

# PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESTOS DE ALIMENTOS COLETADOS EM UM RESTAURANTE: UMA EXPERIÊNCIA A SER DISSEMINADA

Diego dos Santos Castro<sup>1</sup>

Viviana Oliveira Mateus<sup>2</sup>

## Resumo

A digestão anaeróbica é um processo no qual ocorre degradação orgânica para formação de gás rico em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. A fim de demonstrar a ocorrência de tal reação, utilizou-se uma panela de pressão com volume de 3 L em um sistema que funcione como um biodigestor que acomodará restos de alimentos por determinado período de tempo. Testes foram realizados para se obter o máximo conhecimento da matéria prima mensurando condições que impactam diretamente no rendimento do projeto: umidade, temperatura, acidez e quantidade de sólidos voláteis. A umidade encontrada nos testes foi de 42% e a quantidade de sólidos que podem formar biogás compreende cerca de 96% da quantidade de sólidos totais presentes na matéria orgânica. Os testes foram elaborados a fim de realizar ajustes para que a umidade final se concentre em torno de 70%, valor escolhido para a reação. A panela foi fechada com 750 g de matéria orgânica, 500 mL de lixiviado e cerca de 1 L de água. No decorrer do processo foi acompanhada a pressão do sistema, pois, este é o indicador de estabilização da reação.

**Palavras-chave:** Biodigestor; Biogás; Inóculo; Metano.

## Abstract

Anaerobic digestion is a process in which degradation occurs to organic-rich gas formation in CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>. In order to demonstrate the occurrence of this reaction, we used a pressure cooker with a volume of 3 L in a system that functions as a digester to accommodate food waste for a given period of time. Tests were conducted to obtain the maximum knowledge of the raw material measuring conditions that directly impact on project performance: moisture, temperature, acidity and amount of volatile solids. The humidity found in the tests was 42% and the amount of solids that can form biogas comprises about 96% of the total amount of solids present in the organic matter. The tests were developed in order to perform adjustments so that the final moisture concentrate of around 70%, value chosen for the reaction. The pan was closed with 750 g of organic material leached 500 mL to about 1 L of water. During the process monitors the system pressure, since this reaction is the stabilization indicator.

**Keywords:** Biodigester; Biogas; Inoculum; Methane.

## 1 INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbica trata-se de um processo natural que ocorre com matéria orgânica de qualquer espécie em sistemas que ocorra baixas concentrações de oxigênio, tais como, pântanos, mares e lagos, jazidas de carvão, dentre outros (PRATI, 2010).

O biogás deixou de ser visto apenas como subproduto da decomposição orgânica. Os avanços econômicos e tecnológicos, a altas de preços dos combustíveis convencionais, a ratificação do protocolo de Kyoto e a implantação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) tem incentivado pesquisas para obtenção de energia a partir de recursos renováveis e economicamente viável. A possibilidade de favorecer a preservação dos recursos naturais não

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Química, Universidade Salvador – UNIFACS. E-mail: castrodiegos@hotmail.com

<sup>2</sup>Professora Orientadora Mestre em Química Aplicada, Universidade Salvador – UNIFACS. E-mail: viviana.mateus@pro.unifacs.br

renováveis torna o seu uso como fonte de energia de grande interesse como: energia elétrica, geração de calor, cocção, geração de vapor, dentre outras aplicações (GOMES, 2010; PRATI, 2010).

O biogás é formado em um processo no qual ocorre um conjunto de reações simultâneas divididas em quatro etapas: hidrólise, acetogênese, acidogênese e metanogênese. Cada etapa é complementar uma a outra por formar reagentes para etapa seguinte, ou seja, a hidrólise gera o reagente da acetogênese, a acetogênese o da acidogênese e acidogênese para metanogênese. Essa última é essencial ao processo, pois nela se forma o metano. A conversão dos componentes formados em cada etapa se dá pela síntese da matéria orgânica por grupos de micro-organismos que realizam as conversões e é também o catalisador do processo. As reações ocorrem dentro do digestor anaeróbico (estrutura física hermeticamente fechada que funciona como reator para o processo anaeróbica), onde os reagentes são submetidos a condições específicas de temperatura, acidez e umidade de modo a obter maior rendimento possível na formação dos produtos (COSTA, 2011; FILHO, 2013).

Neste artigo a digestão é abordada utilizando restos de alimentos como matéria prima para a produção do biogás em um biorreator adaptado, levando em consideração fatores que favorecem a reação tal como o ajuste da umidade e a influência da inoculação na formação do metano, principal componente a ser obtido. Para tal, foi necessário montar um sistema de digestão anaeróbica, efetuar testes na matéria orgânica de modo a conhecer algumas de suas características e deixá-la no reator por um período de tempo até que a reação estabilize sendo indicada pela variação de pressão.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Processo de digestão anaeróbica**

O processo de digestão anaeróbica trata-se da degradação de matéria orgânica através de sucessivas reações bioquímicas com baixas concentrações de oxigênio ( $O_2$ ). Tal degradação acaba por gerar uma mistura gasosa composta em maior parte por metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) como mostra a tabela 1. As reações ocorrem em presença de microorganismos sensíveis a determinadas variações, sendo assim, é necessário respeitar algumas condições para que as bactérias participantes executem a digestão com êxito. O conjunto de gases a ser formado depende do tipo de matéria orgânica a ser utilizada e as condições nas quais foram submetidas.

Pode ser aplicada como uma das formas de tratamentos de resíduos por ser um processo natural e não prejudica a atmosfera, possuindo ainda como diferencial a capacidade de produzir energia devidos as características combustíveis do metano formado durante o processo (REIS,2012; SILVA 2012).

A digestão anaeróbica pode ocorrer de forma controlada dentro de um biodigestor. Os biodigestores (ou biorreatores) são estruturas físicas que possibilitam a ocorrência da digestão anaeróbica de forma controlada e adequada às reações químicas que ocorrem no processo (GONÇALVES, 2012). Trata-se de uma câmara de fermentação hermeticamente fechada construído de alvenaria, concreto ou outros materiais, no qual a biomassa é degradada a partir da digestão de bactérias anaeróbicas produzindo, sobretudo, biogás como produto final (COSTA 2011; SOTTI, 2014).

Tabela 1 - Composição média do biogás gerados através de matera orgânica

COMPOSIÇÃO	PORCENTAGEM (BASE SECA)
Metano	45-60
Dióxido de carbono	40-60
Nitrogênio	2-5
Oxigênio	0,1-1,0
Enxofre	0-1,0
Hidrogênio	0-0,2

Fonte: Adaptada de Filho, F. E. S., (2013)

## 2.2 Condições para a ocorrência da digestão anaeróbica

Por ser uma reação complexa devido à diversidade de substrato presente na massa orgânica, a reação depende de fatores diversos para melhor rendimento da mesma (MUSTAFA, 2014). A composição do substrato, tamanho das partículas, temperatura, pH e umidades são alguns dos fatores que podem influenciar a produção de metano (GONÇALVES, 2012).

Tendo em vista que os micro-organismos metanogênicos são os mais sensíveis e os mais importantes na produção de metano, as condições adotadas devem ser voltadas para proporcionar meios ideais à atuação/sobrevivência do mesmo (SILVA, 2012). As principais condições são:

### 2.2.1 Temperatura

A temperatura é, sem dúvidas, imprescindível para o rendimento do processo, pois afeta diretamente nas taxa enzimáticas, desnaturação dessas enzimas ou alteração nas habilidades dos microrganismos em produzir essas enzimas comprometendo assim a estabilização da matéria orgânica (REIS, 2012).

São definidas duas faixas ditas como ideais para o crescimento bacteriano: a faixa mesofílica que corresponde as faixas de 30 - 40°C (SILVA, 2012; MUSTAFA, 2014) e a termofílica que compreende entre 50 - 65°C (MUSTAFA, 2014). Segundo Mayer (2013) e Silva (2012) a temperatura ótima de operação está em torno de 35 - 37°C.

Ambas as faixas, mesofílicas e termofílicas, apresentam certa desvantagem operacional. A faixa mesofílica, por englobar temperaturas mais baixas, acaba por retardar a ação microbiana e, conseqüentemente, reduzir a taxa de degradação do substrato. Isto acarreta o decaimento da quantidade de biogás a ser produzida e, também pode causar esgotamento da energia celular (MAYER, 2013).

A faixa termofílica favorece a cinética da reação aumentando a sua velocidade produzindo maior quantidade de biogás, todavia, há controversas. Alguns cientistas afirmam que quanto maior for a temperatura menor o rendimento da reação, uma vez que, altas temperaturas favorecem formação de ácidos voláteis e amônia (produtos intermediários da reação) inibindo assim a ação das bactérias metanogênicas (MAYER, 2013).

### 2.2.2 pH

O pH deve ser mantido o mais neutro possível variando numa faixa entre 6 e 8 com valores ótimos compreendidos entre 7 e 7,2 para evitar a morte de bactérias.

### 2.2.3 Umidade

A umidade refere-se à quantidade de água presente na biodigestão. É um dos fatores essenciais no processo, pois, solubilizará a massa orgânica facilitando a assimilação de nutrientes pelos microrganismos, dando fluidez as enzimas e outros produtos microbianos (SILVA, 2012). A faixa de maior produtividade em termos de umidade encontra-se entre 60-80 %.

#### 2.2.4 Tamanho das partículas

Partículas grandes podem acabar por inibir o acesso dos microrganismos ao substrato fazendo com que a hidrólise não seja eficiente, pois esta é a fase limitante da reação. Partículas menores favorecem o aumento da superfície de contato entre as bactérias e o substrato (que se torna mais exposto) favorecendo a cinética da reação (MEYER, 2013).

#### 2.2.5 Teor de sólidos

Quantidade total de sólidos presentes na matéria orgânica. Os sólidos totais são definidos como a soma dos sólidos voláteis e os não - voláteis, sendo os voláteis os mais importantes e fáceis de serem degradados na digestão anaeróbica. O teor de sólidos é uma variável complementar a umidade. Se o sistema possui 60% de umidade, a quantidade de sólidos será de 40% (MUSTAFA, 2014).

#### 2.2.6 Quantidade de nutrientes

As colônias de micro-organismos atuantes nos processos microbiológicos necessitam de certas quantidades de nutrientes para realização do seu metabolismo. A relação desses nutrientes em relação à matéria orgânica é determinante pela quantidade de energia necessária para a síntese dos substratos (REIS, 2012). A quantidade ótima para a síntese advém da estimativa da relação carbono/nitrogênio cujo valor ideal encontra-se entre 20 e 30 (GONÇALVES, 2007; GONÇALVES, 2012; MAYER, 2013).

#### 2.2.7 Composição da matéria orgânica

A composição dos resíduos é um dos fatores determinantes para bom resultado na formação de biogás, pois, quanto mais componentes biodegradáveis e de fácil degradação, maior produção de biogás (MAYER, 2013).

### 2.2.8 Inoculação

A adição de inóculo contribui diretamente para a aceleração da estabilização da matéria orgânica. Tal característica se deve ao fato da grande quantidade de micro-organismos promover boa relação carbono/nitrogênio e favorecer acesso ao substrato facilitando o “ataque das bactérias”, ser úmido, e em alguns casos adiciona agentes tamponantes que regulam o pH do processo. Afeta diretamente a última etapa da reação favorecendo assim a formação de metano (BARCELOS, 2009; SANTOS, 2011; MAFACIOLLI, 2012).

Vários componentes podem ser utilizados como inóculos: esterco de porco, esterco de boi, lodos de tratamento de águas residuais e esgotos domésticos, lixiviados oriundos de aterros e etc. Basta possuir características físico-químicas e nutrientes que auxiliem o processo de digestão, tal como, elevado DQO e DBO, que são parâmetros que definem a biodegradabilidade de determinada matéria orgânica (BARCELOS, 2009; MAFACIOLLI, 2012).

## 2.3 Etapas da digestão anaeróbica

A digestão anaeróbica ocorre em cinco etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese. Este último ocorre somente quando a matéria orgânica utilizada possui altas concentrações de enxofre.

### 2.3.1 Etapa 1: Hidrólise

Trata-se da etapa inicial do processo digestivo anaeróbico. É a etapa limitante de toda a reação, pois, nela os materiais particulados complexos (polímeros) são convertidos em particulados solubilizados de menor peso molecular para facilitar a ação das bactérias fermentativas através de exoenzimas excretadas pelas mesmas. Geralmente, a hidrólise destes polímeros é uma etapa lenta: proteínas são hidrolisadas a polipeptídios, carboidratos em açúcares solúveis e os ácidos graxos em lipídeos e glicerol. Vários fatores influenciam esta fase, tal como, temperatura de operação, composição do substrato, tempo de residência, quantidade de nutrientes, tamanho das partículas, dentre outros (SILVA, 2012; REIS, 2012).

### 2.3.2 Etapa 2: Acidogênese

Nesta fase, os componentes provenientes da hidrólise são transportados para o interior do meio reacional onde serão convertidos em ácidos graxos voláteis, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. A proporção de formação depende inteiramente da pressão parcial de H<sub>2</sub>, na qual, quando se encontra em valores baixos, formam-se preferencialmente acetatos e H<sub>2</sub> sendo este o processo metabólico energético mais rentável (CARNEIRO, 2009).

Algumas das espécies microbiológicas de suma importância para essa fase são os *Bacilos*, *Clostridium*, *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Alcaligenes* (SILVA, 2012).

### 2.3.3 Etapa 3: Acetogênese

Trata-se basicamente da preparação dos substratos para a metanogênese. Os produtos da acidogênese são oxidados obtendo assim o substrato adequado para as bactérias e arqueas metanogênicas, gerando como principais produtos CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e CH<sub>3</sub>COOH (REIS, 2012).

Uma grande quantidade de hidrogênio é formado durante a produção de ácidos acéticos e propiônicos ocasionando queda do pH do meio. Apenas o hidrogênio e o acetato podem ser usados diretamente pelas bactérias metanogênicas (REIS, 2012).

### 2.3.4 Etapa 4: Metanogênese

É a etapa final da digestão anaeróbica. Nesta fase que ocorre a formação do biogás através das bactérias metanogênicas utilizando os acetatos, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. Para tal, as bactérias se dividem em acetoclásticas e hidrogenotróficas (REIS, 2012).

As hidrogenotróficas são as que fazem a redução de CO<sub>2</sub> através H<sub>2</sub> formando o metano, sendo esta, responsável pela formação de 30% do mesmo. Por possuírem uma taxa de crescimento maior que as acetoclásticas elas são a etapa limite da reação (CARNEIRO, 2009; SILVA, 2012).

As acetoclásticas convertem o acetato em metano através do processo de quebra responsável por cerca de 70% da produção (CARNEIRO, 2009).

### 2.3.5 Etapa 5: Sulfetogênese

A ocorrência desta etapa depende inteiramente da composição da matéria orgânica utilizada e se a mesma tem a presença de enxofre. As bactérias sulforedutoras causam a oxidação de sulfatos e outros compostos sulfurados presentes em sulfetos favorecendo a formação de H<sub>2</sub>S. Contudo, essas bactérias metabolizam uma gama de outros substratos podendo competir com as demais colônias que favorecem a produção de metano, logo, se as bactérias sulforedutoras competir com as demais, produzindo maior quantidade de H<sub>2</sub>S, a produção do metano irá cair (GOMES, 2010; GONÇALVES, 2007).

### 2.4 Etapa 6: Limpeza do biogás

A limpeza do biogás consiste em purificar o gás em metano de modo a obter maior rendimento energético no momento da queima. Os principais contaminantes destes gases são o ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S), CO<sub>2</sub> e água. Esses componentes não apenas inibem o potencial energético do gás, mas lhe confere características corrosivas que podem causar corrosões nos equipamentos como compressores e nos motores de combustão. (PRATI, 2010; ACÁCIO, 2014; BRANCOLI, 2014; MONTEIRO, 2011).

A remoção do CO<sub>2</sub> é um processo de purificação do biogás. É o segundo componente mais presente na mistura gasosa e por não ser um gás combustível pode atrapalhar no processo de queima do biogás. Se removido o rendimento calorífico é maior devido ao aumento da concentração de metano (BRANCOLI, 2014).

## 3 OBJETIVOS

### 3.1 Geral

Produzir biogás através do processo de digestão anaeróbica a partir de restos de alimentos, utilizando uma panela de pressão adaptada como reator.

### 3.2 Específicos

- a) Montar um sistema de biodigestão anaeróbica;

- b) Efetuar testes na matéria orgânica, a fim de levantar algumas características importantes ao processo;
- c) Verificar a quantidade de metano produzida quando se utiliza restos de alimentos como matéria orgânica;
- d) Difundir o uso de biodigestores portáteis comuns na sociedade.

## **4 METODOLOGIA**

Para alcançar os objetivos listados no item 3 e execução do projeto, readaptou-se uma panela de pressão de modo que a mesma funcionasse como um digestor anaeróbico, onde, diariamente, acompanha-se a pressão de modo a comprovar a conversão da matéria orgânica em biogás. Para melhor rendimento, estudou-se a matéria orgânica levantando algumas propriedades inerentes ao processo reacional. Toda a metodologia deste projeto se baseou nos procedimentos feitos pelo Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA, nas análises dos resíduos sólidos urbanos dispostos no Aterro Metropolitano Centro de Salvador.

### **4.1 Construção do Biodigestor Anaeróbico**

O primeiro passo no projeto foi a construção do digestor anaeróbico. Como já abordado, o equipamento advirá de uma adaptação utilizando panela de pressão como meio reacional. No lugar onde fica a válvula com pino da panela de pressão será instalado um manômetro de modo a monitorar a formação do gás. A mangueira para a saída do gás será instalada no lugar da válvula de alívio e no meio do percurso, o gás será bloqueado pela válvula agulha.

O biodigestor seguirá o modelo em batelada. O digestor adaptado será alimentado com matéria orgânica e inóculo, tampando logo em seguida. Para garantir que não haja escapamento gasoso, a tampa será vedada com silicone .

A matéria orgânica a ser adicionada foi devidamente pesada na balança analítica e, posteriormente, processada no liquidificador. A mistura orgânica foi mantida no reator por cerca de 25 dias sob controle da variação da pressão no manômetro, podendo assim calcular o volume através da equação geral dos gases ideais. Para o referido projeto adotou-se a quantidade de 750 g de matéria orgânica e cerca de 500 mL de inóculos coletados diretamente do aterro metropolitano de Salvador.

## 4.2 Pré- tratamento da matéria orgânica

### 4.2.1 Teste de Umidade

Inicialmente triturou-se o material orgânico, em seguida foi pesado 10 g e seco em 70 °C na estufa até a massa estar isenta de umidade. O material pesado representa a massa úmida da amostra, ou seja, a que contém uma mistura de água e sólidos. Desta forma, a massa remanescente foi pesada e estimada a quantidade de água evaporada através de balanço mássico. Com posse desses valores foi calculado a umidade em base seca e úmida conforme equação 1 e 2, respectivamente. Tendo em vista o valor da umidade, pode-se fazer a correção da quantidade de água no sistema, pois, sua quantidade é essencial na etapa de hidrólise.

$$U_{bs} = \frac{m_w}{m_s} \quad (\text{Eq.1})$$

$$U_{bu} = \frac{m_w}{m_H} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde:

$U_{BS}$ : teor de umidade em base seca;  $U_{BU}$ : teor de umidade em base úmida;  $m_w$ : massa de água presente na amostra;  $m_s$ : massa seca da amostra e  $m_H$ : massa úmida da amostra.

### 4.2.2 Teste da quantidade de matéria orgânica degradável

Por consequência, o teste de umidade nos fornece a quantidade total de sólidos (ST) na massa orgânica. Nessa etapa, irá prever-se apenas os sólidos que possuem facilidade em serem digeridos, ou seja, os sólidos que participarão efetivamente da reação sendo convertido em biogás. Para isso foi pesado cerca de 25 g de massa orgânica. A massa pesada foi levada à estufa durante uma hora e temperatura de 70 °C para efetuar pré-secagem da amostra. Após retirada parte da água, a amostra ficou na mufla, à 600°C, por um período de duas horas. A percentagem de sólidos voláteis é a diferença entre a massa de sólidos que entra na mufla com a massa de sólidos após a mufla.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Montagem do digestor

A montagem do digestor foi realizada no laboratório de processos e manufaturas na Unifacs, pois neste laboratório dispõe de todo equipamento suporte para a execução.

Primeiramente, teve-se que efetuar a medição do manômetro de modo a utilizar uma broca adequada para fazer o furo na panela e um macho na mesma especificação do instrumento de medição. Entretanto, antes de fazer na tampa da panela, fez-se o teste numa peça metálica utilizando um minitorno de bancada. Como o manômetro enroscou no corpo de prova, passou o procedimento para a tampa da panela finalizando o sistema alcançando o resultado exposto na figura 1.

Figura 1 - Panela de pressão adaptada para uso como biodigestor anaeróbico



Fonte: Elaborada pelo Autor

### 5.2 Teste de Umidade

Com o teste da umidade foi possível verificar o quanto de água se encontra presente na matéria-prima da reação. A quantidade de água é de suma importância para o rendimento, pois, age diretamente na primeira fase da digestão anaeróbica, a hidrólise, conforme já foi abordado no item 2.2.3. O teste de umidade foi realizado em triplicata utilizando cerca de 10g de matéria orgânica como amostra, permanecendo em processo de secagem por cerca de 2 h 15 min. Quando a massa na placa de Petri aparentou estar livre de umidade, realizou-se a pesagem e calculou a massa do evaporado, obtendo assim a massa seca e a massa de água, parâmetros necessários para a estimativa da umidade conforme as equações 1 e 2, do item 4.2.1. A tabela 2 exhibe os valores de umidade para cada amostra, exibindo também, a massa de cada amostra antes e depois da estufa.

Tabela 2 - Dados obtidos no teste de umidade

<b>Amostra</b>	<b>Massa da Amostra (g)</b>	<b>Massa Residual (g)</b>	<b>Massa Evaporada (g)</b>	<b>Umidade Base Seca (um)</b>	<b>Umidade Base Úmida (um)</b>
<b>1</b>	10,0501	5,5372	4,5129	0,8150	0,4490
<b>2</b>	10,0807	5,8312	4,2495	0,7288	0,4215
<b>3</b>	10,0703	6,1240	3,9463	0,6444	0,3919

Para que o procedimento realizado tenha confiabilidade, os valores de umidade discriminados na tabela acima são resumidos em um valor médio, no qual, verificou-se o desvio entre os valores em relação a média e o erro estimado no procedimento, utilizando o Excel para realização do tratamento estatístico cujo o valor está disposto na tabela 3.

Tabela 3 - Estatística referente ao teste de umidade

	<b>Base úmida</b>	<b>Base seca</b>
<b>Média (um)</b>	0,4208 ± 0,0165	0,7294 ± 0,0493
<b>Desvio padrão</b>	0,0286	0,0853
<b>Variância da amostra</b>	0,0008	0,0073

Para efetuar o balanço de massa, levou-se em consideração a umidade em base úmida, pois esta relaciona as duas variáveis (água e sólidos) que se deseja colocar em equilíbrio em comparação a um valor de entrada global, como uma mistura.

Quando testada a confiabilidade da medição da umidade, efetuou-se balanço mássico para atender as especificações do projeto de umidade de 70%, valor médio escolhido do valor ótimo citado no item 2.2.3. Com o valor da umidade exposto na tabela 3, pode-se afirmar que 42,08 % da matéria orgânica adicionada é composta de água.

### **5.3 Teste da quantidade de de matéria orgânica degradável**

Os valores deste teste é fundamental para o cálculo do  $L_0$ . Este fornecerá, em média, nos mesmos termos do tratamento de dados do teste de umidade, o quanto de massa orgânica participa ativamente da reação. Ou seja, mensura o quanto biodegradável é a matéria-prima utilizada. Primeiramente, efetuou-se secagem do material por 1h na estufa, cuja massa inicial é de 25 g e realizou-se a pesagem. Na passagem da placa de petri para o cadinho de porcelana

houve perda de parte no material, resultando em um certo erro em relação a massa inicial medida. A água presente na amostra não foi completamente evaporada, ou seja, havia água presente na massa de entrada da mufla. Ao fim do tempo na mufla, observou-se apenas a presença de cinzas, representando assim a quantidade de sólidos não voláteis. Resfriando o cadinho, fez-se a pesagem e encontrou a quantidade de sólidos voláteis, em média, 96 %. As tabelas 4 e 5 mostram detalhadamente os valores obtidos nas pesagens.

Tabela 4 - Teste de STV - Parte 1- Estufa

<b>Amostra</b>	<b>Massa Placa (g)</b>	<b>Massa Amostra (g)</b>	<b>Massa Residual da Placa (g)</b>	<b>Evaporado (g)</b>
<b>1</b>	44,5504	25,2458	21,9564	3,2894
<b>2</b>	52,2394	25,0109	21,5036	3,5073
<b>3</b>	52,4000	25,0908	21,3119	3,7789

Tabela 5 - Teste de STV - Parte 2- Mufla

<b>Amostra</b>	<b>Massa da Amostra (g)</b>	<b>Quantidade de Sólidos na Amostra (g)</b>	<b>Massa das Cinzas (g)</b>	<b>Massa de Sólidos Evaporados (g)</b>	<b>%SV</b>
<b>1</b>	21,2444	13,9104	0,6399	13,2705	95,40
<b>2</b>	21,1991	14,1813	0,4661	13,7152	96,71
<b>3</b>	20,8611	14,0813	0,5645	13,5168	95,99

### 5.3 Cálculo do volume, potencial de geração de metano e eficiência da reação

Após ter-se obtido os resultados de umidade e STV efetuou-se o balanço de massa para verificar a quanto de água seria adicionada. Para o processo de digestão foi considerada 750 g de matéria orgânica com umidade de 42,08 %, conforme teste realizado. A massa de água presente na amostra foi de 315,6 g, entretanto, 70 % era a desejada. Mantendo-se a massa de sólido constante (434,4 g) e utilizando a equação 1, calcula-se a massa de água necessária que é 1013,6 mL. Entretanto, no instante da adição de água não foi levada em consideração a massa de água presente na amostra acarretando em um erro no balanço. O correto seria acrescentar apenas 698 mL de água que somada a quantidade presente na amostra (315,6 g) totalizaria na quantidade obtida de 1013,6 mL. Como não houve tal consideração, para o processo de digestão acrescentou

750 g de matéria orgânica úmida, 510 mL de lixiviado e, aproximadamente, 1250 mL de água devido alguns erros na manipulação dos materiais. Para conversão massa-volume da água considerou-se massa específica 1 g/mL.

Manteve-se o sistema em observação de 12 h em 12 h, a fim de verificar alteração na pressão. Como não havia recursos para controle da temperatura deixou-se o digestor ao sol (em média 32 °C/dia), a fim de ceder calor ao sistema. Assim se passaram 4 dias. Contudo, no início do 4º dia, observou-se formação de espuma saindo pela tampa da panela, ou seja, o experimento não foi válido descartando a matéria orgânica ali presente.

O vazamento foi atribuído a dois fatores: ineficiência no processo de vedação e volume de matéria orgânica (2 L) superior a necessária no digestor possuindo dificuldade até mesmo na adição da tampa ao sistema. Tal fato sugere que o espaço de 1 L deixado não foi suficiente para garantir a manutenção dos gases formados no recipiente, em função da grande quantidade de espuma gerado que perpassou o silicone. Outro fator que certamente afetou o projeto além do vazamento foi o erro de cálculo no balanço da umidade.

Como o primeiro experimento foi falho, optou-se por fazer novamente o procedimento 4.1. Como a umidade dos elementos se alteram com o tempo, efetuou-se novamente teste de umidade cujo resultado médio foi 49,85 % (considerando base úmida para o balanço). Pode-se perceber, conforme a tabela 6, que o valor da umidade aumentou tanto na base úmida quanto na base seca. A quantidade de sólidos não se alteraram, pois, a matéria orgânica utilizada no segundo teste estava armazenada dentro do congelador, em uma temperatura na qual o processo de digestão anaeróbica não ocorre. O mesmo estudo de confiabilidade realizado no primeiro teste de umidade foi repetido no segundo teste. Utilizou-se um valor médio para ambos como mostrado na tabela 7, estimando também o erro e o desvio gerado na medição.

Tabela 6 - Teste de Umidade II

<b>Amostra</b>	<b>Massa da Amostra (g)</b>	<b>Massa Residual (g)</b>	<b>Massa Evaporada (g)</b>	<b>Umidade Base Seca (g)</b>	<b>Umidade Base Úmida (g)</b>
<b>1</b>	10,0156	4,9541	5,0615	1,0217	0,5054
<b>2</b>	10,076	5,1152	4,9608	0,9698	0,4923
<b>3</b>	10,0488	5,0456	5,0032	0,9916	0,4979

Tabela 7 – Tratamento estatístico do teste de umidade II

	<b>Base Úmida</b>	<b>Base Seca</b>
<b>Média (um)</b>	0,4985 ± 0,0038	0,9944 ± 0,0150
<b>Desvio padrão</b>	0,0065	0,0260
<b>Variância da amostra</b>	0,000043	0,000678

Na segunda tentativa da biodigestão manteve-se a quantidade em massa da matéria orgânica. Entretanto, não colocou-se água no sistema, apenas inóculo. Como o inóculo possui, conforme a teoria, uma quantidade considerável de água na sua constituição, optou-se por utilizá-lo a fim de corresponder o balanço mássico para que a umidade atingida seja de 70 %. Desta forma, 500 mL de inóculo fora adicionado totalizando um volume de aproximadamente 1.250 mL no digestor.

Um outro sistema foi montado, mas ao invés de usar uma panela adaptada utilizou-se um reator de pressão de forma cilíndrica e volume total de 600 mL conforme figura 2 abaixo. Neste colocou-se 60 g de matéria orgânica e 50 mL de inóculos, levando em consideração as mesmas condições da panela. Após 17 dias nem a panela e nem o reator Parr indicaram pressão.

Figura 2 - Reator Parr



Fonte: Elaborada pelo Autor

As condições climáticas da primeira tentativa para a segunda eram distintas. Na 1ª tinha-se em média temperaturas de 32 °C, já na 2ª uma média de 24°C. Isso pode ser um dos fatores que não colaborou para a ocorrência da reação. Na panela continuou escapando gás, isto foi constatado devido a presença de odores fortes em torno do digestor. O mesmo não ocorreu com o reator, todavia não houve alteração da pressão. Ao abrir o reator para descarte da matéria orgânica e medição do pH, observou-se liberação de gás. Pode-se inferir que houve metano na composição do gás formado, mas como nenhuma análise foi feita, nada se pode afirmar. A massa orgânica remanescente possuía uma aparência viscosa, como se houvesse formado uma espécie de lama. A figura 3 mostra o aspecto dessa massa. Quando despejada, é possível ver alguns pedaços de sólidos que não foram triturados devidamente.

Figura 3 - Materia orgânica pós confinamento no reator de bancada



Fonte: Elaborada pelo Autor

Além da temperatura, é necessária o controle de outras condições para eficácia da reação. O pH do meio é fundamental para sobrevivência dos microorganismos, tais como a quantidade de nutrientes, cujo de acordo Mustafa (2014) a proporção ideal de carbono/nitrogênio varia entre 20 e 30. Por não haver tal controle, a reação pode não ter sido concluída com sucesso. O volume reacional baixo (100 mL), deixando um espaço vazio de 500 mL, pode não ter sido suficiente para gerar uma quantidade de gás que fornecesse pressão adequada à sensibilidade do manômetro nele acoplado, ou seja, foi gerado o gás porém em quantidade relativamente baixa para ser detectada pelo manômetro do reator, uma vez que conforme Oliveira (2009), no máximo 7% da matéria orgânica total adicionada é convertida em gás, ou seja, 4,2 g de gás poderiam ser gerados no máximo.

Embora a literatura cite as características físico-químicas que dá ao lixiviado qualidade para ser utilizado como inóculo, neste referido projeto, não foram feito testes que expusessem em números tais características para que se comprovassem as informações. Esse levantamento é feito pela Cetrel, responsável pelo tratamento, a fim de definir o processo de tratamento. Contudo, tais valores não são divulgados, logo, utilizá-lo no processo se demonstrou ser uma escolha arriscada (BATTRE, 2016).

A utilização do lixiviado sem as devidas características expressas podem constituir uma das razões de erro no processo. É comum que os lixiviados possuam determinada quantidade de metais pesados em sua composição, tais como, chumbo, níquel, mercúrio, etc. Conforme Santos (2011), a presença de tais metais na digestão anaeróbica acaba por inibir a reação se em quantidades elevadas por serem poluentes, possuindo assim valores mínimos que não prejudicam a reação. A tabela 8 expõe algumas concentrações de metais que podem inibir a digestão anaeróbica.

Tabela 8 - Concentração inibitórias de alguns metais na digestão anaerobica

CÁTIONS	Concentrações Inibitórias (mg/L)
Fe <sup>2+</sup>	1-10
Zn <sup>2+</sup>	4-10
Cd <sup>2+</sup>	7-10
Cu <sup>+</sup>	10-12
Cu <sup>2+</sup>	12-16

Fonte: Santos, A. C. (2011)

Em relação ao inóculo utilizado ainda tem como erro a quantidade que foi adicionada ao reator. Não houve um parâmetro do quanto de lixiviado deveria ser adicionado ao processo em detrimento da falta de conhecimento das propriedades físico-química do mesmo. Sendo assim colocado um valor aleatório, julgado suficiente para a quantidade de matéria orgânica a ser digerida. A definição da quantidade, embora não tenha se dado por um embasamento teórico, foi avaliada de modo a garantir a umidade de 70% do sistema. Entretanto, Souto (2005) e Barcelos (2009) afirmam que a proporção entre inóculos e matéria orgânica é definida pela equação 3 e expressa em porcentual. Com o balanço entre a umidade do lixiviado e a umidade da massa orgânica seria possível verificar o quanto de água deve-se adicionar ao sistema. Contudo, para tal, seriam necessários os dados de caracterização do inóculo. Segue abaixo a equação 3 que permite calcular a proporção massa/inóculo para digestão anaeróbica.

$$FI = \frac{STi}{STi + STs}$$

(Eq.3)

Onde:

FI = fator de inóculo; STi = sólidos totais do inóculo; STs= sólidos totais do substrato.

O controle do pH é essencial para funcionamento ideal da digestão anaeróbica. As bactérias metanogênicas são sensíveis as variações de pH e acabam por serem inibidas quando este encontra-se em valores muitos baixos.

A acidez do sistema é caracterizada pela concentração de ácidos voláteis produzidos na acetogênese. Para que o pH não caia a ponto de prejudicar a reação, coloca-se uma solução tampão de modo a estabilizar o pH entre 6,6 e 7,6. O lixiviado contribui para tal regulação

porque mantém a concentração hidrogeniônica dentro desta faixa, contudo, no decorrer da reação tal faixa pode se alterar se não adicionado o tampão e interromper a ação das bactérias metanogênicas. O pH da panela, ao ser aberta, se encontrou em torno de 6 e 7. A medição foi feita utilizando fita de pH. Logo, pode-se afirmar que não houve inibição da reação por elevada acidez. Já o reator apresentou pH em entre 5 e 6 sendo medida da mesma forma que a panela. Um pH menor que 6 pode ocasionar acidez elevada, prejudicial a reação que favorece a formação de metano, pois as bactérias metanogênicas não sobrevivem em meio ácido. Quando ocorre inibição da atividade metanogênica a formação de CO<sub>2</sub> se torna preferencial, pois as bactérias que convertem os ácidos e o CO<sub>2</sub> em metano não serão efetivas na reação.

A digestão anaeróbica pode ocorrer em temperatura ambiente, todavia em um espaço de tempo maior do que na faixa mesofílica e termofílica. O controle da temperatura é essencial para manter a taxa da reação por estar diretamente ligada ao crescimento microbiano do sistema. Quando há variações bruscas da temperatura as bactérias acabam por se tornarem inativas e a digestão se torna ineficiente.

A umidade do processo também pode configurar um erro pelo fato de não se conhecer o quanto de água possuía o lixiviado. Muitos teóricos consideram que a umidade máxima fica em torno de 95% como já foi abordado. Quando se encontra em excesso acaba por retardar o processo digestório. Mafaciolli (2012) e Barcelos (2009) afirmam que tal retardo se dar porque ocorre a fermentação ácida da matéria orgânica formando assim uma quantidade maior de ácidos orgânicos que acabam por inibir a ação das bactérias metanogênicas.

Por fim, a alteração da atmosfera dentro do reator é essencial para redução da quantidade de oxigênio presente na reação. Geralmente se acrescenta N<sub>2</sub> para tal alteração. Tal procedimento não foi feito, podendo ter prejudicado a reação por presença de oxigênio.

## **6 CONCLUSÃO**

O processo de digestão anaeróbica manipulada é dificultoso por necessitar de vários parâmetros de difícil controle. O processo produtivo depende diretamente da composição do substrato e, este não se apresenta de forma constante, dificultando ainda mais o controle do meio reacional.

A produção de biogás ocorreu, porém não foi possível quantificar. Houve ausência no controle de temperatura, acidez e falhas no acompanhamento da pressão. O manômetro localizado no digestor e também no reator não eram sensíveis o suficiente para detectar variações

de baixa pressão. Dos objetivos listados, obteve-se êxito com a montagem do sistema, os testes efetuados com a matéria orgânica e a formação de gás.

Os resultados obtidos através deste trabalho favoreceu ao desenvolvimento de mão de obra qualificada, capaz de desenvolver e disseminar o uso dos biodigestores. O uso dos biodigestores pela sociedade é indispensável para melhoria da qualidade de vida, mediante a reutilização dos rejeitos como fonte de energia. A divulgação de biodigestores portáteis como a panela de pressão se faz necessário, no intuito de difundir o tratamento de resíduos orgânicos em ambientes domésticos por constituir materiais de fácil acesso e manutenção.

## REFERÊNCIAS

- ACÁCIO, Luciana Carvalho. **Soluções em energia – projeto de biodigestor residencial.** Relatório apresentado à Universidade Federal de Juiz De Fora. Juiz de Fora – MG, 2014.
- BARCELOS, Beatriz Rodriguez de. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbica da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos.** 2009. Dissertação (Mestrado) - Departamento De Engenharia Civil E Ambiental Da Faculdade De Tenconlogia Da Univerdade De Brasilia. Brasilia-DF, 2009.
- BRANCOLI, Pedro Luz. **Avaliação experimental da co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e lodo de esgoto em digestores têxteis.** Rio de Janeiro, 2014.
- CARNEIRO, Débora Rute Costa. **Viabilidade técnica e económica de uma unidade centralizada de co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos.** 2009. Dissertação (Mestre Em Engenharia Do Ambiente) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- COSTA, Rita Joana Relva Da. **Produção e aplicação de biogás.** 2011. Dissertação (Mestre em Automação e Comunicações em Sistemas de Energia) - Instituto Politécnico de Coimbra. COIMBRA, 2011.
- FILHO, Francisco do Espirito Santo. **Estimativa do aproveitamento energético do biogás gerados por resíduos sólidos urbanos no Brasil.** Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, 2013.
- GEOAMB – Laboratório de Geotécnica Ambiental da Universidade Federal da Bahia. **Análise dos resíduos da cidade de salvador.** Salvador, BA, 2016.
- GOMES, F. C. de S. P.; **Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos estudo da arte e análise crítica das principais tecnologias.** Ouro Preto, 2010
- GONÇALVES, Andriani Tavares Tenório. **Potencialidade energética dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais do município de itajubá – mg.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, MG, 2007.

GONÇALVES, Celso Duarte Correia. **Modelação do processo de digestão anaeróbia da forsu à escala industrial.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Técnico Lisboa. Outubro, 2012.

MAFACIOLLI, Debora. **Produção de biogás através do processo de digestão anaeróbica utilizando dejetos de aves de postura com suplementação da glicerina bruta.** 2012. Monografia ( Engenharia Ambiental) - Centro Unversitario UNIVATES. Lajedo, PE, 2012.

MAYER, Mateus Cunha. **Estudo da Influência de Diferentes Inóculos no Tratamento Anaeróbio de Resíduos Sólidos Orgânicos.** 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Centro De Ciências E Tecnologia Na Universidade Estadual Da Paraíba. Campina Grande-PB, 2013.

MUSTAFA, G. de S.. **Introdução à Engenharia Bioquímica.** Salvador, 2014.

OLIVEIRA, Rafael Deléo E. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbica de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono.** 2009. Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2009.

PRATI, Lisandro. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores.** Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR, 2010.

REIS, A. dos S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio.** Caruaru, 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

SALOMON, Karina Riberio. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto De Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, 2007.

SANTOS, Átila Caldas. **Estimativa da geração de metano no aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador-Ba.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2012.

SILVA, Gardênia Azevedo. **Estimativa da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa Através Do Teste Bmp.** João Pessoa, PB, 2012.

SOUTO, Gabriel D'Arrigo de Brito. **Efeito da Variação Gradual da Taxa de Recirculação de Lixiviado Em Reatores Anaeróbicos Híbridos Na Digestão Da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos.** 2005. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia De São Carlos Na USP. São Carlos, SP, 2005.