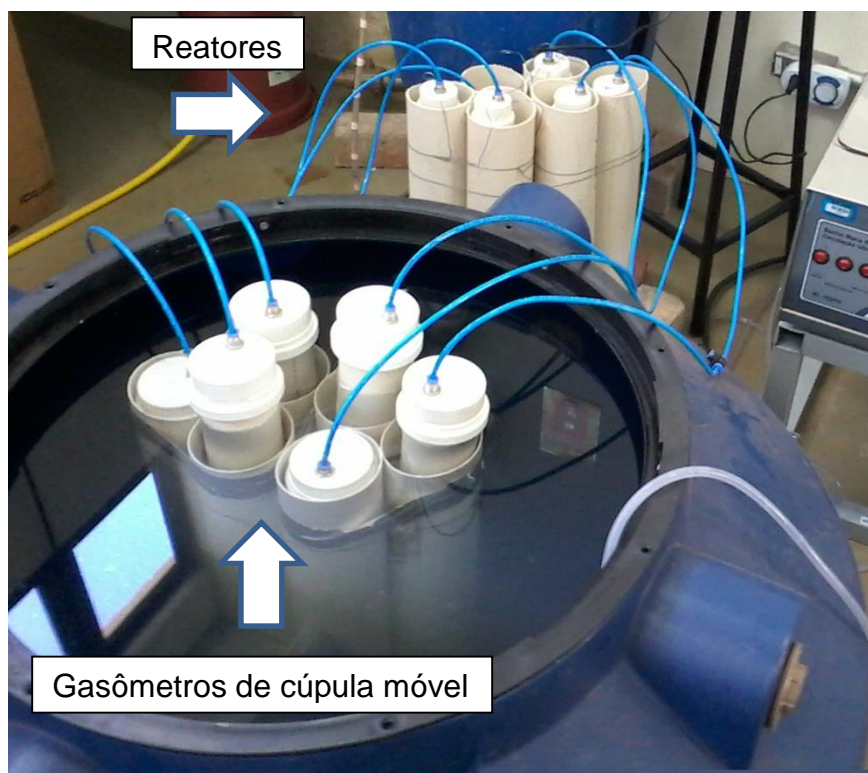


Figura 4 – Montagem completa do projeto
Fonte: Próprio Autor

A comunicação entre os reatores e os gasômetros foi possível mediante conectores de engate rápido e mangueiras de alta pressão. O modelo construído é baseado no estudo realizado por Suzuki (2012), a Figura 5 ilustra esse esquema de reatores e gasômetros.

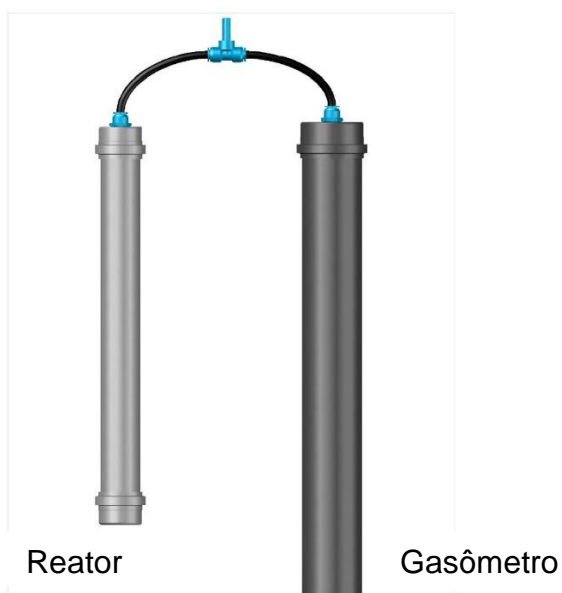


Figura 5: Reator e gasômetro em PVC
Fonte: Próprio autor

3.7 Montagem

3.7.1 Fase 1

A montagem do sistema foi realizado em 3 reatores, sendo uma triplicata contendo 13 cm de altura preenchida nos reatores. A Tabela 9 a seguir resume a montagem do sistema.

Tabela 9 – Constituintes nos reatores Fase 1

Reator	Volume de amostra	Constituinte
1	255,25 ml	Comida
2	255,25 ml	Comida
3	255,25 ml	Comida

Fonte: Próprio autor

3.7.2 Fase 2

A montagem do sistema foi realizado em 3 reatores, sendo uma duplicada contendo 500 ml de mistura esgoto sintético + comida. E um reator contendo apenas 500 ml do esgoto sintético. A escolha de manter um reator com esgoto sintético provém da necessidade de se saber quanto cada resíduo (comida e esgoto) interfere na produção do biogás.

Analisando os resultados de Costa et al. (2004), Menezes, Santos e Leme (2002) e Napolini et al. (2009), tem-se que a geração de resíduos nos Restaurantes Universitários variam na faixa de 0,120 Kg/pessoa.refeição e a geração de esgoto em Universidades atinge 10 Litros/pessoa.dia. A relação esgoto/resíduo sólido orgânico é portanto, da ordem de 1%. A fim de atingir uma melhor produtividade por volume de mistura, adotou-se uma relação de 10%, realizando a mistura na proporção de 0,100 Kg de resíduo orgânico a cada 1 litro de esgoto. A Tabela 10 a seguir ilustra a montagem do sistema.

Tabela 10– Constituintes nos reatores Fase 2

Reator	Volume de amostra	Constituinte
1	500ml	Esgoto sintético
2	500ml	Esgoto sintético + comida
3	500ml	Esgoto sintético + comida

Fonte: Próprio autor

3.7.3 Fase 3

A montagem do sistema foi realizado em 3 reatores, sendo uma duplicada contendo 500 ml de mistura esgoto bruto + comida + carbonato, e um reator contendo apenas 500ml da mistura esgoto + comida sem o carbonato. A razão de mistura seguiu a metodologia adotada na Fase 2, mantendo a proporção de 10% entre o volume de esgoto e a massa de resíduo de comida.

A inserção do carbonato em concentração de 0,5g.CaCO₃.L⁻¹ teve por objetivo aumentar a alcalinidade do meio, de modo a buscar impedir quedas bruscas

de pH devido a etapa de acidogênese que ocorre no início do processo de digestão, que possa vir a inviabilizar o metabolismo metanogênico e consequentemente a produção do biogás. A Tabela 11 resume a montagem do sistema.

Tabela 11– Constituintes nos reatores Fase 3

Reator	Volume de amostra	Carbonato (0,5g.L ⁻¹)
1	500ml	Sim
2	500ml	Não
3	500ml	Sim

Fonte: Próprio autor

3.8 Estimativa para tempo de retorno do investimento

O cálculo para a estimativa do tempo de retorno do investimento em equipamentos de uma planta para biodigestão em escala real foi baseado nos produtos comercializados pela empresa BGS Equipamentos para Biogás e nas produtividades de volume de biogás com relação a massa de sólidos voláteis inseridos no reator. A Tabela 12 contém os dados e parâmetros utilizados para o dimensionamento.

Tabela 12 – Parâmetros para o dimensionamento e cálculo do tempo de retorno

Parâmetros	Valores	Fonte
Mistura alimento / efluente bruto	0,1kg.L ⁻¹	Próprio autor (adotado)
Geração de resíduo orgânico	70kg.dia ⁻¹	Albertoni (2013)
Massa específica do resíduo orgânico	1,1kg.L ⁻¹	Próprio autor (experimental)
Relação energética biogás e GLP	1m ³ (biogás) \cong 0,454kg(GLP)	Brasil (2007)
SV Esgoto bruto + comida	16,017g.L ⁻¹	Próprio autor (experimental)
Produtividade biogás/SV iniciais	400mL.g ⁻¹ SV	Kubaská <i>et al</i> (2010)
Produtividade biogás/SV iniciais	32,5mL.g ⁻¹ SV	Próprio autor (ensaio 2)
Produtividade biogás/SV iniciais	16,96mL.g ⁻¹ SV	Próprio autor (ensaio 3)
Tempo de detenção (TD)	25dias	Próprio autor (ensaio 3)
Consumo de GLP	90kg.semana ⁻¹	RU UTFPR-LD
Custo do GLP	3,46R\$.kg ⁻¹	
Custo para destinação resíduo orgânico via compostagem	0,10R\$.kg ⁻¹	

Fonte: Próprio autor (adaptado)

O volume do biodigestor é diretamente proporcional à geração de resíduos orgânicos, à taxa de mistura com esgoto bruto e ao tempo de retenção hidráulica. A equação 6 corresponde ao volume de esgoto bruto (V_{EB}) que deverá ser adicionado diariamente ao reator.

$$V_{EB}[70kg.dia^{-1} (resíduo orgânico)] = 700L.dia^{-1} (esgoto bruto) \quad (6)$$

O volume da fração dos resíduos orgânicos a serem inseridos diariamente é calculado com base na massa específica da amostra triturada. A equação 7 explicita essa relação.

$$V_{RO} = 70kg.dia^{-1}/1,1kg.L^{-1} = 63,64L.dia^{-1}(resíduo orgânico) \quad (7)$$

O volume total necessário para o reator é calculado a partir da equação 8 e corresponde ao somatório das contribuições diárias de resíduo orgânico (V_{RO}) e efluente bruto (V_{EB}) associado com o tempo de retenção hidráulico (TD).

$$Volume_{Total} = (V_{EB} + V_{RO}) . TD = (700 + 63,64) . 25 = 19.090,91L \quad (8)$$

O reator ou a soma do conjunto de reatores deverá possuir no mínimo o volume útil de 19.090,91L para promover a digestão dos resíduos orgânicos produzidos durante um mês.

A estimativa de produtividade do biodigestor é obtida das taxas de produção de biogás, usualmente utiliza-se a taxa de volume de biogás produzido relacionado à massa de sólidos voláteis inseridos no reator. As taxas de produtividade dos ensaios 2 e 3 foram escolhidas com base no reator que obteve a maior produção de biogás nesses ensaios.

A massa de sólidos voláteis inseridos diariamente no sistema provém da quantidade de sólidos voláteis contidos na mistura de esgoto bruto e comida e do volume de mistura adicionados no reator. O cálculo da massa de sólidos totais (M_{SV}) é apresentado pela equação 9.

$$M_{SV} = 16,017 . 763,64 = 12.231,22g.dia^{-1} \quad (9)$$

A produção diária estimada de biogás no reator após atingir regime estacionário provém da relação entre a produtividade por carga de sólidos voláteis adicionados (M_{SV}) e a taxa de produção do biogás por massa de sólidos voláteis adicionados (P_{BSV}) no reator, apresentados na equação 10.

$$Produção_{Biogás} = M_{SV} \cdot P_{BSV} / 1000 \quad (10)$$

Referência:

$$Produção_{Biogás} = 12.231,22 \cdot 400 / 1000 = 4.892,49 L. dia^{-1} \quad (11)$$

Ensaio 2:

$$Produção_{Biogás} = 12.231,22 \cdot 32,5 / 1000 = 397,52 L. dia^{-1} \quad (12)$$

Ensaio 3:

$$Produção_{Biogás} = 12.231,22 \cdot 16,96 / 1000 = 207,44 L. dia^{-1} \quad (13)$$

Com base na relação energética entre o biogás e o GLP e o consumo de gás informado pela Empresa responsável em administrar o Restaurante Universitário, a representatividade em % de GLP que poderá ser economizado conforme cada ensaio é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – GLP equivalente produzido

Fonte	Produção Estimada _{Biogás}	Produção Equivalente _{GLP}	Consumo _{GLP}	% do consumo
Referência	4.892,49 L.dia ⁻¹	2,221 kg.dia ⁻¹	18 kg.dia ⁻¹	12,34%
Próprio autor (ensaio 2)	397,52 L.dia ⁻¹	0,180 kg.dia ⁻¹	18 kg.dia ⁻¹	1,00%
Próprio autor (ensaio 3)	207,44 L.dia ⁻¹	0,094 kg.dia ⁻¹	18 kg.dia ⁻¹	0,52%

Fonte: Próprio autor

A economia devido uso do biogás que poderá ser proporcionada ao Restaurante Universitário em substituição parcial do GLP pelo biogás é apresentado

na Tabela 14 com base no percentual de GLP a ser economizado e o preço atual do GLP.

Tabela 14 – Economia de GLP

Fonte	Produção Equivalente _{GLP}	Economia de GLP	Custo _{GLP}	Economia
Referência	2,221 kg.dia ⁻¹	12,34%	R\$3,46.kg ⁻¹	R\$7,68.dia ⁻¹
Próprio autor (ensaio 2)	0,180 kg.dia ⁻¹	1,00%	R\$3,46.kg ⁻¹	R\$0,62.dia ⁻¹
Próprio autor (ensaio 3)	0,094 kg.dia ⁻¹	0,52%	R\$3,46.kg ⁻¹	R\$0,33.dia ⁻¹

Fonte: Próprio autor

Em Londrina-PR, o decreto municipal nº 769 de 2009 (LONDRINA, 2009) traz as definições, nos incisos IV e V do artigo 3, de Gerador doméstico ou Pequeno gerador e Gerador comercial ou Grande gerador. Sendo o Gerador comercial ou Grande gerador inteiramente responsável pelos resíduos orgânicos e rejeitos que venha a gerar, sendo responsável por quaisquer problemas decorrentes na segregação, coleta/transporte, compostagem e destinação final adequada.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010) estabelece entre suas definições a não geração de resíduos, seguida da redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos bem como a adoção da compostagem para destinação dos resíduos orgânicos.

Comercialmente a destinação para compostagem de resíduos orgânicos custa em média R\$100.ton⁻¹. O uso do tratamento anaeróbio dos resíduos orgânicos dispensa a necessidade da compostagem, proporcionando uma economia de R\$7,00.dia⁻¹ para a geração média de 70kg.dia⁻¹ de resíduo orgânico.

Baseado na sugestão da empresa BGS Equipamentos para a montagem do módulo ideal de biodigestão para biogás, os equipamentos e quantidades foram determinados com base nos resultados de produtividade obtidos por Kubaská *et al.* (2010) e nos resultados obtidos neste trabalho provenientes dos ensaios correspondentes às Fases 2 e 3. As Tabelas 15, 16 e 17 resumem a composição de cada modulo idealizado.

Tabela 15 – Listagem de equipamentos baseada na produtividade de Kubaská *et al* (2010)

Equipamento	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (RS)
Triturador de pia 0,70hp ⁽²⁾	2	2.550,00	5.100,00
Biodigestor 10m ³ BGS ⁽¹⁾	2	5.500,00	11.000,00
Balão 10m ³ BGS ⁽¹⁾	1	4.375,00	4.375,00
Medidor vazão BGS ⁽¹⁾	1	284,00	284,00
Compressor 15w BGS ⁽¹⁾	2	466,00	932,00
		Total	21.961,00

Fonte: BGS Equipamentos⁽¹⁾ e C&C Casa e Construção Ltda⁽²⁾

Tabela 16 – Listagem de equipamentos baseada no ensaio 2

Equipamento	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (RS)
Triturador de pia 0,70hp ⁽²⁾	2	2.550,00	5.100,00
Biodigestor 10m ³ BGS ⁽¹⁾	2	5.500,00	11.000,00
Balão 2m ³ BGS ⁽¹⁾	1	1.315,00	1.315,00
Medidor vazão BGS ⁽¹⁾	1	284,00	284,00
Compressor 15w BGS ⁽¹⁾	2	466,00	932,00
		Total	18.631,00

Fonte: BGS Equipamentos⁽¹⁾ e C&C Casa e Construção Ltda⁽²⁾

Tabela 17 – Listagem de equipamentos baseada no ensaio 3

Equipamento	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (RS)
Triturador de pia 0,70hp ⁽²⁾	2	2.550,00	5.100,00
Biodigestor 10m ³ BGS ⁽¹⁾	2	5.500,00	11.000,00
Balão 1m ³ BGS ⁽¹⁾	1	860,00	860,00
Medidor vazão BGS ⁽¹⁾	1	284,00	284,00
Compressor 15w BGS ⁽¹⁾	2	466,00	932,00
		Total	18.176,00

Fonte: BGS Equipamentos⁽¹⁾ e C&C Casa e Construção Ltda⁽²⁾

O tempo de retorno do investimento demonstrado nas Tabelas 15, 16 e 17, é calculado a partir da equação 14 com base nas economias diárias em GLP e destinação de resíduos orgânicos e ano letivo com 200 dias úteis de refeições.

$$Investimento = (Receita_{anual}) * \left[\frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^{n*i}} \right] \quad (14)$$

Onde:

i = taxa de juros (6% a.a.);

n = Tempo de retorno do investimento em anos.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos deste trabalho são provenientes de três ensaios com resíduos de alimentos e efluentes líquidos. Estes ensaios foram realizados ao longo do tempo de forma sequencial visando obter resultados mais eficientes na geração de biogás.

Os ensaios foram: Ensaio 1 (Fase 1) – utilização de resíduos sólidos como biomassa; Ensaio 2 (Fase 2) – utilização de resíduos sólidos com efluente sintético como biomassa; Ensaio 3 (Fase 3) – utilização de resíduos sólidos com efluente sanitário de ETE do SAMAE de Ibiporã.

4.1 Fase 1

4.1.1 Produção de biogás

Durante a Fase 1, a produção do biogás ocorreu durante três dias, compreendendo o período de 27/11/2013 à 29/11/2013. A paralização da produção foi confirmada durante os dias posteriores com a redução significativa do volume dos gasômetros. O gráfico 1 ilustra o comportamento dos três reatores durante a produção.

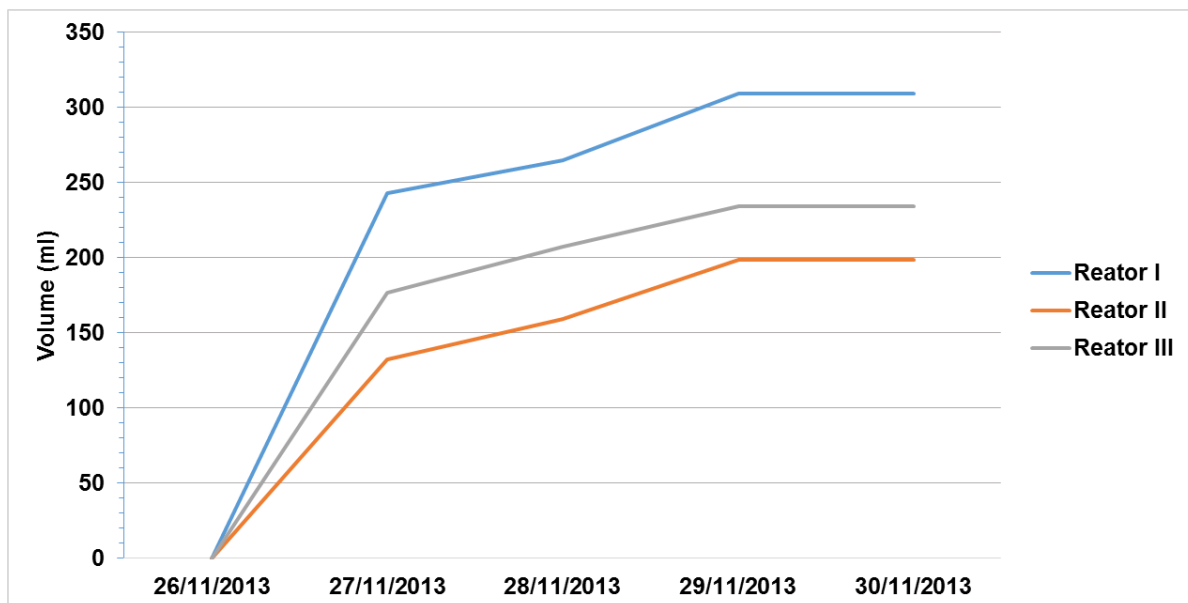


Gráfico 1 – Volume acumulado de biogás produzido na Fase 1

Fonte: Próprio autor

A produção total durante os três dias de operação dos Reatores 1, 2 e 3 foi respectivamente de 309,25mL, 198,80mL e 234,15mL.

Identifica-se duas fases de produção compartilhada entre os reatores. A primeira taxa ocorreu no período de 26/11 à 27/11 e foi de 242,98mL.dia⁻¹ para o Reator 1, 132,53mL.dia⁻¹ para o Reator 2 e 176,72mL.dia⁻¹ para o Reator 3; com média de 184,08mL.dia⁻¹ e desvio padrão de 55,59mL.dia⁻¹.

A segunda taxa ocorreu entre os dias 27/11 e 29/11 e foi de 33,13mL.dia⁻¹ para o Reator 1, 33,13mL.dia⁻¹ para o Reator 2 e 28,72mL.dia⁻¹ para o Reator 3; com média de 31,66mL.dia⁻¹ e desvio padrão de 2,55mL.dia⁻¹.

A partir do dia 29/11 ocorreu a interrupção da produção de biogás, sem continuidade no decorrer dos dias posteriores. A parada do sistema ocorreu devido a produção de ácidos voláteis em excesso decorrente do metabolismo das bactérias acidogênicas, ocasionando o decaimento do pH no meio.

A digestão anaeróbia necessita de um pH estável na faixa de 6,5 a 7,5 que pode ser mantido pela relação ácido carbônico/carbonato em uma situação de tamponamento, a partir do momento que esta estabilidade é rompida não havendo mais alcalinidade disponível, acarretará em acréscimo da concentração de ácidos voláteis e na redução do pH, que caracteriza uma instabilidade química no reator anaeróbio (PEREIRA-RAMIREZ et al 2004; ZILOTTI 2012).

4.1.2 Análises laboratoriais

Para as análises laboratoriais utilizou-se duas amostras, a primeira corresponde a pré inoculação e a segunda corresponde a mistura da amostra dos três reatores após o término da produção de biogás.

4.1.2.1 Condutividade elétrica e pH

Os resultados obtidos das análises de pH e condutividade elétrica a partir da metodologia citada no presente trabalho, estão dispostos na Tabela 18.

Tabela 18 – Condutividade elétrica e pH Fase 1

Amostra	Condutividade	pH
1 – Inicial	3,89 mS/cma	4,60
2 – Final	3,68 mS/cma	3,55

Fonte: Próprio autor

O ensaio 1 foi iniciado fora da faixa ideal de pH para a digestão, sendo iniciada em um ambiente muito ácido para os microrganismos metanogênicos. A análise do pH posterior à interrupção da produção do biogás evidencia a queda brusca que ocorreu ao longo do período de quatro dias do ensaio e embasa as inferências realizadas com relação a produção e acúmulo dos ácidos voláteis na fase acidogênica.

4.1.2.2 Sólidos totais, Voláteis e Fixos

A análise de sólidos é uma das mais importantes a serem realizadas durante os ensaios, pois o rendimento do biogás pode ser associado à quantidade de biogás produzido por unidade de sólidos voláteis contidos na matéria-prima submetida a

uma digestão anaeróbica por um período suficiente de tempo e sob uma dada temperatura (KUBASKÁ *et al*, 2010).

Os resultados provenientes do ensaio 1 da análise dos sólidos das amostras estão dispostos na Tabela 19.

Tabela 19 – Sólidos totais, voláteis e fixos Fase 1

Amostra	Sólidos totais (g/g)	Sólidos Voláteis (g/g)	Sólidos Fixos (g/g)
Inicial	24,00%	88,08%	11,92%
Final	27,84%	85,68%	14,32%

Fonte: Próprio autor

A porcentagem em massa dos sólidos totais nas amostras demonstram a grande quantidade de água presente nos resíduos de alimentos, estando na faixa de 75 a 70%. O aumento dos sólidos totais indicado na amostra final, pode estar vinculado à perda de água na forma de vapor d'água no interior do reator ao longo dos três dias.

Estando diretamente correlacionados com a produção do biogás, o baixo consumo dos sólidos voláteis indicado pela redução percentual dessa fração nas amostras final e inicial se mostra condizente com o pouco tempo de degradação biológica no reator e o pequeno volume de biogás produzido.

O volume de biogás por unidade de sólidos voláteis inseridos no reator foi de 4,09mL.g⁻¹SV para o Reator 1, 2,63mL.g⁻¹SV para o Reator 2 e 3,10mL.g⁻¹SV para o Reator 3. Kubaská *et al* (2010) alcançaram o rendimento de 472mL.g⁻¹SV inseridos em seu reator com ambiente controlado à 37°C e tempo de digestão de aproximadamente 18 dias.

Comparativamente, o índice de produtividade do biogás foi bem menor do que o obtido por Kubaská *et al* (2010), devido principalmente à interrupção precoce do processo fermentativo de conversão da biomassa.

4.2 Fase 2

4.2.1 Produção de biogás

A segunda fase de produção do biogás perdurou mais que a Fase 1, compreendendo um total de 14 dias no período de 13/12/2013 à 25/12/2013. A paralização da produção foi confirmada posteriormente ao dia 25/12 com a redução significativa do volume dos gasômetros. O comportamento da produção de biogás nesse período está ilustrada no gráfico 2:

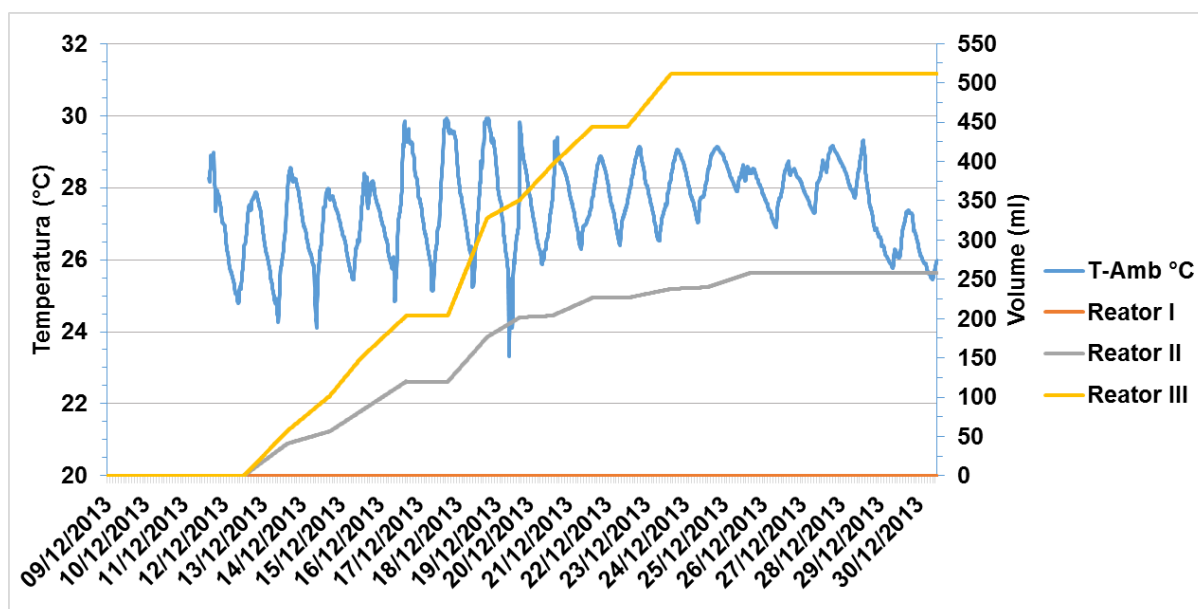


Gráfico 2: Volume acumulado de biogás produzido na Fase 2

Fonte: Próprio autor

Analisando o gráfico 2 é visualmente perceptível que os reatores 2 e 3 tiveram um padrão de produção do biogás semelhante ao longo do tempo, entretanto diferencia-se a amplitude de produção. Para o reator 1 que continha somente esgoto sintético não foi observado produção de biogás durante o período de ensaio.

A produção total durante as duas semanas de operação dos Reatores 1, 2 e 3 foi respectivamente de 0mL, 258,1mL e 511,5mL.

São identificadas duas fases de produção compartilhada entre os dois reatores. A primeira taxa ocorreu no período de 13/12 à 16/12 e foi de 30,0mL.dia⁻¹ para o Reator 2, 50,9mL.dia⁻¹ para o Reator 3 com média de 40,5mL.dia⁻¹ e desvio padrão de 14,8mL.dia⁻¹.

A segunda taxa ocorreu entre os dias 18/12 e 25/11 e foi de 12,6mL.dia⁻¹ para o Reator 2 e 45,5mL.dia⁻¹ para o Reator 3 com média de 29,0mL.dia⁻¹ e desvio padrão de 23,3mL.dia⁻¹.

No ensaio 2 a queda do pH pode ter influenciado a interrupção da produção devido a mesma justificativa do ensaio 1, no entanto de forma menos intensa. Faria (2012) cita em seu trabalho que valores de pH abaixo de 6 e acima de 8, praticamente extinguem a produção do metano nos reatores.

Para o ensaio 2, houve o monitoramento da temperatura ambiente do interior do Laboratório de Saneamento que continha o experimento operante, não é possível estabelecer relação direta entre a variação de temperatura do ambiente e a produção do biogás nos reatores. As correlações calculadas entre a produção de biogás e a temperatura ambiente para os reatores 2 e 3 foram de 0,2880 e 0,1673 respectivamente, correspondendo a uma correlação linear fraca positiva para ambos os conjuntos de dados.

4.2.2 Análises laboratoriais

4.2.2.1 pH

Para os três reatores, a inoculação foi realizada com meio excessivamente básico, estando fora da faixa ideal de operação do reator anaeróbio, iniciando na faixa de pH igual a 10. A forte alcalinidade provém do esgoto sintético preparado e misturado aos resíduos de alimento. O valor típico de pH utilizado em estudos e projetos para esgotos sanitários predominantemente domésticos compreende a faixa entre 6,7 a 8,0 com valor típico de 7,0 (SPERLING, M. V., 2005, p 112), indicando que o efluente sintético preparado para o ensaio 2 possui um resíduo com alcalinidade relativamente alta e o pH básico.

Os resultados obtidos do ensaio 2 das análises de pH estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – pH Fase 2

Amostra	pH	
	Inicial	Final
Reator 1 (Esgoto sintético)	10,40	8,02
Reator 2 (Esgoto sintético + comida)	9,93	6,37
Reator 3 (Esgoto sintético + comida)	9,93	5,92

Fonte: Próprio autor

A viabilidade da produção do biogás só foi possível após quatro dias de inoculação, tempo esse relacionado à produção de ácidos voláteis suficientes para reagir com os compostos do meio resultando na queda do pH à níveis funcionais para os microrganismos metanogênicos.

Embora não tenha ocorrido produção do biogás no Reator 1, é possível inferir que houve reações químicas ou bioquímicas no interior do reator ao longo do ensaio devido à queda do pH entre as análises inicial e final.

Com relação aos Reatores 2 e 3 o declínio do pH pode ter sido motivada pela concentração dos ácidos voláteis. O término da produção ocorreu com o pH estando no limite inferior de tolerância dos microrganismos metanogênicos.

4.2.2.2 Condutividade

Os resultados obtidos do ensaio 2 das análises da condutividade a partir da metodologia citada no presente trabalho, estão ilustrados na Tabela 21.

Tabela 21 – Condutividade elétrica Fase 2

Amostra	Condutividade (mS/cm)	
	Inicial	Final
Reator I (Esgoto sintético)	22,05	27,59
Reator II (Esgoto sintético + resíduo orgânico)	24,72	46,32
Reator III (Esgoto sintético + resíduo orgânico)	24,72	40,22

Fonte: Próprio autor

O aumento da condutividade em todos os reatores é decorrente da solubilização da matéria orgânica biodegradada durante o período do ensaio, promovendo um acréscimo na disponibilidade dos componentes dos alimentos e do esgoto sintético no meio aquoso, refletindo diretamente na leitura da condutividade elétrica no meio.

4.2.2.3 Sólidos totais, Voláteis e Fixos

A Tabela 22 apresenta os resultados das análises dos sólidos da fase inicial e final no ensaio 2.

Tabela 22 – Sólidos totais, voláteis e fixos Fase 2

	Amostra	Sólidos totais	Sólidos Voláteis	[SV]	Sólidos Fixos	[SF]
		[ST]	[SV]	%	[SF]	%
Inicial	Comida	27,67%(g/g)		84,61		15,39
	Esgoto sintético (I)	41.913,33mg.L ⁻¹	19.056,67mg.L ⁻¹	45,47	22.856,67mg.L ⁻¹	54,53
	Esgoto sintético (II)	41.760,00mg.L ⁻¹	19.940,00mg.L ⁻¹	47,75	21.820,00mg.L ⁻¹	52,25
	Esgoto sintético + comida	69.433,62mg.L ⁻¹	43.355,55mg.L ⁻¹	62,44	26.078,07mg.L ⁻¹	37,56
Final	Reator 1 (Esgoto sintético)	29.530,00mg.L ⁻¹	16.936,67mg.L ⁻¹	57,35	12.593,33mg.L ⁻¹	42,65
	Reator 2 (Esgoto sintético + comida)	37.315,07mg.L ⁻¹	23.510,96mg.L ⁻¹	63,01	13.804,11mg.L ⁻¹	36,99
	Reator 3 (Esgoto sintético + comida)	38.928,77mg.L ⁻¹	24.916,44mg.L ⁻¹	64,01	14.012,33mg.L ⁻¹	35,99

Fonte: Próprio autor

Analisando a Tabela 22, é possível observar a redução na concentração dos sólidos voláteis nos reatores que continham a mistura do esgoto sintético e comida, os resultados apresentados, estão muito próximos entre si, embora o reator 3 tenha produzido aproximadamente duas vezes mais biogás do que o reator 2.

4.2.2.4 Alcalinidade

A Tabela 23 contém os resultados dos valores obtidos no ensaio 2, especificamente para a amostra final após a digestão e produção do biogás.

Tabela 23 – Alcalinidade Fase 2

Amostra	Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)
	Final
Reator I (Esgoto sintético)	776,67
Reator II (Esgoto sintético + comida)	703,33
Reator III (Esgoto sintético + comida)	843,33

Fonte: Próprio autor

4.2.3 Análise química do biogás

Com o intuito de conhecer a qualidade do biogás produzido no ensaio 2, foi utilizado a metodologia citada no item 3.1.7. Foram utilizados 289,37mL do biogás produzido no reator 2, o volume de água deslocado na saída do sistema de análise foi de 213mL. Como a totalidade do volume de água deslocado corresponde ao metano não absorvido pela solução de NaOH, é estimado que 73,61% da composição do biogás é composto por CH₄ e os 26,39% restantes é formado basicamente por CO₂ e uma pequena fração de H₂S.

Quanto maior a concentração de metano no biogás maior é o seu poder calorífico, a concentração do metano no biogás é citado na literatura como estando na faixa de 40 à 75% e o dióxido de carbono entre 25 à 40% (FARIA, 2012). Com o resultado obtido, conclui-se que o biogás produzido apresenta elevada qualidade devido a elevada concentração de CH₄.

4.3 Fase 3

4.3.1 Produção de biogás

A terceira fase de produção do biogás compreendeu um total de 24 dias no período de 13/01/2013 à 05/02/2013. A interrupção da produção foi confirmada posteriormente ao dia 05/02 com a redução do volume dos gasômetros. O comportamento da produção de biogás nesse período está ilustrada no gráfico 3:

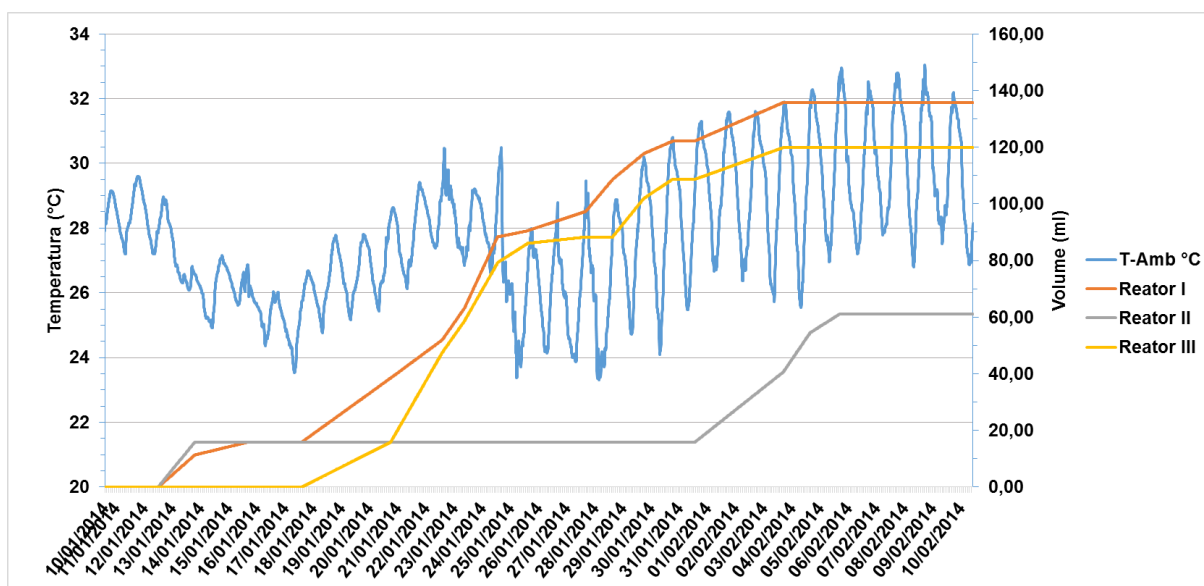


Gráfico 3: Biogás produzido - Fase 3
Fonte: Próprio autor

Analisando o gráfico 3 é visualmente perceptível que os reatores 1 e 3 tiveram um padrão de produção do biogás semelhante ao longo do tempo. Para o reator 2 que não continha carbonato como fonte extra de alcalinidade foi observado um padrão de produção de biogás bem diferente dos outros dois reatores durante o período do ensaio.

A produção total durante as duas semanas de operação dos Reatores 1, 2 e 3 foi respectivamente de 135,8mL, 61,0mL e 119,9mL.

Três diferentes fases de produção foram identificadas e ocorreram semelhantemente para os reatores 1 e 3 que continham carbonato adicionado. A

primeira taxa ocorreu no período de 20/01 à 24/01 e foi de $9,96\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$ para o Reator 1 e $12,67\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$ para o Reator 3; com média de $11,32\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$ e desvio padrão de $1,92\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$.

A segunda taxa ocorreu entre os dias 25/01 e 27/12 e foi de $2,27\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$ para o Reator 1 e $0,77\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$ para o Reator 3; com média de $1,52\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$ e desvio padrão de $1,06\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$.

A terceira e última taxa ocorreu entre os dias 28/01 e 03/02 e foi de $5,50\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$ para o Reator 1 e $5,23\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$ para o Reator 3; com média de $5,38\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$ e desvio padrão de $0,16\text{mL}\cdot\text{dia}^{-1}$.

O monitoramento de temperatura foi mantido durante o ensaio 3 e em semelhança ao ensaio 2, não foi possível estabelecer uma relação direta entre a variação de temperatura do ambiente e a produção do biogás nos reatores. As correlações calculadas entre a produção de biogás e a temperatura ambiente para os reatores 1, 2 e 3 foram de 0,4274, 0,4571 e 0,10960 respectivamente, correspondendo a uma correlação linear moderada positiva para os conjuntos de dados dos reatores 1 e 2 e uma correlação linear fraca positiva para o reator 3.

O consumo da alcalinidade nos reatores com o decorrer do experimento em consequência do decréscimo do pH ao final da produção novamente se mostrou como fator determinante para a interrupção da produção do biogás, como mostra a Tabela 24.

4.3.2 Análises laboratoriais

4.3.2.1 pH

Como ocorrido nos ensaios 1 e 2, o pH ao final do processo de produção do biogás foi fator determinante para a interrupção da metanogênese, estando abaixo da faixa ideal entre 6,5 e 7,5.

Os resultados do ensaio 3 obtidos das análises de pH estão ilustrados na Tabela 24.

Tabela 24 – pH Fase 3

Amostra	pH	
	Inicial	Final
Esgoto bruto	7,17	-
Comida	5,44	-
Reator I (Esgoto bruto + comida + carbonato)	7,75	4,58
Reator II (Esgoto bruto + comida)	-	4,26
Reator III (Esgoto bruto + comida + carbonato)	7,75	4,54

Fonte: Próprio autor

A análise final demonstra a ausência de alcalinidade no reator 2 com pH inferior à 4,3, quando comparado com os reatores 1 e 3 que possuíam baixa quantidade de alcalinidade, esse cenário é condizente com a montagem do ensaio 3, pois o reator 2 não teve inserido carbonato como fonte adicional de alcalinidade no momento da preparação das amostras e inoculação.

4.3.2.2 Condutividade

Os resultados obtidos das análises da condutividade estão ilustrados na Tabela 25.

Tabela 25 – Condutividade elétrica Fase 3

Amostra	Condutividade (mS/cma)
	Inicial
Esgoto bruto	0,923 mS/Cma
Comida	4,31 mS/Cma
Reator I (Esgoto bruto + comida + carbonato)	3,73 mS/Cma
Reator II (Esgoto bruto + comida)	-
Reator III (Esgoto bruto + comida + carbonato)	3,73 mS/Cma

Fonte: Próprio autor

Devido à baixa condutividade elétrica presente no esgoto, a mistura utilizada para a inoculação dos reatores apresentou menores valores em comparação ao ensaio 2.

4.3.2.3 Sólidos suspensos, Totais, Voláteis e Fixos

A Tabela 26 apresenta os resultados das análises dos sólidos da fase inicial e final no ensaio 3.

Tabela 26 – Sólidos totais, voláteis e fixos Fase 3

	Amostra	Sólidos totais	Sólidos Voláteis	[SV]	Sólidos Fixos	[SF]
		[ST]	[SV]	%	[SF]	%
Inicial	Comida	27,42%(g/g)		95,00%(g/g)		5,00%(g/g)
	Esgoto bruto	1.122,22mg.L ⁻¹	751,85mg.L ⁻¹	67,00	370,37mg.L ⁻¹	33,00
	Esgoto bruto + comida	18.107,14mg.L ⁻¹	16.017,14mg.L ⁻¹	88,46	2.090,00mg.L ⁻¹	11,54
Final	Reator 1 (c/carbonato)	10.063,16mg.L ⁻¹	8.480,36mg.L ⁻¹	84,27	1.582,79mg.L ⁻¹	15,73
	Reator 2 (s/carbonato)	10476,09mg.L ⁻¹	9.185,82mg.L ⁻¹	87,68	1.290,27mg.L ⁻¹	12,32
	Reator 3 (c/carbonato)	11.346,24mg.L ⁻¹	9.560,48mg.L ⁻¹	84,26	1.785,76mg.L ⁻¹	15,74

Fonte: Próprio autor

Os sólidos voláteis dos reatores apresentaram redução durante a produção do biogás, estando de acordo com a teoria. No entanto, ainda permaneceu nos reatores uma quantidade elevada de sólidos voláteis, indicando a degradação incompleta dos resíduos, e a parada prematura dos reatores, provavelmente devido ao baixo pH na fase final observada.

Tabela 27 – Sólidos suspensos do esgoto bruto

Amostra	Sólidos totais	Sólidos Voláteis	[SV]	Sólidos Fixos	[SF]
	[ST]	[SV]	%	[SF]	%
Esgoto bruto I	319,05mg.L ⁻¹	219,05mg.L ⁻¹	68,66	100mg.L ⁻¹	31,34
Esgoto bruto II	292,00mg.L ⁻¹	248,00mg.L ⁻¹	84,93	44mg.L ⁻¹	15,06

Fonte: Próprio autor

4.3.2.4 Alcalinidade

A Tabela 28 contém os valores de alcalinidade no início e final do ensaio 3.

Tabela 28 – Alcalinidade Fase 3

	Amostra	Alcalinidade (mgCaCO₃.L⁻¹)
Inicial	Esgoto bruto	25,0
	Esgoto bruto + comida + carbonato	90,0
Final	Reator 1	650,85
	Reator 2	0
	Reator 3	610,17

Fonte: Próprio autor

Comparativamente, foi constatado o aumento da alcalinidade entre o início e o final do processo de digestão. Os reatores da fase 3 interromperam a produção com valores inferiores de alcalinidade observados no ensaio 2, provavelmente pelo motivo de haver menos alcalinidade disponível no início da digestão, uma vez que o esgoto sintético foi elaborado com elevadas taxas de alcalinidade.

4.3.3 Análise química do biogás

Com o intuito de conhecer a qualidade do biogás produzido no ensaio 3, foi utilizado a metodologia citada no item 3.1.7. Foram utilizados 106,03mL do biogás produzidos nos reatores 1 e 3, o volume de água deslocado na saída do sistema de análise foi de 81mL. Ou seja, estima-se que 76,2% da composição do biogás é composto por CH₄ e os 23,8% restantes é formado basicamente por CO₂ e uma pequena fração de H₂S. O biogás produzido apresenta elevada qualidade para sistemas de biodigestão.

4.4 Estimativa do tempo de retorno para o investimento

A Tabela 29 resume os tempos de retorno calculados pela equação 14 para o investimento da planta de produção de biogás em escala real conforme os investimentos citados nas Tabelas 15,16 e 17.

Tabela 29 – Tempo de retorno do investimento em equipamentos

Fonte	Economia de GLP + Compostagem (R\$.dia⁻¹)	Tempo de Retorno
Referência (KUBASKÁ, 2010)	14,68	11 anos
Próprio autor (ensaio 2)	7,62	23 anos
Próprio autor (ensaio 3)	7,33	24 anos

Fonte: Próprio autor

Os tempos de retorno do investimento para os três modelos analisados se mostraram muito longos, não sendo viável economicamente para o modelo idealizado de reatores.

5. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Cada ensaio foi realizado com o objetivo de avaliar modificações das características da biomassa. O decaimento do pH para valores menores que a faixa ótima entre 6,5 e 7,5 foi um dos fatores determinantes para a interrupção precoce da produção do biogás, bem como a obtenção de taxas de produtividade de biogás abaixo das referências citadas em literatura (KUBASKÁ, 2010).

Durante a desmontagem dos reatores quando estes possuíam efluentes, foi possível verificar a formação de um sistema bifásico e/ou trifásico devido a flotação de parte dos resíduos e a decantação e adensamento da matéria orgânica no fundo do reator, criando em todos os reatores uma zona altamente compactada e densa logo abaixo de uma coluna de efluente clarificado. O adensamento da matéria orgânica pode ter prejudicado ou dificultado em algum momento a disponibilidade de insumos e produtos da cadeia produtiva do biogás, pela possibilidade de uma maior resistência no transporte de nutrientes e substrato, bem como dos gases formados no meio.

Em finais de produção de biogás ocorreu uma redução significativa dos gasômetros, bem como em períodos específicos do experimento, sugerindo a ocorrência de consumo do biogás produzido. A existência de vazamentos foi descartada pela realização de testes de estanqueidade com ar. A redução do volume por diferença de temperatura entre as leituras também foi desconsiderada. O Prof. Dr. Marcelo Zaiat, explicou que esse fenômeno de queda de pressão no interior do sistema pode ser vinculado principalmente a dois fatores: consumo do metano por microrganismos e equilíbrio do CO₂ no meio. Sendo a presença de consumidores de metano a explicação menos provável, uma vez que não é característico a presenças destes em lodo de esgoto sanitário. Thauer (1998) em seu estudo, demonstra as principais reações químicas para a produção do biogás, uma das vias de produção dos microrganismos metanogênicos se dá pelo consumo do CO₂ e H₂ conforme a equação 15.



Com relação ao volume, essa reação consome 5 moles de gás e produz 1 mol de gás metano, resultando então na redução do volume. Essa reação pode ser a razão pelo qual se observou as reduções de volume ao longo do experimento.

Em todos os ensaios, a inoculação foi realizada sem o uso de lodo de processos anaeróbios, ocorrendo o desenvolvimento de microrganismos já presentes na amostra para a formação do biogás pelo processo de metanogênese. Introdução de uma parcela de lodo com concentração de microrganismos adaptados para a produção de biogás poderia facilitar o início da produção do biogás nos reatores garantindo a presença de organismos eficientes e menos susceptíveis as variações bioquímicas do reator.

A concentração de mistura do efluente com o resíduo orgânico é um fator importante, uma vez que essa variável influencia diretamente no tempo de retorno do investimento em uma planta de geração em escala real. Baixas concentrações nas taxas de mistura, como a realizada nesse experimento ($0,1\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$) exigem reatores com volumes maiores devido ao tempo de detenção ser da ordem de aproximadamente 30 dias, conseqüentemente onera o projeto.

6. CONCLUSÕES

- O controle das variáveis como pH e alcalinidade são fundamentais para o bom desenvolvimento da digestão e manutenção das taxas ótimas de produção do biogás.
- Sistemas que são iniciados sem a adição de lodo de outros reatores estabilizados e com grande presença de microrganismos metanogênicos apresentam menores taxas de produtividade e são mais vulneráveis as mudanças físico-químicas do meio.
- O melhor índice de produtividade de biogás para a Fase 2 foi de $32,5\text{mL.gSV}^{-1}_{\text{iniciais}}$ e para a Fase 3 foi de $16,96\text{mL.gSV}^{-1}_{\text{iniciais}}$, a literatura expõe valores bem superiores na ordem de $400\text{mL.gSV}^{-1}_{\text{iniciais}}$, indicando que o substrato potencial para produção do biogás não foi consumido por completo.
- O tempo de retorno calculado do investimento nos equipamentos de uma planta de biogás em escala real se mostraram muito longos, sendo 11anos para o modelo ideal citado pela literatura Kubaská (2010), 23 anos para o segundo ensaio utilizando mistura com esgoto sintético e 24 anos para o terceiro ensaio no qual foi utilizado esgoto bruto da ETE do SAMAE.
- Para reduzir o volume do reator e conseqüentemente reduzir o investimento inicial das plantas de geração de biogás, a taxa de mistura deve ser elevada, uma vez que a taxa de mistura de 10% não se mostrou economicamente viável.

7 RECOMENDAÇÕES

As principais recomendações deste trabalho são: como proposta de melhoria, é interessante repensar o formato do digestor de forma a reduzir o efeito parede sobre o meio, que ocorre de forma significativa com o modelo atual. Caso seja possível, automatizar os reatores de forma a se ter um modelo com constante agitação, leitura do pH, temperatura e condutividade, favorecendo o entendimento dos processos biológicos que ocorrem ao longo do tempo, e permitindo intervenções em casos com pH crítico por exemplo, por intermédio de mecanismos de inserção de alcalinidade no meio, evitando assim o travamento do sistema. A agitação é essencial para evitar a formação de fases por longos períodos dentro do reator, além de favorecer a homogeneização dos produtos e reagentes das reações bioquímicas que devem ocorrer. O aquecimento da solução é importante, pois permite manter o sistema na faixa ótima de temperatura para os microrganismos que se pretende trabalhar, favorecendo o aumento do metabolismo e consequentemente a produção do biogás. Para a análise de sólidos voláteis, é interessante realizar uma rampa de aquecimento com aumento gradual da temperatura da mufla, em situações de rápido aquecimento pode ocorrer combustão espontânea do material, elevando a temperatura na superfície da amostra à temperaturas superiores à 550°C, devido a temperatura da chama, comprometendo assim as análises de sólidos voláteis e fixos.

REFERÊNCIAS

ALBERTONI, T. A. Caracterização física dos resíduos sólidos gerados em restaurante universitário. 2013. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília: Aneel, 2008.

ARAÚJO, E. P.; ALVES, F. DE. S.; FRANÇA, L. R. C.; COSTA, S. S. DE S.; PEREIRA, F. T. G.; MONTEIRO, V. E. D. Influência da temperatura no desenvolvimento de bactérias aeróbias em um biorreator de resíduos sólidos urbanos localizado na Universidade Federal de Campina Grande-PB. In: III Simposio Iberoamericano sobre Ingeniería de residuos. João Pessoa, 2010.

BRASIL, Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Diário Oficial. Brasília, DF, 02 ago. 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética, Brasília: ME: EPE, 2007.

CALLADO, N. H. Tratamento de esgoto doméstico com remoção de nitrogênio e fósforo em reatores sequenciais em batelada. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000.

CASTANÓN, N.J.B. Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais. Material do Curso: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização, Universidade de São Paulo, São Paulo (2002)

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa, Fontes de biomassa. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/fontes.htm>>. Acesso em: 02 ago. 2013

CHERNICHARO, C. A. DE L., Reatores anaeróbios. Princípios do tratamento Biológico de águas residuárias. DESA/UFMG. Belo Horizonte – MG, v.5, 1997.

COSTA, F.X; LUCENA, A. M. A. DE; TRESENA, N. DE L.; GUIMARÃES, F. S; GUIMARÃES, M. M. B; SILVA, M. M. P; GUERRA, H. O. C. Estudo qualitativo e quantitativo dos resíduos sólidos do Campus I da Universidade Estadual da Paraíba. Revista de Biologia e Ciências da Terra. João Pessoa, v. 4, n. 2, 2º semestre 2004.

COMASTRI FILHO, J. A. BIOGÁS: Independência energética do pantanal mato-grossense. EMBRAPA, Corumbá-MS, circular técnica n09, out. 1981.

DONAGEMA, G. K; CAMPOS, D. V. B. DE; CALDERANO, S. B; TEIXEIRA, W. G; VIANA, J. H. M. Manual de métodos de análise de solos. Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2011. 230 p.

FARIA, R. A. P.. 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. 65f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - UNIOESTE, Cascavel, 2012.

FAZOLO, D. Produção de Biogás a Partir da Fermentação de Excedente de Merenda Escolar para Substituição do Gás Liquefeito do Petróleo: uma Projeção. 2011. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2011.

FONSECA, F. S. T; ARAUJO, A. R. A. DE; HENDGES, T. L. Analise de viabilidade econômica de biodigestores na atividade suinícola na cidade de Balsas - MA: um estudo de caso. In: congresso da sociedade 55 brasileira de economia, administração e sociologia rural. Porto Alegre, Jul. 2009. Universidade Estadual do Maranhão. Maranhão, 2009.

FORESTI, E; ZAIAT, M; MORAES. E. DE M; ADORNO, M. A. T; PAIM, A. P. S; RODRIGUES, J. A. D; RATUSZNEI, S. M; CANTO, C. S. DO; DAMASCENO, L. H. S Métodos de análises físico-químicas de rotina de águas residuárias tratadas biologicamente. 85 f. Instituto Mauá de Tecnologia. USP, 2005

GENOVESE, A. L., 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. Campinas, 2006.

KUBASKÁ, M; SEDLÁČEK, S.; BODÍK, I; KISSOVÁ, B. Food Waste as Biodegradable Substrates for Biogas Production. In: 37th International Conference of SSCHE. Tatranské Matliare, Slovakia, 2010.

LONDRINA, Decreto nº 769 de 23 de Setembro de 2009. Regulamenta a gestão dos resíduos orgânicos e rejeitos de responsabilidade pública e privada no Município de Londrina e dá outras providências. Jornal Oficial, nº 1139, 29 de Setembro de 2009. p. 11

MENEZES, R. L; SANTOS, F. C. A; LEME, P. C. S. Projeto de minimização de resíduos sólidos no restaurante central do campus de São Carlos da Universidade de São Paulo. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2002.

NASPOLINI, B. F; LUSSI, C; BORGES, D. DE S.; SOUZA, D. B. E; ROCHA, L. A. Diagnóstico e proposta de melhoria de gestão dos resíduos sólidos produzidos no restaurante universitário: campus Cuiabá/UFMT. 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2009.

NEVES, V. L. V. Construção de biodigestor para produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino. 2010. 57 f. Monografia (Curso de Tecnologia em Biocombustíveis). – Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba.

OLIVEIRA, P. A. V. de; HIGARASHI, M. M. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. Concórdia: Embrapa, 2006. 42 p.

OLIVEIRA, R. D. E. Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono. 2009. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

SPERLING, Marcos von. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 452 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; 1)

STANDARD methods for the examination of water & wastewater. 22nd ed. Washington, DC: American Public Health Association, c2012. 1 v. (várias paginações)

SUZUKI, A. B. P. Geração de biogas utilizando cama de aviário e manipueira. 2012. 69 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - UNIOESTE, Cascavel, 2012.

THAUER, R. K. Biochemistry of methanogenesis: a tribute to Marjory Stephenson. Microbiology v. 144, p 2377-2406, 1998

VIJ, S. Biogas production from kitchen waste & to test the Quality and Quantity of biogas produced from kitchen waste under suitable conditions. 2011. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Biotecnológica. Instituto Nacional de Tecnologia, Rourkela.

VERINGA, H.J., 2000, Advanced Techniques for Generation of Energy from Biomass and Waste, Energy research Centre of the Netherlands – ECN,

ZILOTTI, H. A. R.. Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica. 2012. 39 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - UNIOESTE, Cascavel, 2012.