

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS
ORGÂNICOS UTILIZANDO BIODIGESTOR ANAERÓBICO**

ANA PAULA CAIXETA ARAÚJO

UBERLÂNDIA

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



TERMO DE APROVAÇÃO

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS UTILIZANDO BIODIGESTOR ANAERÓBICO

por

ANA PAULA CAIXETA ARAÚJO

Esta Monografia foi apresentada em 14 de dezembro de 2017 como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora abaixo assinada. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

PROF. DR. FABIANA REGINA XAVIER BATISTA
Prof.(a) Orientador(a)/FEQ/UFU

PROF. DR. JULIANA FERREIRA DE SOUZA
Membro titular/FEQ/UFU

FELIPE SANTOS MOREIRA
Membro titular e Doutorando PPG-EQ/UFU



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS
UTILIZANDO BIODIGESTOR ANAERÓBICO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química
(Faculdade de Engenharia Química), da
Universidade Federal de Uberlândia.

Orientadora: Prof. Dr. Fabiana Regina Xavier Batista

UBERLÂNDIA

2017

iv

Dedico este trabalho à minha mãe Cláudia e ao meu padrasto Márcio, por todo amor, incentivo e apoio em todos os sentidos durante minha trajetória. Aos meus irmãos Anderson, João Pedro, Mariana, Maria Carolina e Antônio Augusto, companheiros importantes ao longo desta jornada. Aos meus professores e à minha orientadora Fabiana, por todos os conhecimentos repassados. Aos meus amigos, pela amizade incondicional e pelos tantos momentos de alegria.

RESUMO

Nas últimas décadas intensificou-se a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para a produção de energia de forma limpa e sustentável. Isto se deve principalmente ao fato de que o uso de combustíveis fósseis contribui de forma acentuada para a geração de gases do efeito estufa. E neste contexto o aperfeiçoamento de metodologias para a produção de biocombustíveis destaca-se pela abundante disponibilidade de matéria-prima orgânica, a qual apresenta elevado potencial energético. Com a utilização de biodigestores no processo de fermentação, obtém-se como um dos produtos de interesse, o biogás, que possui em sua composição o gás metano, amplamente utilizado como combustível devido à sua alta inflamabilidade. Neste projeto a produção de biogás utilizando um biodigestor anaeróbico, tendo como matéria-prima os resíduos sólidos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) foi consolidada. O biogás obtido através do processo de digestão anaeróbia pode ser convertido em energia térmica ou elétrica, por meio da oxidação térmica do metano. É importante salientar que a utilização de tal processo tem um viés ambientalmente sustentável e energeticamente econômico, sendo um processo com grande potencial de melhorias para um desempenho mais eficiente.

Palavras-chave: Biodigestor anaeróbico, biogás, resíduos orgânicos

SUMÁRIO

1 – Introdução	1
2 – Objetivos	2
2.1. – Objetivos Específicos	3
3 – Revisão bibliográfica	3
3.1 – Biodigestores	3
3.1.1 – História dos Biodigestores	4
3.1.2 – Modelos de Biodigestores	5
3.1.2.1 – Modelo indiano	5
3.1.2.2 – Modelo chinês	6
3.1.2.3 – Modelo Canadense (Modelo da Marinha)	6
3.2 – Biomassa	7
3.3 – Biogás	8
3.4 – Fermentação anaeróbica	9
3.5 – Formação do biogás	9
3.5.1 – Hidrólise	11
3.5.2 – Acidogênese	11
3.5.3 – Acetogênese	11
3.5.4 – Metanogênese	12
3.6 – Condições operacionais	15
3.6.1 – Concentração de nutrientes	15
3.6.2 – Condições de pH: acidez ou alcalinidade	15
3.6.3 – Temperatura	16
3.6.4 – Tempo de detenção hidráulica	16

3.6.5 – Fatores relativos à operação do biodigestor	17
3.7 – Inóculo.....	17
4 – Metodologia.....	20
4.1. Caracterização do local e quantitativo.....	20
4.2. Dimensionamento e caracterização do Biodigestor	20
4.3 - Tempo de Detenção Hidráulica (TDH).....	21
4.4 - Volume diário da mistura	22
4.5 - Volume total do Biodigestor	22
5 – Resultados e Análises.....	22
5.1 – Dimensionamento e caracterização do Biodigestor	23
5.2 – Tempo de Detenção Hidráulica	24
5.3 – Volume diário ocupado pela mistura	24
5.4 – Volume do Biodigestor	25
5.5 – Controle de Temperatura.....	25
5.6 – Produção e utilização do gás metano	25
6 – Conclusões e recomendações	27
7 – Referências bibliográficas.....	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação de Biodigestor Modelo Indiano.....	5
Figura 2. Representação de Biodigestor Modelo Chinês	6
Figura 3. Representação de Biodigestor Modelo Canadense	7
Figura 4. Etapas de produção do biogás.....	10
Figura 5. Archea Methanosarcina thermophila	13
Figura 6. Archea Methanosarcina	14
Figura 7. Localização do Campus Glória	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação para 1 litro de biogás com outras fontes de energia.....	8
Tabela 2. Dados de alguns estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos sólidos.....	19
Tabela 3. Massa de resíduos sólidos orgânicos	23
Tabela 4. Resumo dos resultados obtidos.....	26

1 – Introdução

As formulações e reavaliações das políticas energéticas de cada país enfrentam um novo desafio: as futuras matrizes energéticas devem refletir ações que diminuam em ritmo crescente a queima do petróleo, gás natural, carvão e combustíveis de origem não renovável, na busca de minimizar a concentração de dióxido de carbono emitido para a atmosfera. Essa questão vem acompanhada de relatórios de organizações respeitadas, como do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, que adverte impactos ambientais no caso da negligência dessa situação.

As questões energéticas mundiais sempre são alvo de mudanças e adaptações de acordo com a situação econômica, política e climática. A energia sempre foi reconhecida como a base do desenvolvimento das civilizações ao redor do mundo. No final do século XIX, por exemplo, o mundo passou por um processo de modernização após a Revolução Industrial, devido principalmente, à necessidade de criação de novas fontes energéticas além da energia térmica, muito utilizada naquela época. Nas últimas décadas, devido à deflagração da crise do petróleo, fez-se necessária uma reestruturação na cadeia energética dos países, considerando sobretudo a disponibilidade de recursos não renováveis e o impacto ambiental oriundo dos processos de produção de energia. Neste contexto, a utilização de energias renováveis ganhou representatividade no panorama energético, favorecendo assim seu desenvolvimento, disseminação e aplicação pelo mundo, tornando-se uma alternativa viável para a atual situação de escassez de recursos. Essa alternativa se potencializou pelas crises de petróleo nos países produtores, grande fragilidade do sistema de hidroelétricas, inviabilidade e perigo de construção de termelétricas, usinas nucleares e outras formas de energia que geram grande carga de poluentes e conseqüentemente, degradação ambiental, o qual é visível e notório do ponto de vista social e econômico (Silva, et al., 2009).

No Brasil, o sistema elétrico é predominantemente sustentado pela energia hidráulica, a qual depende do regime fluvial. Para operar com maior eficiência, as usinas hidroelétricas necessitam da complementação de usinas termelétricas, que garantem segurança de entrada em operação a qualquer momento. O mesmo raciocínio vale para as usinas eólicas e solares, cuja capacidade de geração depende respectivamente, do regime dos ventos e da

irradiação solar. Para ANEEL (2004), a médio e longo prazo, a exaustão de fontes não-renováveis e as pressões ambientalistas poderão acarretar maior aproveitamento energético da biomassa como fonte alternativa. Atualmente, a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica.

Neste contexto, foi analisada a alternativa da produção de biogás como combustível a partir do uso de biodigestores, considerando a facilidade de obtenção de matéria prima (biomassa) para o processo e a flexibilidade de operar com geração constante ou variável, de forma complementar, no abastecimento de energia do país. Para Amaral et al. (2004), a fermentação da biomassa em reatores anaeróbicos apresenta uma excelente alternativa, pois além de reduzir a taxa de poluição e contaminação do ciclo produtivo, promove a geração do biogás, utilizado como fonte de energia térmica, mecânica e elétrica, permitindo ainda a utilização do resíduo final como biofertilizante.

Ressalta-se a existência de diversas vantagens para o uso de biodigestores, como a redução da carga de matéria orgânica lançada no meio ambiente, controle da proliferação de insetos e emissão de odores ofensivos e desagradáveis, diminuição da emissão de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) na atmosfera através da queima, além do melhor aproveitamento dos dejetos de natureza orgânica. É importante considerar a conscientização da comunidade sobre os impactos ambientais causados pela emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, seu possível agravamento no aquecimento global, ressaltando a necessidade da preservação de rios e afluentes, manutenção de níveis aceitáveis de saúde, bem como o cumprimento de regulamentos e leis ambientais. Assim, propõe-se a destinação e tratamento dos resíduos sólidos orgânicos provenientes diariamente do Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal de Uberlândia, com aproveitamento como matéria-prima no processo de produção de biogás.

2 – Objetivos

Propor um modelo de implantação de um biodigestor anaeróbico para produção de biogás, tendo como matéria prima os resíduos sólidos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

2.1. – Objetivos Específicos

- a) Verificar qual modelo de biodigestor é mais adequado para implantação na universidade;
- b) Avaliar as condições operacionais ideais para o processo de digestão anaeróbica;

3 – Revisão bibliográfica

3.1 – Biodigestores

Biodigestores consistem em equipamentos herméticos e impermeáveis dentro dos quais se deposita material orgânico para fermentar anaerobicamente, ou seja, sem a presença de ar atmosférico, por um determinado tempo de retenção, no qual ocorre um processo bioquímico denominado biodigestão anaeróbica, que tem como resultado a formação de produtos gasosos, principalmente metano e dióxido de carbono, além também biofertilizante (Magalhães, 1986).

A produção de biogás é proveniente da criação de um meio propício para que as bactérias metanogênicas atuem sobre a matéria orgânica e produzam esse combustível a partir de uma rota biológica definida. Esse ambiente favorável à produção do biogás refere-se às condições químicas e físicas necessárias ao desenvolvimento dessas bactérias dentro do biodigestor, as quais são determinadas em certas faixas de temperatura, pH e relação carbono/nitrogênio (C/N) da biomassa.

O biodigestor é constituído por um reservatório que armazena a biomassa por um determinado tempo, e por uma câmara (gasômetro) que armazena o biogás produzido. O biogás fica retido na parte livre do biodigestor e em seguida pode ser canalizado para ser utilizado em diversas aplicações, como processos de aquecimento, resfriamento, ou na geração de energia elétrica. O biodigestor pode ser classificado como contínuo ou intermitente. No primeiro caso, o abastecimento de biomassa é diário, com descarga proporcional à entrada de biomassa. Já no intermitente, utiliza-se a capacidade máxima de armazenamento de biomassa, retendo-a até a completa biodigestão. Em seguida, são retirados os restos da digestão e realiza-se uma nova recarga.

3.1.1 – História dos Biodigestores

Dados literários registram a existência do biodigestor desde a segunda metade do século XIX, como a primeira instalação operacional com a finalidade de produzir gás combustível. Contudo, o biogás já era conhecido desde o século anterior. Em 1776, o pesquisador italiano Alessandro Volta descobriu que o gás metano já existia incorporado ao chamado "gás dos pântanos", sendo um resultado da decomposição de restos vegetais em ambientes confinados. Em 1806, na Inglaterra, Humphrey Davy identificou um gás rico em carbono e dióxido de carbono, sendo este resultante da decomposição de dejetos animais em lugares úmidos. Contudo, somente em 1857, em Bombaim, na Índia, instalou-se o biodigestor pioneiro que deu bases teóricas e experimentais da digestão anaeróbica (Nogueira, 1986).

O uso de biodigestores foi difundido através de várias pesquisas, e em 1939 foi criado em Kampur, na Índia, o Institute Gobár Gás (Instituto de Gás de Esterco), sede da primeira usina de gás de esterco, que objetivava tratar os dejetos animais, obter biogás e aproveitar o biofertilizante. Esse trabalho pioneiro permitiu a construção de quase meio milhão de biodigestores na Índia. A utilização do biogás na Índia, como fonte de energia, motivou a China a adotar tal tecnologia a partir de 1958, em 1972, já possuíam aproximadamente 7,2 milhões de biodigestores em atividade (Deubleinb & Steinhauser, 2008). Deflagrada a crise energética em 1973, a implantação de biodigestores passou a ser interessante tanto para países de primeiro como países de terceiro mundo, mas em nenhum desses países, o uso dessa tecnologia foi ou é tão difundida como na China e na Índia.

No caso da China, o interesse pelo uso de biodigestores deveu-se originalmente a questões militares, nas quais a China temia que um ataque nuclear impedisse toda e qualquer atividade econômica (principalmente industrial). Entretanto, com a pulverização de pequenas unidades de biodigestores ao longo do país, algumas poderiam escapar ao ataque inimigo. Nos dias atuais, o foco do uso de biodigestores na China é outro. Tendo um excedente de população, a mecanização da atividade agrícola seria inviável, considerando que o índice de desemprego rural seria preocupante. Dessa forma, o governo chinês incentivou o aperfeiçoamento de técnicas rudimentares de cultivo do solo, e a partir disso os biodigestores ocuparam papel importante (Gaspar, 2003).

No caso da Índia, questões sociais e de disponibilidade de recursos motivaram o desenvolvimento da tecnologia dos biodigestores. Logo, são dois extremos de utilização desse equipamento, onde os chineses priorizam o biofertilizante para produção dos alimentos necessários à sua população numerosa, e indianos focam na produção de biogás para compensar o déficit de energia. Assim, desenvolveram-se na época dois modelos diferentes de biodigestor: o modelo chinês e o modelo indiano (Barrera, 1993).

3.1.2 – Modelos de Biodigestores

3.1.2.1 – Modelo indiano

O modelo de biodigestor indiano possui uma campânula flutuante como gasômetro que pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou em um selo de água externo, para reduzir perdas durante o processo de produção de gás. Possui ainda uma parede central, fazendo do tanque de fermentação um tanque de câmara dupla, como pode ser visto na Figura 1. À medida que o volume de gás produzido não é imediatamente consumido, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, aumentando seu volume e mantendo a pressão de operação constante. O abastecimento é contínuo, e o substrato utilizado neste modelo deve conter uma concentração de sólidos totais (ST) de até 8%, de modo que sua circulação pelo interior da câmara seja facilitada e para evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material (Deganutti et al, 2002).

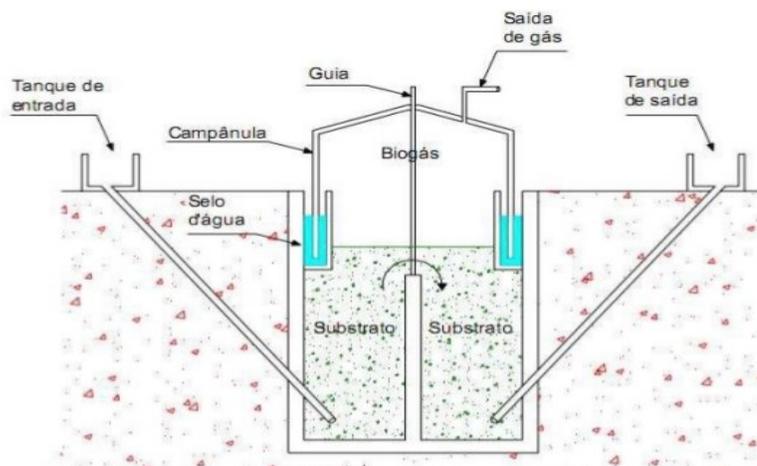


Figura 1. Representação de Biodigestor Modelo Indiano

3.1.2.2 – Modelo chinês

O modelo de biodigestor chinês é formado por uma câmara de fermentação cilíndrica em alvenaria, com teto abobado (Figura 2), impermeável que armazena o biogás gerado. O aumento de pressão em seu interior devido ao acúmulo de biogás resulta no deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a saída. Como no modelo indiano, o modelo chinês necessita de um substrato com teor de ST em torno de 8% para evitar entupimentos no sistema de entrada e facilitar a circulação do material, e a alimentação também deve ser contínua (Deganutti et al, 2002).

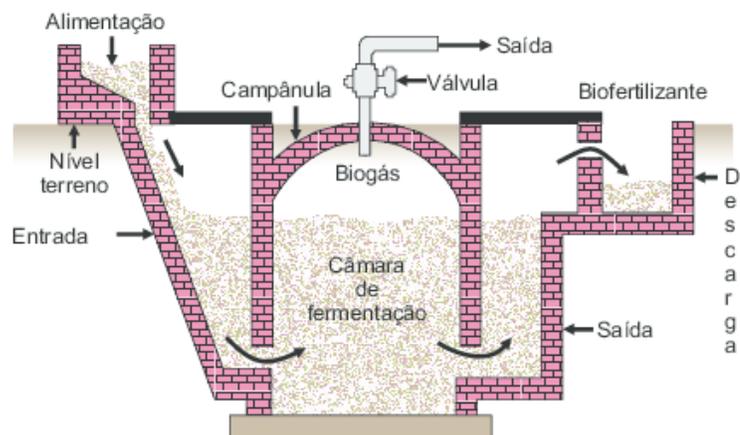


Figura 2. Representação de Biodigestor Modelo Chinês

3.1.2.3 – Modelo Canadense (Modelo da Marinha)

O biodigestor de modelo canadense, desenvolvido pela Marinha Brasileira em 1970, apresenta uma tecnologia mais moderna, ainda que possua uma construção simples. Possui uma câmara de digestão escavada no solo e um gasômetro inflável feito de material plástico ou similar. É do tipo horizontal, com uma caixa de entrada em alvenaria, como pode ser observado na Figura 3. À medida que o biogás é produzido, a cúpula plástica maleável é inflada e o biogás é acumulado, ou pode ser enviado a um gasômetro separado para se obter um maior controle operacional (Junqueira, 2014). Em comparação ao modelo Indiano, o modelo da Marinha apresenta a vantagem de poder receber grande quantidade de resíduos.

Em comparação com o modelo Chinês, a vantagem está no fato de aquele sofrer rachaduras e danos na sua estrutura devido à composição do solo brasileiro que sofre muita acomodação, o que pode provocar perda de gás e exige monitoramento e manutenção constantes (Oliveira, 2006).

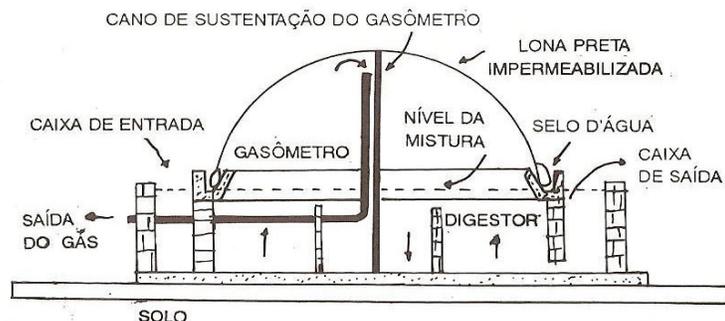


Figura 3. Representação de Biodigestor Modelo Canadense

3.2 – Biomassa

Por biomassa denominam-se quaisquer materiais passíveis de decomposição pela ação de diferentes tipos de microrganismos. A biomassa decomposta sob a ação de bactérias metanogênicas produz biogás sob condições específicas que incluem: temperatura, pH, relação C/N, presença ou não de oxigênio, nível de umidade e quantidade de bactérias por volume de biomassa. Sendo o objetivo de estudo desse trabalho a produção de biogás a partir de resíduos alimentares, estes serão considerados a matéria-prima a ser utilizada pelo modelo de biodigestor canadense, que apresenta desempenho satisfatório com relação à produção de biogás e maior facilidade operacional.

Para Seixas et al. (1980), após a escolha do modelo de biodigestor deve-se analisar a quantidade de biomassa disponível para utilização. Só assim será possível calcular a capacidade real de produção de biogás após ser instalado o biodigestor.

Oliveira (1994) adverte que nas primeiras semanas a quantidade de gás carbônico é bem superior à do metano, embora tal desproporção desapareça com o tempo. Convém advertir o fato de que a produção de biogás a partir de resíduos de alimentos varia não só em função da relação C/N encontrada nos dejetos, mas também das condições que cada deposição oferecerá para a proliferação bacteriológica. Por essa razão, muitos biodigestores, ditos de

alimentação intermitente, são projetados a fim de reter a biomassa em seu tanque digestor por um período de aproximadamente 30 dias.

A biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, e também de resíduos orgânicos, nos quais encontram-se os resíduos urbanos, agrícolas e industriais. Assim como também se pode obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais, por exemplo, mamona e soja. A utilização da biomassa, como fonte de matriz energética, por países que aderiram a tal tecnologia, tem sido reconhecida como precursora de um ato estratégico para o futuro, pois trata-se de uma fonte renovável com baixo custo, com aproveitamentos dos resíduos que ainda podem ser utilizados como biofertilizantes, sem contar seu potencial menos poluente em relação às fontes convencionais (Cortez, et al., 2008).

3.3 – Biogás

Através da conversão de biomassa em energéticos pode-se obter o biogás que é uma mistura gasosa produzida a partir da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, composto de 55-70% de metano (CH_4) e 30-45% dióxido de carbono (CO_2), com pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), traços de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), monóxido de carbono (CO), carboidratos e oxigênio (O_2), segundo Deublein and Steinhäuser (2008).

Segundo Oliver et al., (2008), o biogás é um gás combustível com a queima de forma limpa, e renovável, sendo usado como combustível e fonte de energia alternativa. Seu poder calorífico varia de 5000 a 7000 Kcal/m³. Pode-se comparar a relação de 1m³ de biogás com outras fontes de energia (Tabela 1).

Tabela 1. Relação para 1 litro de biogás com outras fontes de energia

0,61 litros gasolina	0,45 litros de gás de cozinha
0,58 litros de querosene	1,5 quilos de lenha
0,55 litros óleo diesel	0,79 litros de álcool

Fonte: Oliver et al., 2008

3.4 – Fermentação anaeróbica

O processo de digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica levando à formação de metano, produtos inorgânicos (dióxido de carbono) e resíduo líquido rico em minerais que pode ser utilizado como biofertilizante (matéria orgânica estabilizada). A representação da digestão anaeróbia pode ser feita pela equação 1 (Kelleher et al., 2002).



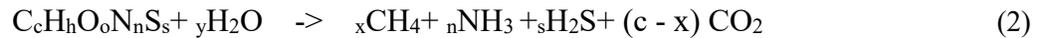
A digestão anaeróbia é um processo de fermentação simples que pode ocorrer em uma lagoa anaeróbia ou em um tanque. A degradação anaeróbia da matéria orgânica a metano é um processo biológico que ocorre em diferentes fases, sob ação de microorganismos que atuam de forma simbiótica (Kelleher et al., 2002). Isso torna necessária a representação do processo anaeróbio incluindo outras populações de bactérias intermediárias.

Essas bactérias ou microrganismos são os hidrolíticos, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos. As bactérias acidogênicas e as arqueas metanogênicas apresentam características diferentes, principalmente em relação às exigências nutricionais, a fisiologia, o pH, o crescimento e a sensibilidade quanto a variações de temperatura (Chernicharo, 1997). Em relação à velocidade de reprodução, quando comparadas às bactérias acidogênicas, as arqueas metanogênicas apresentam menor velocidade além de serem mais sensíveis às condições adversas ou alterações das condições ambientes.

3.5 – Formação do biogás

A formação do metano ocorre de forma espontânea em ambientes isentos de ar, quando a biomassa ou matéria orgânica cuja composição é feita por carboidratos, lipídeos, proteínas entre outros nutrientes, ainda na presença de bactérias, se decompõem formando metano e impurezas. Parte do dióxido de carbono produzido se liga à amônia, enquanto o enxofre fica como resíduo, resultando em uma composição do biogás de CH₄:CO₂: 71%: 29%.

A formação do biogás a partir da biomassa resulta, em geral, da equação 2:



O processo anaeróbico passa necessariamente por quatro fases a nível bacteriano, sendo elas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, na qual a geração do biogás ocorre na última etapa do processo. Durante o processo de produção, é indispensável que as reações químicas ocorram de forma sinérgica, sendo que as fases 1-2 e 3-4 possuem uma relação íntima, logo as mesmas são organizadas em dois estágios, em que os níveis de degradação devem ter o mesmo tamanho (Deublein e Steinhäuser, 2008). A Figura 4 representa o conjunto dos processos bioquímicos envolvidos na formação do biogás.

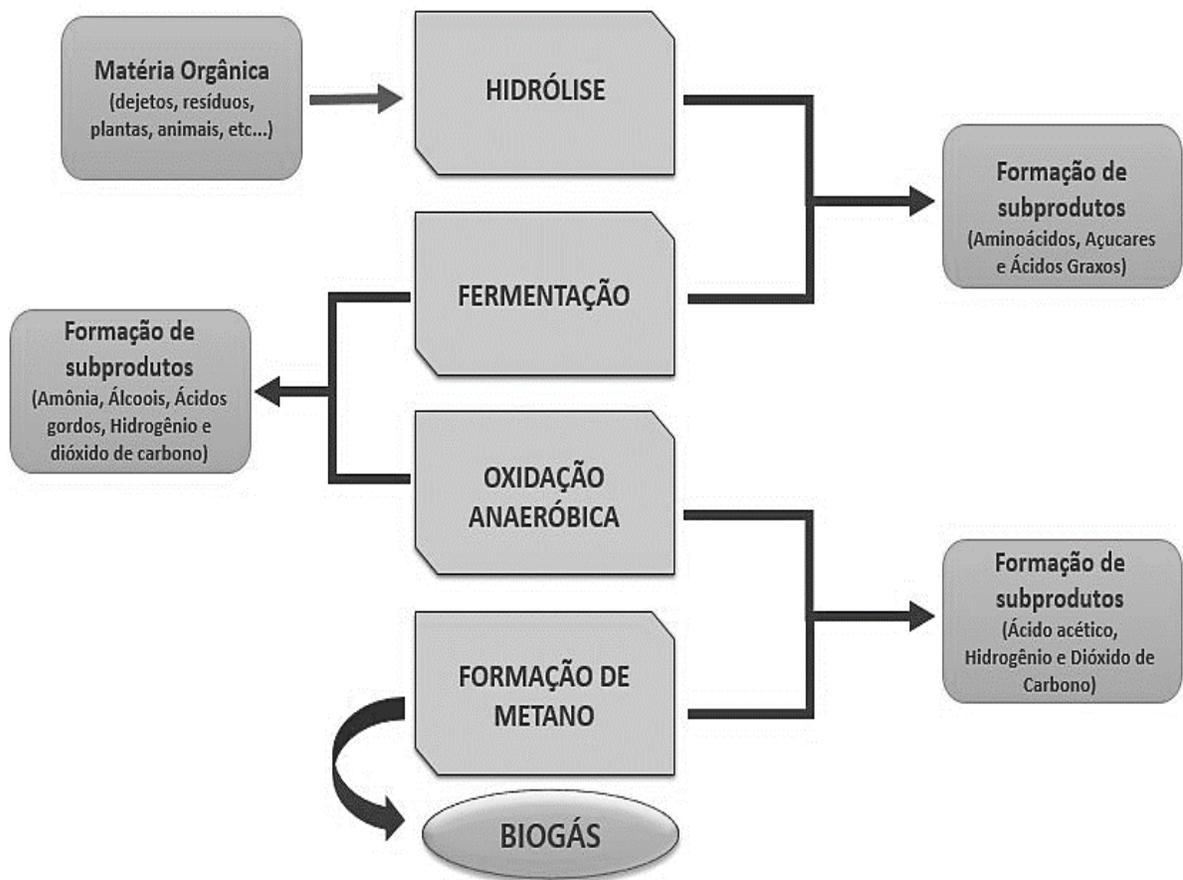
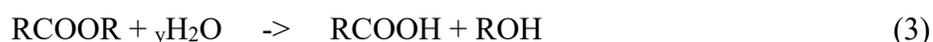


Figura 4. Etapas de produção do biogás.

Fonte: <<<http://www.ecycle.com.br>>> Acesso em 23/05/2017

3.5.1 – Hidrólise

Na hidrólise as ligações moleculares complexas como carboidratos, proteínas e gorduras, são quebradas por enzimas em um processo bioquímico, sendo liberadas por um grupo específico de bactérias e dão origem à compostos orgânicos simples (monômeros) como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares como mostrado na equação 3.



Existem diversos tipos de hidrólise que variam em função da matéria orgânica utilizada, como por exemplo, a hidrólise de glicosídeos para a formação de açúcares e de proteínas para aminoácidos. Esse processo é de fundamental importância para a produção de biogás, pois dada a quebra dos polímeros maiores, inicia-se o processo de biodigestão.

3.5.2 – Acidogênese

Na acidogênese as substâncias resultantes da hidrólise são transformadas por bactérias acidogênicas em ácido propanóico, ácido butanóico, ácido láctico e álcoois, assim como hidrogênio e gás carbônico. A formação de produtos nesta fase também depende da quantidade de hidrogênio dissolvido na mistura. Quando a concentração de hidrogênio é muito alta, esta interfere negativamente na eficiência da acidogênese, o que causa o acúmulo de ácidos orgânicos. Com isso, o pH da mistura é reduzido e o processo é afetado.

3.5.3 – Acetogênese

A acetogênese é a fase na qual os materiais resultantes da acidogênese são transformados em ácido etanóico, hidrogênio e gás carbônico por bactérias acetogênicas. Essa é uma das fases mais delicadas do processo, considerando que é necessário manter o equilíbrio para que a quantidade de hidrogênio gerado seja consumida pelas bactérias Arqueas responsáveis pela metanogênese.

3.5.4 – Metanogênese

Durante a metanogênese na biodigestão anaeróbia, o ácido acético, o hidrogênio e dióxido de carbono são finalmente convertidos em metano e gás carbônico através da ação de microrganismos metanogênicos classificados no domínio das Archeas, conhecido como distinto das bactérias devido a suas características genéticas. As Archeas possuem características únicas e particulares que as permitem viver em ambientes específicos onde aceptores de elétrons como, por exemplo, oxigênio (O₂) e Nitrato (NO₃⁻) são ausentes ou existentes em baixas concentrações. Desta forma, a metanogênese pode ser considerada como sendo uma respiração anaeróbia onde o gás carbônico ou o grupo metil de compostos C-1, ou carbono do grupo metil do acetato é o aceptor de elétrons.

As Archeas são divididas em dois grupos principais em função de sua fisiologia. Enquanto os microrganismos metanogênicos hidrogenotróficos utilizam o hidrogênio e dióxido de carbono, os metanogênicos acetoclásticos utilizam basicamente o ácido acético e metanol para a geração de metano e gás carbônico. As reações 4 e 5 representam respectivamente a ação de cada um dos tipos das Arqueas mencionadas.



a) Metanogênicas acetoclásticas

Em se tratando de quantidades, as metanogênicas acetoclásticas estão em número muito menor no fermentador, sendo os principais grupos representantes: *Methanosarcina thermophila*, *Methanosaeta* e *Methanohalophilus portucalensis*. Apesar de ter menos representatividade nas Archeas, este grupo é responsável por cerca de 60 a 70% do metano produzido a partir do grupo metil do ácido acético. O grupo *Methanosarcina thermophila*, mostrada na Figura 5 tem como característica a utilização exclusiva de acetato enquanto que os outros grupos podem utilizar hidrogênio e dióxido de carbono para a geração de metano.



Figura 5. *Archea Methanosarcina thermophila*

Fonte: Site da Universidade de Regensburg (Alemanha) – Departamento de Bioquímica.

Acesso em 23/05/2017

b) Metanogênicas hidrogenotróficas

Com exceção da *Methanosarcina*, praticamente todas as outras Archeas são capazes de produzir metano a partir de hidrogênio e gás carbônico, processo que libera uma maior quantidade de energia. Entre as famílias que se destacam pode-se citar as *Methanosarcina*, *Methanohalophilus*, *Methanomicrobium* e *Methanoculleus*.

Segundo Bauer 2008, em biodigestores com alta carga orgânica volumétrica que utilizam substratos de origem agrícola, existe uma predominância de bactérias que utilizam o hidrogênio e dióxido de carbono para a geração de metano. Neste tipo de biodigestor, somente fermentadores com relativa baixa carga orgânica volumétrica tem predominância de bactérias metanogênicas acetoclásticas.

Devido à pequena taxa de crescimento da população bacteriana na metanogênese, além da sensibilidade das bactérias às mudanças bruscas de ambiente, a metanogênese é normalmente a fase mais sensível da biodigestão. Por esta razão, os projetos de biodigestão anaeróbia precisam levar em consideração as condições ideais de meio ambiente para a fase da metanogênese, visando à melhoria da eficiência de conversão das outras fases da biodigestão.

Ao contrário do que acontece na etapa anterior, na metanogênese observa-se uma grande quantidade de reações exotérmicas, portanto, termodinamicamente favorecidas, com destaque para a geração de metano a partir de hidrogênio e gás carbônico, onde há uma grande quantidade de energia liberada, pelo menos quatro vezes mais energia liberada do que a segunda reação mais importante a partir de acetato.

Algumas Archeas como a *Methanosaeta* só conseguem realizar um tipo de reação com posterior geração de metano, neste caso a base de acetato, enquanto outras como a *Methanosarcina*, mostrada na Figura 6 são capazes de gerar metano a partir de ácido acético e também de hidrogênio e gás carbono.

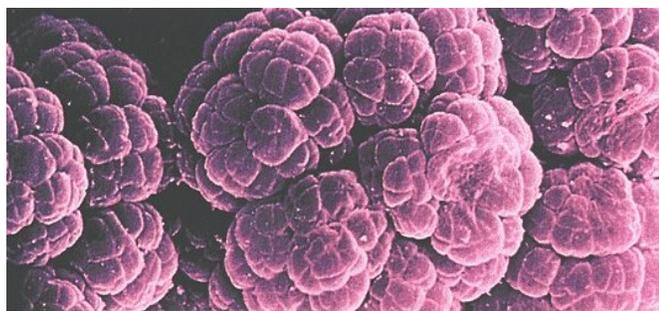


Figura 6. *Archea Methanosarcina*

Fonte: <<<http://microbiologyonline.org>>> acesso em 29/05/2017

Apesar de em suas reações as archeas metanogênicas acetoclásticas liberarem menos energia em relação as hidrogenotróficas, estas são capazes de processar gás carbônico para a produção de metano, colaborando com a redução da quantidade final de gás carbônico do biogás produzido. Essa característica é explorada por tecnologias mais modernas no intuito de se gerar biogás com um percentual cada vez maior de metano.

O acetato normalmente é formado pela desidrogenação acetogênica de produtos resultantes das fases de hidrólise e fermentação, podendo ocorrer também através do processo inverso, ou seja, da hidrogenação acetogênica a partir de hidrogênio e gás carbônico resultante do próprio processo de fermentação. A partir da descarboxilação do acetato é possível obter metano e gás carbônico enquanto que a formação redutiva do metano a partir de hidrogênio e gás carbônico resulta também em água (Machado, 2016).

3.6 – Condições operacionais

Por se tratar de um processo bioquímico realizado por milhares de bactérias, a eficiência da digestão anaeróbia pode ser seriamente afetada por fatores que estão relacionados com o meio ideal para sua atuação, considerando o tipo de substrato, as características do digestor e as condições de operação.

3.6.1 – Concentração de nutrientes

A presença de alguns macronutrientes como o carbono, nitrogênio, potássio, fósforo e enxofre, alguns micronutrientes minerais, vitaminas e aminoácidos são necessários para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas, sendo assim, o conhecimento da composição química e o tipo de biomassa utilizada são importantes. Se for necessário, pode ser feita a dosagem de nutrientes e ativadores químicos para que ocorra uma boa fermentação da biomassa (Filho, 1981).

3.6.2 – Condições de pH: acidez ou alcalinidade

As variações de acidez seguem o mesmo princípio da temperatura, na qual cada grupo de bactérias possui seu ponto ideal de acidez. Nas fases da hidrólise e da acidogênese, o pH ideal fica em torno de 5,2 à 6,3.

Já na acetogênese e metanogênese o pH ideal fica entre 6,5 à 8. Abaixo do pH crítico pode haver precipitação dos íons metálicos, bem como inibição da ação bacteriana, devido à produção de ácidos, visto que a parede celular bacteriana é mais permeável às moléculas não dissociadas em comparação com suas formas ionizadas. Acima do pH crítico, a partir do qual a concentração de íons carbonato disponíveis é elevada, os metais pesados passam a ser precipitados na forma de carbonatos, e neste caso é acentuada a influência do pH.

3.6.3 – Temperatura

A fermentação anaeróbica é influenciada diretamente pela temperatura, podendo ser agilizada e, conseqüentemente, diminuindo o tempo de retenção da massa no interior do biodigestor. Além disso, a porcentagem de metano na constituição do biogás é maior quando o processo de fermentação ocorre em temperaturas mais elevadas, o que garante um maior poder calorífico à mistura. Assim, com o funcionamento na faixa de temperatura adequada, o biodigestor poderá ter seu volume diminuído pela metade ou menos, para o mesmo volume de gás produzido, representando economia de material na construção, ou caso seja desejável, apresentando uma maior produção de gás com um volume preestabelecido.

Em um processo anaeróbio, o mais importante é manter uma temperatura constante dentro do reator, devido, principalmente, ao fato de que as arqueas metanogênicas são mais sensíveis a variações bruscas de temperatura (Barrera, 2003), apesar de que a formação de metano pode ocorrer em condições extremas, entre 0 a 97°C.

As arqueas metanogênicas podem ser divididas em dois grupos, as mesofílicas, que atuam em temperaturas situadas na faixa de 20 a 40°C, e as termofílicas, que atuam na faixa de 50 a 60°C. O processo de digestão e gaseificação é altamente acelerado à temperaturas entre 35 e 37°C. Para temperaturas inferiores a 35°C o processo de digestão é menor e, para temperaturas inferiores a 15°C, a produção é muito reduzida, podendo ser cessada (Barrera, 2003).

A velocidade de digestão anaeróbica é maior a temperaturas termofílicas em relação às mesofílicas; além disso, a operação na faixa termofílica resulta em lodos mais facilmente desidratáveis e em maior remoção de agente patogênicos. Porém, os custos relativos ao aquecimento inviabilizam a utilização de temperaturas termofílicas, com exceção dos casos em que os resíduos já são gerados a temperaturas relativamente elevadas.

3.6.4 – Tempo de detenção hidráulica

Tempo de detenção hidráulica é o tempo que o material permanece no interior do biodigestor, ou seja, tempo entre a entrada do efluente e a saída do afluente do digestor. De acordo com os diferentes substratos utilizados para a alimentação do biodigestor, e dos demais

fatores, o tempo de retenção varia de 4 a 60 dias (Mazzucchi, 1980; Filho, 1981). Para o substrato composto de resíduos de matéria orgânica o tempo de detenção situa na faixa de 20 a 30 dias, sendo que com 30 dias a carga orgânica já sofreu grande redução e devido a isso, a produção de biogás já atingiu seu máximo e a partir desse ponto passa a decair (Beux, 2005).

O tempo de retenção hidráulica pode ser obtido pela relação entre o volume de mistura líquida do biodigestor e a carga diária. Durante o tempo de retenção, a matéria orgânica é degradada e ocorre a produção de biogás.

3.6.5 – Fatores relativos à operação do biodigestor

Embora os possíveis fatores que podem influenciar o processo de digestão estejam controlados, podem ocorrer falhas operacionais que levam a um desempenho não satisfatório do processo. Essa verificação deve ser feita no *startup* do processo para garantir uma partida adequada. É conveniente que o biodigestor seja preenchido com a maior quantidade possível de matéria orgânica, e se possível, com materiais que já contenham microrganismos anaeróbicos (principalmente metanogênicos), previamente diluídos.

Após a partida da operação, deve-se evitar ou combater alterações nas condições ideais do ambiente e sobrecarga orgânica, hidráulica ou tóxica, através de determinações e controles de vazões, concentração de matéria orgânica, compostos tóxicos compatíveis com o resíduo a ser digerido, temperatura, pH, ácidos voláteis, alcalinidade, nitrogênio total, volume e composição dos gases produzidos. Desde que o resíduo orgânico seja bem caracterizado, e que não sofra muitas variações ao longo do tempo, essas determinações podem ser efetuadas eventualmente ou até evitadas. Além disso, é importante a verificação de vazamentos dos gases produzidos, pois isso pode levar a conclusões enganosas do funcionamento inadequado do processo.

3.7 – Inóculo

Vários estudos têm sido realizados com intuito de viabilizar a produção de biogás por outros métodos. Neste contexto, a adição de inóculo se destaca por utilizar parte do material que já passou pelo processo, capaz de fornecer ao novo substrato uma população adicional de

microrganismos típicos da biodigestão anaeróbia. Em sistemas de alimentação batelada, o biodigestor é preenchido totalmente em uma única vez com os resíduos orgânicos, com ou sem adição de inóculos. Alguns estudos mostram que com a introdução de inóculos no meio, o desempenho do biodigestor tem sido satisfatório, principalmente devido a aceleração do processo de bioestabilização anaeróbia dos resíduos, já que contribui para a melhora da densidade microbiana.

Devido à sua simplicidade operacional, os sistemas em batelada são mais utilizados em locais onde a disponibilidade de matéria orgânica é dada por períodos longos, por essa razão a produção de biogás não ocorre diariamente (Bonturi e Van Dijk, 2012). Vale ressaltar que o sistema anaeróbio não é verificado imediatamente após a inserção do material no reator. É necessário um tempo de detenção, para que haja um crescimento dos microrganismos presentes e conseqüente equilíbrio do sistema. O uso de inóculo pode ser importante tanto nos estudos sobre fermentação anaeróbica quanto no ponto de partida de reatores (Souto, 2005).

Ao término do período de tratamento, remove-se os resíduos estabilizados e inicia-se um novo ciclo a partir da introdução de uma nova batelada de resíduos. Uma vez iniciado, o processo em batelada não exige que o substrato seja homogeneizado ou misturado, o que permite a presença de impurezas no substrato sem que o equipamento esteja sujeito a danos. A utilização de inóculo é um processo de tratamento conjunto, por meio da digestão anaeróbia, de diferentes tipos de substratos. Devido à variedade nas características físico-químicas dos substratos, a combinação delas permite o aumento da produção de biogás por volume de digestor ocupado.

Considerando que no início do processo de degradação a quantidade de ácidos e hidrogênio é maior em função da taxa de geração das bactérias formadoras de ácido, a adição de uma quantidade suficiente de organismos metanogênicos pode prevenir o desequilíbrio. Normalmente são usados como inóculos lodo de esgoto digerido, lodo de UASB, estrume, resíduo digerido e lixiviado (Pinto, 2000).

A principal limitação da fermentação anaeróbia se deve à acidificação do meio, provocando diminuição do pH no interior do reator. Isso ocorre em função da grande quantidade de matéria orgânica biodegradável dos inóculos. Além disso, há aumento da produção de ácidos graxos voláteis, com conseqüente inibição da atividade metanogênica (Bouallagui et al., 2004). Sendo assim, para promover o controle de acidez durante o

processo, utiliza-se inóculo com capacidade de tamponamento. Como a quantidade ideal de inóculo (em termos percentuais) a ser adicionada no biodigestor não é conhecida, esta será dependente da atividade metanogênica do inóculo e da taxa de produção inicial do substrato. Para calcular a quantidade de inóculo utiliza-se a Equação 6.

$$FI = \frac{ST_i}{ST_i + ST_s} \quad (6)$$

Na qual:

FI = fator de inóculo;

ST_i = sólidos totais do inóculo;

ST_s = sólidos totais do substrato.

A Tabela 2 apresenta o resumo de dados de estudos em sistemas experimentais sobre fermentação anaeróbica, indicando a gama de possibilidades de utilização de resíduos sólidos orgânicos como inóculo.

Tabela 2. Dados de alguns estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos sólidos.

Referência	Resíduo	Inóculo	ST (%)	Temperatura (C)	Td (dias)	Eficiência (%)
Del Borghiet al. (1999)	Resíduos de cozinha triturado	Lodo primário e secundário	1-4	55	12	56-63 (STV)
Pavan et al. (1999a)	Frutas e verduras	-	8	35-56	11-12	67-84 (STV)
Xu et al. (2002)	Alimentos	Lodo de digestor e de reator UASB	10	35	16	60 (SVT)
Wang et al. (2003)	Alimentos	Lodo de digestor e de reator UASB	10	35	36	78 (SVT)
Bouallaguiet al. (2004)	Frutas e verduras	Lodo de digestor	4, 6 e 10	20, 35, 55	20	54-87 (SVT)
Mtz. Viturtiaet al. (1995)	Frutas e verduras	Esterco bovino e suíno	6	35	4,5-18	27-72 (STV)

Fonte: Barcelos (2009)

De acordo com os dados apresentados é possível observar que o uso de inóculos representa um potencial como alternativa tecnológica para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos, com a possibilidade de acelerar a digestão anaeróbica.

4 – Metodologia

4.1. Caracterização do local e quantitativo

Para fins de avaliação do processo de produção de matéria orgânica do restaurante universitário (RU) da Universidade Federal de Uberlândia – UFU, coletou-se ao longo de uma semana os dados referentes a massa de toda matéria orgânica processada diariamente.

A caracterização dos resíduos sólidos e a fração orgânica foram determinadas através do trabalho realizado por Pinto (2000). Com as informações fornecidas pela administração do restaurante universitário, foi obtido o fluxo de alunos que frequentam o RU durante um período semanal determinado, e assim foi possível determinar a média de resíduos sólidos por quantidade de usuários. O $R_{sólidos}$ representa o valor médio diário em uma semana de coleta de resíduos, que será utilizado no dimensionamento do Biodigestor.

4.2. Dimensionamento e caracterização do Biodigestor

Na segunda etapa determina-se como será a elaboração e o dimensionamento teórico do biodigestor, tendo como base o valor de $R_{sólidos}$. O Peso Total da Mistura diária que alimentará o Biodigestor foi representado pela soma do $R_{sólidos}$, do inoculante, do $NaCO_3$ (tamponamento) e do Teor de Umidade da mistura. Para essa determinação o projeto seguiu Pinto (2000), no qual pode-se apurar os seguintes parâmetros para o cálculo: Inoculante (Si) – FI (fator de inoculação) = 0,2; Tamponamento - $NaCO_3$ = 0,06 kg/kg de inoculante; Teor de Umidade (T.U) = 0,58 L/Kg de inoculante. Assim, os valores dos elementos constituintes da mistura foram determinados da seguinte maneira:

a) Inoculante:

Utilizou-se a equação 6 para a determinação da massa de inóculo a ser utilizada.

b) NaCO₃ :

A quantidade de NaCO₃ utilizada foi calculada através da equação 7.

$$\text{Tamponamento} = 0,06 \text{ kg/kg} \times \text{STi} \quad (7)$$

Na qual 0,06 (kg/kg) = fator que relaciona o tamponamento com o inoculante;

c) H₂O (água)

Utilizando-se a equação 8, foi possível determinar a quantidade de água contida na mistura.

$$\text{H}_2\text{O} = 0,58 \text{ L/kg} \times \text{STi} \quad (8)$$

Na qual 0,58 L/kg = fator que relaciona o percentual de H₂O com o teor de umidade encontrado na matéria orgânica. O cálculo do peso total da mistura – diária (PTM_d) foi dado pela equação 9.

$$\text{PTM}_d = \text{STs} (\text{kg}) + \text{STi} (\text{kg}) + \text{NaCO}_3(\text{kg}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \quad (9)$$

4.3 - Tempo de Detenção Hidráulica (TDH)

O Tempo de Retenção Hidráulica (TDH) é o tempo necessário para ocorrer a digestão anaeróbia da mistura, quando ocorre a máxima produção gás, definindo o ponto de melhor qualidade do biogás no processo de biodigestão anaeróbia. O tempo de detenção é determinado, num processo contínuo, pela relação entre volume do digester e o volume diário de carga introduzida, isto é, de matéria orgânica adicionada (Magalhães, 1986). O tempo de detenção hidráulica e a eficiência do biodigestor serão obtidos em função do inoculante utilizado.

4.4 - Volume diário da mistura

O cálculo do volume diário da mistura pode ser determinado com a equação:

$$V_d = \text{PTM}_d / \rho_a \quad (10)$$

Na qual,

V_d = Volume do biodigestor;

PTM_d = Massa total da mistura diária (kg);

ρ_a = densidade da água.

4.5 - Volume total do Biodigestor

O cálculo do volume do biodigestor deve contemplar o volume ocupado pela mistura durante o tempo de detenção hidráulica, além do volume ocupado pelos gases produzidos ao longo da fermentação anaeróbica. Este volume pode ser calculado conforme a equação 12.

$$\text{Volume do tanque} = (V_d \times \text{TDH}) \times (1 + f) \quad (11)$$

Na qual,

V_d = Volume do biodigestor;

TDH = Tempo de detenção hidráulica (dias);

f = fator do volume da mistura ocupado pelos gases produzidos.

5 – Resultados e Análises

Os resíduos sólidos orgânicos do RU são gerados principalmente durante o processo de manipulação e produção dos alimentos, sendo feita uma prévia seleção dos alimentos impróprios para consumo e retirada dos resíduos alimentares descartados. Após a

etapa de preparo, o alimento é encaminhado para o consumo, havendo a formação dos resíduos alimentares, representada pela matéria orgânica desperdiçada pelos usuários do Restaurante Universitário.

A determinação do peso dos resíduos sólidos foi realizada ao longo do funcionamento diário por um período de uma semana, considerando as três refeições servidas, e pesando o material em galões de plástico antes de ser descartá-lo. Toda a matéria orgânica se encontrava misturada, ou seja, não houve separação dos resíduos descartados. Com base na pesquisa realizada em uma semana, foi determinado o valor da massa total média de resíduos sólidos descartada pelo restaurante, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Massa de resíduos sólidos orgânicos

Média $R_{\text{sólidos}}$ / usuário (g)	Média de usuários (1 dia)	$R_{\text{sólidos}}$ / dia (kg)
85,88	3260	$0,08588 \times 3260 = 280$

O valor de $R_{\text{sólidos}}$ foi utilizado no dimensionamento do biodigestor para compensar a variação semanal, considerando menor fluxo aos sábados e fechamento aos domingos e feriados.

5.1 – Dimensionamento e caracterização do Biodigestor

Com base na estimativa de sólidos orgânicos descartados por dia, realizou-se o dimensionamento teórico do biodigestor. O peso total de mistura diária que alimenta o biodigestor (PTM_d) foi representado pela soma dos $R_{\text{sólidos}}$, do inoculante, do $NaCO_3$ (tamponamento) e o teor de umidade da mesma. Seguindo Pinto (2000), utilizaram-se os seguintes parâmetros de cálculo: Inoculante (Si) – FI (fator de inoculação) = 0,2; Tamponamento - $NaCO_3$ = 0,06kg/kg de inoculante; Teor de Umidade (T.U) = 0,58L/Kg de inoculante; Inoculante (Si) = $280 \times 0,2 / 0,8 = 70$ kg

a) $NaCO_3$ (carbonato de cálcio)

Tamponamento = $0,06 \times Si$

Onde,

$0,06 \text{ kg/kg}$ = fator de relação com o inoculante; S_i = Inoculante (kg)

Tamponamento = $0,06 \times 70 = 4,2 \text{ Kg}$.

b) H₂O (água)

$\text{H}_2\text{O} = 0,58 \text{ L/kg} \times S_i = 40,6 \text{ kg}$

Onde,

$0,58 \text{ L/kg}$ = fator que relaciona o percentual de H₂O com o teor de umidade encontrado na matéria orgânica.

S_i = inoculante (kg)

Portanto, a massa total da Mistura – diária (PTM_d) foi dada por:

$\text{PTM}_d = 280 + 70 + 4,2 + 40,6 = 430,8 \text{ kg}$.

5.2 – Tempo de Detenção Hidráulica

Segundo Barcelos (2009) o tempo de detenção hidráulica foi obtido em função do inoculante utilizado.

TDH (inoculante – resíduos alimentares) = 20 dias

Eficiência do Biodigestor (Barcelos (2009), Tabela 2) = 54 a 87%

5.3 – Volume diário ocupado pela mistura

Para a determinação do volume ocupado pela mistura considerou a densidade de cálculo no valor de 1 g/ml . Sendo a densidade da mistura ser superior ao valor considerado, o valor obtido será superior ao real, sendo esse volume adicional considerado como margem de utilização e demanda do Biodigestor. Utilizando a equação 10 foi possível obter o seguinte resultado:

$V_d = 430,8 \text{ Kg} / 1.000 \text{ kg/m}^3 = 0,4308 \text{ m}^3 = 0,44 \text{ m}^3$ volume de mistura diária

5.4 – Volume do Biodigestor

O volume do tanque para atender o período de 20 dias de tempo de detenção e um volume adicional destinado ao ocupado pelos gases produzidos, cujo fator é de 0,3, conforme a equação 12.

$$\text{Volume do tanque} = (0,44 \times 20) \times (1 + 0,3) = 11,44\text{m}^3$$

5.5 – Controle de Temperatura

O controle da temperatura pode ser feito através de um sistema de aquecimento solar. O biodigestor deve ser construído com material isolante térmico (lã de vidro) com espessura de 75mm (Lustosa, 2014), evitando trocas térmicas com o ambiente e reduzindo os gastos de energia para manter o sistema na temperatura ideal de degradação da matéria orgânica. É importante ressaltar que a manutenção da temperatura é fator determinante para a eficiência do biodigestor e redução do tempo de detenção da matéria orgânica no biodigestor.

5.6 – Produção e utilização do gás metano

Utilizando como referência a informação de que a quantidade equivalente a uma tonelada de sólidos voláteis produz cerca de 400 m³ metano em condições normais de temperatura e pressão (Ferreira, 2015). Sendo a massa específica do metano 0,717kg/m³, foi possível obter uma aproximação do volume teórico de metano produzido, utilizando a porcentagem média de STV (a quantidade em quilogramas de resíduo a ser degradado) de 60% para inóculo de lodo de digestor. Sendo a massa média diária de resíduos sólidos proveniente do RU de aproximadamente 280kg por dia, utilizando a massa específica do metano igual a 0,717kg/m³, obteve-se um volume diário de gás metano igual a 93,72m³.

A Tabela 4 sumariza os resultados obtidos para a proposta de utilização de um biodigestor de modelo canadense, com a adição de inóculo de lodo de digestor por um período de detenção de aproximadamente 20 dias.

Tabela 4. Resumo dos resultados obtidos

Resíduos sólidos	280 kg/dia
Inoculante	70kg
Tamponamento	4,2kg
Água	40,6kg
Volume diário da mistura	0,44m³
Volume do tanque	11,44m ³
Produção de gás metano	93,72m³
Eficiência (Bouallaguet al. (2004))	54 – 87%

Um potencial local para instalação do biodigestor de modelo canadense seria o novo Campus da Universidade Federal de Uberlândia, ainda em construção, Campus Glória, localizado na Zona Sul de Uberlândia - BR-050, conforme apresentado na Figura 7.



Figura 7. Localização do Campus Glória

Vale ressaltar que algumas verificações devem ser feitas para testar a viabilidade de instalação do biodigestor, como pode-se citar: dimensões do local, adequação do subsolo (verificar se este é isento de contaminação), além de facilidade de rotas para o fluxo de caminhões e distância segura dos blocos de aulas e passagem de pedestres, devido a possível mal odores produzidos durante o processo de fermentação.

Conforme as especificações do local e a destinação final do gás planejada, pode-se decidir sobre o tipo de aproveitamento energético do biogás gerado.. O gás metano produzido pode ser destinado imediatamente como fonte de energia para a produção dos alimentos no Restaurante Universitário, em substituição ao gás de cozinha (GLP) usualmente utilizado nessa instalação, devido à alta capacidade calorífica desse produto. De acordo com a Tabela 1, a relação energética de 1L de biogás está para 0,45L de gás de cozinha, o que representaria uma alternativa economicamente viável para a universidade. Além disso, o gás remanescente não consumido pode ser utilizado em associação a um motor para cogeração de energia elétrica, podendo assim suprir o gasto de energia para a iluminação do próprio restaurante.

6 – Conclusões e recomendações

Diante da necessidade de obtenção e aperfeiçoamento de tecnologias econômicas e ambientalmente sustentáveis para a geração de energia, a utilização de biodigestores para a produção de biogás como combustível representa um potencial expressivo nesse cenário, devido principalmente ao elevado poder calorífico do gás produzido. O processo anaeróbio de produção do biogás com utilização de matéria orgânica como matéria-prima, requer condições específicas por se tratar de um sistema microbiológico, contudo, mantidas as condições operacionais otimizadas, este constitui um processo eficiente, conforme verificasse nos estudos já realizados.

A opção pelo modelo de biodigestor Canadense se faz viável por se tratar de uma tecnologia mais moderna e avançada, com menor complexidade do sistema, baixo custo de implantação, além de facilidade na operação do mesmo. Vale ressaltar, ainda, algumas características para o tanque proposto, como elevada resistência química e a solventes, baixa

absorção de umidade e estabilidade térmica, resistência a altas temperaturas e impermeabilidade. Outro fator importante é a seleção do local para implantação do biodigestor, na qual faz-se necessário analisar se o local desejado tem o tamanho necessário, se o subsolo é adequado e se possível, isento de contaminação.

Considerando a produção teórica de biogás estimada no presente estudo, foi possível verificar a viabilidade energética de produção desse gás, considerando seu baixo custo de obtenção e sobretudo os benefícios ambientais do aproveitamento dos resíduos alimentares provenientes do Restaurante Universitário. Além do aproveitamento do biogás, os efluentes resultantes da degradação da matéria orgânica podem ser utilizados como um rico fertilizante natural, podendo ser empregado na adubação das áreas de atividade agricultora da própria Universidade. Isso verifica a potencial implantação da proposta, baseando nos requisitos econômicos e sustentáveis do processo anaeróbio abordado.

7 – Referências bibliográficas

AMARAL, C. C. et al. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica**. Revista Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – **Aneel Resolução Normativa nº 89**, de 25 de outubro de 2004.

B. MACHADO, BEZERRA M., G. **Geração e Aproveitamento Energético do Biogás**, Projeto PROBIOGÁS, 2016

BARCELOS, B.R. **Avaliação da partida da digestão anaeróbia da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Domésticos inoculados com diferentes resíduos agropecuários**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90 p. 2009.

BARRERA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. São Paulo: Ícone, 1993.

BAUER, C.; KORTHALS, M.; GRONAUER, A.; LEBUHN, M. **Methanogens in biogas production from renewable resources – a novel molecular population analysis approach**. Water Sci. Tech. 2008, 58, No. 7, S. 1433–1439.

BEUX, S. **Avaliação do tratamento de efluentes de abatedouro em biodigestores anaeróbicos de duas fases**. 2005. 99p. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos, Universidade de Ponta Grossa – UEPG/PR, Ponta Grossa, 2005.

BONTURI, G. de L.; VAN DIJK, M. **Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais**. Revista Ciências do Ambiente Online, v. 8, n. 2, p. 88-95, 2012.

BOUALLAGUI, H.; TORRIJOS, M.; GODON, J. J.; MOLETTA, R. **Two-phases anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: bioreactors performance**. Biochemical Engineering Journal. Rickmanswort, v. 39, n. 21, p. 193 – 197, 2004.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Segrac, 1997, v. 5. 245 p.

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

DEGANUTTI, Roberto et al. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

DEL BORGHI, A.; CONVERTI, A.; PALAZZI, E.; DEL BORGHI, M. (1999) “**Hidrolisis and thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste**”. *Bioprocess Engineering*, 20: 553-560.

DEUBLEINB, D., STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008 368p.

FILHO, J. A. C. **Biogás, independência energética do Pantanal Matogrossense**. Circular técnica nº. 9. Corumbá, EMBRAPA, 53 p., 1981.

GASPAR, R.M.B.L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo - PR**. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Estratégia Organizacional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

JUNQUEIRA, SLCD. **Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado**. Universidade do Rio Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica DEM/POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M.; O'DWYER, T.F.; SUTTON, D.; LEAHY, M.J. **Advances in poultry litter disposal technology – a review** *Bioresource Technology*. v.83, p. 27-36, 2002.

LUSTOSA, G. N. **Proposta de um biodigestor anaeróbio modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos orgânicos**. Universidade de Brasília, 2014.

MAGALHÃES, Agenor P. T. **Biogás: um projeto de saneamento urbano**. São Paulo: Nobel, 1986, 120p.

MAZZUCCHI, O. A. J. **Biodigestor rural**. São Paulo, CESP, 1980. 29p.

MTZ. VITURRIA, A.; MATA ALVAREZ, J.; CECCHI, F. (1995) “**Two-phase continuous anaerobic digestion of fruit and vegetable waste**”. Resources, Conservation and Recycling. 14: 257- 267.

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

OLIVER, A. de P. M. et al. **Manual de treinamento em biodigestão**. Salvador: Winrock, 2008. 23 p.

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

PAVAN, P.; BATTISTONI, P.; CECCHI, F.; MATA ALVAREZ, J. (1999) “**Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability**”. In: International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste, 2. Barcelona. Proceeding. Barcelona: International Association on Water Quality, 1: 57-64.

PINTO, D. M. C. L. “**Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolado**”. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 175 p. 2000.

SEIXAS, J.; FOLLE, S.; MARCHETTI, D. **Construção e funcionamento de biodigestores**. Brasília: EMBRAPA-DID, Circular técnica n 4, 1980.

SILVA, F. M., et al. **Desempenho de um aquecedor de água a biogás**. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal-SP, vol. 25, no 3, set./dez, 2009.

SOUTO, G. D. B., **“Efeito da variação gradual da taxa de recirculação do lixiviado em reatores anaeróbios híbridos na digestão da fração orgânica dos resíduos sólidos 70 urbanos”**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 91 p. 2005.

WANG, J.Y.; XU, H.L.; ZHANG, H.; TAY, J.H. (2003) **“Semi-continuous anaerobic digestion of food waste using a hybrid anaerobic solid-liquid bioreactor”**. Water Science and Technology. 48 (4): 169-174.

XU, HAI LOU; WANG, JING. YUAN; TAY, JOO HWA. (2004) **“A hybrid anaerobic solid-liquid bioreactor for food waste digestion”** Biotechnology Letters. (24): 757-761.