



Avaliação de Biodigestores em Escala de Bancada para Geração de Biogás de Resíduos Orgânicos

Rafael Costa Esteves

Projeto Final de Curso

Orientadoras

Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

Camila Calicchio Lopes, M.Sc.

Agosto de 2017

AVALIAÇÃO DE BIODIGESTORES EM ESCALA DE BANCADA PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

Rafael Costa Esteves

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Química Industrial.

Aprovado por:

Valéria Castro de Almeida, D.Sc.

Luiz Fernando da Silva Almeida, Químico Industrial

Gullit Diego Cardoso dos Anjos, Eng. Químico

Orientado por:

Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

Camila Calicchio Lopes, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Agosto de 2017

Esteves, Rafael Costa.

Avaliação de Biodigestores em Escala de Bancada para Geração de Biogás de Resíduos Orgânicos/ Rafael Costa Esteves. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2017.

(Projeto Final de Curso) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2017.

Orientadores: Juacyara Carbonelli Campos e Camila Calicchio Lopes

1. Biodigestor. 2. Biogás. 3. Sustentabilidade. 4. Projeto Final de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc. 6. Camila Calicchio Lopes, M.Sc.

“Quando todos pensam o mesmo, ninguém está pensando”

Walter Lippmann

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha família por sempre estar ao meu lado, em especial aos meus pais Ana Costa e Roberto Esteves e à minha irmã Marcela Esteves.

À minha namorada Marina Barbosa pelo companheirismo e paciência fundamentais durante a minha caminhada. Sem ela não chegaria onde cheguei. Sempre me dando apoio, amor e fazendo meus dias mais felizes.

Às minhas orientadoras Juacyara e Camila pela paciência, ajuda e vasto conhecimento passado.

Aos amigos queridos do LACOL – INT. Luiz, Felipe, Elizabeth Madureira, Camila, Amanda por me ajudarem e fazer meu dia-a-dia no laboratório mais suave e divertido.

À equipe ECO100 por me ajudar no início da segunda fase dos trabalhos.

Aos meus amigos de infância Maurício, João Marcelo, Fernando, Pedro Henrique, Leandro e suas respectivas namoradas Beatriz, Amanda, Glenda, Ana Carolina e Mariana por fazerem meus finais de semana mais agradáveis.

Aos meus amigos queridos que a UFRJ me deu Vinícius, Eduarda e Gabriel por fazerem a faculdade mais divertida e me ajudarem com os estudos.

Agradeço à Deus por todas as coisas boas que já aconteceram e estão acontecendo na minha vida.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Químico Industrial.

AVALIAÇÃO DE BIODIGESTORES EM ESCALA DE BANCADA PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

Rafael Costa Esteves

Agosto, 2017

Orientadores: Prof. Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

Camila Calicchio Lopes, M.Sc.

Biomassas residuais das mais diversas atividades (detritos de animais, resíduos de esgoto, aterro sanitário, restos de comida, entre outros) possuem grande potencial de aproveitamento, como para geração de biogás em substituição do gás natural e a produção de biofertilizantes. Os biodigestores são equipamentos de operação e construção simples, que podem ser continuamente alimentados com biomassa residual, contribuindo para o aproveitamento energético dos resíduos e consequente gestão ambiental assim como a redução de impactos ambientais ocasionados pelo armazenamento inadequado desses recursos. O biogás é uma mistura de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), produzido a partir da biodigestão anaeróbica de matéria orgânica; esse biocombustível gasoso pode ser utilizado em fogões, motores e geradores de energia elétrica em substituição ao gás natural derivado de petróleo. Outro biocombustível difundido na matriz energética brasileira é o biodiesel, que tem como subproduto de sua reação de produção o glicerol. Esse componente é uma biomassa residual com alta disponibilidade de carbono facilmente degradável e, por isso, espera-se que sua adição a um sistema de biodigestão melhore o rendimento do processo de degradação e a qualidade do biogás gerado em termos de teor de metano. Apesar do metano ser considerado mais poluente do que o gás carbônico proveniente da queima de combustíveis fósseis, seu aproveitamento representa uma destinação mais sustentável aos resíduos orgânicos, impedindo que este gás poluente seja liberado para a atmosfera. Um processo de biodigestão eficiente depende de uma série de fatores, como inóculo, matéria-prima, pH, entre outros e, dessa forma, é importante entender como cada variável influencia no processo. Sendo assim, a proposta deste trabalho é estudar o processo de biodigestão da matéria-prima orgânica, utilizando reatores anaeróbicos em escala de bancada, controlando-se as variáveis de processo. Foram testadas três configurações de biodigestores, uma com 250mL de volume total onde foi estudada a melhor condição de operação para ser implementada em biodigestores maiores; outra com 3L de volume total e outra com 10L de volume total. Nos biodigestores de 250mL os melhores resultados foram de 9,21% de metano na condição sem agitação e com aquecimento de 35°C, sendo esta a melhor condição estudada. Os resultados dos experimentos de 3L e 10L foram uma produção de metano maior nos biodigestores onde glicerol foi adicionado. Nos de 3L o percentual máximo de metano com adição do glicerol foi de 68,2% e sem adição foi de 47,8% o que representa uma potencialização de 42,6%, já nos biodigestores de 10L o percentual máximo de metano com adição de glicerol foi de 59,0% e sem adição foi de 51,8% representando uma potencialização de 13,9%. Comprovando que a adição de glicerol residual aumenta o percentual de metano no biogás.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	x
Capítulo 1 - Introdução e Objetivos	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1 Matriz Energética Brasileira	5
2.1.1 Matriz de Oferta de Energia Brasileira	6
2.1.2 Biomassa como Alternativa	8
2.1.3 Glicerol da Produção de Biodiesel	9
2.2 Digestão Anaeróbica de Resíduos	10
2.2.1 Fases da Digestão Anaeróbica	10
2.2.2 Parâmetros que Potencializam a Digestão Anaeróbica	12
2.2.3 Inibidores da Biodigestão Anaeróbica	14
2.3 Produção de Biogás	14
2.3.1 Composição do Biogás	14
2.3.2 Metano	15
2.4 Biodigestor	16
Capítulo 3 – Metodologia	19
3.1 Definição das Variáveis de Processo a Serem Monitoradas	21
3.2 Confeção/Montagem dos Biodigestores	22
3.3 Preparação do Substrato e Alimentação dos Biodigestores	24
3.4 Metodologia Analítica	30
3.4.1 Ensaio de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis	30
3.4.2 Análise da Relação Carbono/Nitrogênio.....	32
3.4.3 Análises Cromatográficas	32
3.4.3.1 Análises Cromatográficas da Primeira Fase do Trabalho	32
3.4.3.2 Análises Cromatográficas da Segunda Fase do Trabalho	33

Capítulo 4 – Resultados e Discussões	35
4.1 Resultados das Análises de Sólidos Totais e CHN	35
4.1.1 Resultados das Análises de Sólidos Totais	35
4.1.2 Resultados das Análises de CHN	35
4.2 Avaliação da Produção de Biogás	35
4.2.1 Avaliação da Produção de Biogás nos Biodigestores de 3L das Primeira e Segunda Fases	35
4.2.2 Avaliação da Produção de Biogás nos Biodigestores de 10L e 250mL da Segunda Fase	36
4.3 Composição do Biogás	38
4.3.1 Composição do Biogás na Primeira Fase	38
4.3.2 Composição do Biogás na Segunda Fase	39
4.3.2.1 Avaliação dos Parâmetros Físicos Agitação e Temperatura	39
4.3.2.2 Composição do Biogás nos Biodigestores de 3L	41
4.3.2.3 Composição do Biogás nos Biodigestores de 10L	42
Capítulo 5 – Conclusão e Propostas para Trabalhos Futuros	43
5.1 Conclusão	43
5.2 Propostas para Trabalhos Futuros	44
Capítulo 6 – Referências Bibliográficas	46
Anexo A	52

Índice de Figuras

Figura 1: Evolução da estrutura da oferta de energia no Brasil no período de 1970 – 2030	7
Figura 2: Etapas do processo de Digestão Anaeróbia (Reis, 2012)	12
Figura 3: Diagrama dos experimentos realizados na primeira fase do trabalho	19
Figura 4: Diagrama dos experimentos da segunda fase do trabalho	19
Figura 5: Resíduo alimentar antes da cominuição	21
Figura 6: Resíduo alimentar depois da cominuição	21
Figura 7: Biodigestor de 3 litros	22
Figura 8: Frasco utilizado como biodigestor	23
Figura 9: Tampa adaptado do biodigestor	23
Figura 10: Biodigestor de 250 mL	24
Figura 11: Biodigestores de 3L alimentados, à esquerda (meio diluente: água) e à direita (meio diluente: esgoto)	25
Figura 12: Biodigestores de 3L dentro do banho automático (à esquerda) e temperatura controlada (à direita)	25
Figura 13: Biodigestores de 250 mL alimentados	26
Figura 14: Biodigestores prontos com e sem a manta de fibra de vidro	27
Figura 15: Biodigestores prontos nas placas de aquecimento e agitação	28
Figura 16: Biodigestores de 3 litros e 250 mL no banho LAUDA	29
Figura 17: Bolsas de amostragem (<i>bags</i>)	32
Figura 18: Cromatógrafo em fase gasosa Agilent 6890 Plus	33
Figura 19: Micro cromatógrafo a gás Thermo	35
Figura 20: Cânula saindo do biodigestor e indo diretamente ao manômetro, sem recipiente para coleta de umidade	37
Figura 21: Gráfico da evolução da pressão versus tempo em dias. Legenda: B1 - Sem aquecimento (temperatura ambiente – aproximadamente 28°C) e sem agitação, B2 - Com aquecimento em placa de aquecimento à 50°C e sem agitação, B4 - Sem aquecimento (temperatura ambiente – aproximadamente 28°C) e com agitação magnética (600rpm), B5 - Com aquecimento em placa de aquecimento à 50°C e com agitação magnética (600rpm)	37
Figura 22: Gráfico da evolução da pressão versus tempo em dias	38

Figura 20: Cromatograma do biogás bruto com esgoto analisado pelo CG-DIC	39
Figura 21: Gráfico da comparação da composição de metano através do tempo de experimento. Volume útil 1,5L, temperatura do banho de 35°C, sem agitação	42
Figura 22: Gráfico da comparação da composição de metano através do tempo de experimento. Volume útil de 5L e colocado em uma placa de aquecimento à 50°C, sem agitação	43

Índice de Tabelas

Tabela 1: Produção de Energia Primária em porcentagem	5
Tabela 2: Oferta Interna de Energia brasileira em porcentagem	6
Tabela 3: Comparação do poder calorífico de diversos gases combustíveis	15
Tabela 4: Condições de operação dos biodigestores de 250mL.....	26
Tabela 5: Quantidade de cada substrato alimentado nos biodigestores na primeira fase do trabalho	29
Tabela 6: Quantidade de cada substrato alimentado na segunda fase do trabalho	29
Tabela 7: Composição do biogás gerado no biodigestor de 250 mL. Sem agitação e à temperatura ambiente (28°C aproximadamente)	39
Tabela 8: Composição do biogás gerado no biodigestor de 250 mL. Sem agitação e no banho automático LAUDA à 35°C	40
Tabela 9: Composição do biogás gerado no biodigestor de 250 mL. Agitação magnética (600 rpm) e à temperatura ambiente (28°C aproximadamente)	40
Tabela 10: Composição do biogás gerado no biodigestor de 250 mL. Agitação magnética (600 rpm) e aquecimento em placa de aquecimento à 50°C	40

Abreviaturas

- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- BMP – Potencial Bioquímico de Metano
- CH₄ – Metano
- CO₂ – Gás Carbônico
- DCT – Detector de Condutividade Térmica
- DIC – Detector de Ionização por Chamas
- DQO – Demanda Química de Oxigênio
- ETE – Estação de Tratamento de Esgotos
- GLP – Gás Liquefeito de Petróleo
- H₂S – Gás Sulfídrico
- INT – Instituto Nacional de Tecnologia
- LACOL – Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes
- N₂ – Gás Nitrogênio
- NH₃ – Amônia
- O₂ – Oxigênio
- OIE – Oferta Interna de Energia
- PME – Programa de Mobilização Energética
- RU – Restaurante Universitário
- SF – Sólidos Fixos
- ST – Sólidos Totais
- SV – Sólidos Voláteis
- UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Capítulo 1 – Introdução e objetivos

1.1 Introdução

A energia é um dos fatores essenciais para os processos produtivos de uma sociedade. Segundo o Relatório Final do Balanço Energético Nacional de 2016, as principais fontes de energia para o consumo brasileiro foram: óleo diesel (55,1%), lenha (24,5%), energia elétrica (20,1%) e outros combustíveis (0,3%) (EPE, 2016). Com a elevação do custo de energia, o desperdício energético acarretado pela não utilização de resíduos e/ou biomassa e os impactos ambientais crescentes, o setor rural, geralmente de mais baixa renda, menos capitalizado e com menores condições de arcar com grandes despesas, sente com mais intensidade os efeitos da “crise energética” (SAKUMA, 2013).

O consumo de energia está diretamente relacionado com o crescimento e urbanização dos países, entretanto este desenvolvimento ocorre de uma maneira desenfreada e desorganizada acarretando em um acúmulo de resíduos sólidos, principalmente, em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. Esses fatores acabam gerando diversos problemas ambientais nestas regiões, pois os resíduos não são devidamente destinados e tratados, ficando acumulados em lixões ou mesmo em corpos hídricos e terrenos baldios, concentrando água e vetores de doenças como mosquitos, ratos, etc. Nesse contexto, os resíduos sólidos representam um dos maiores problemas ambientais urbanos, pois são produzidos por atividades industriais e do cotidiano da população. Dessa forma, a busca por alternativas viáveis para a deposição e tratamento destes resíduos se tornou intensa nas últimas décadas, época em que o desenvolvimento sustentável é um dos principais temas debatidos.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) em seu Panorama do ano de 2015, no Brasil são produzidos cerca de 198.750 t/dia de resíduos sólidos urbanos e cerca de 58,7% tem destinação adequada, sendo que 55% desse total é matéria orgânica putrescível, apta à digestão anaeróbia. Desta análise pode-se constatar que cerca de 82 mil toneladas por dia de resíduos orgânicos são dispostos irregularmente gerando um grande passivo ambiental, o que justifica a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de aproveitar o potencial energético dos resíduos orgânicos e reduzir os impactos ambientais negativos.

O processo mais utilizado para o tratamento da matéria orgânica descartada no Brasil é a compostagem (tratamento aeróbico), que compreende um conjunto de técnicas que visa acelerar a decomposição do material utilizando microrganismos aeróbicos para obter um material estável, rico em substâncias húmicas e nutrientes que objetiva seu uso na agricultura como adubo.

Entretanto o processo anaeróbico vem ganhando força nos últimos anos pelo fato do seu reaproveitamento energético. A biodigestão anaeróbica é um complexo processo bioquímico e físico-químico de degradação da matéria orgânica, onde microrganismos agem produzindo, ao final, biogás e biofertilizante (CHERNICHARO, 1993). A eficiência e operação do processo de biodigestão anaeróbica dependem de uma série de fatores, como a forma de inoculação utilizada, a composição da matéria-prima, o pH, a temperatura, a umidade, a agitação, a composição dos nutrientes do substrato, entre outros (BONTURI e VAN DIJK, 2012; EMBRAPA, 2012).

As reações de digestão anaeróbicas são mais bem controladas quando ocorrem dentro de biodigestores, que são reatores compostos, basicamente, por uma câmara fechada na qual uma biomassa é fermentada anaerobicamente (EMBRAPA, 2012). A literatura fornece várias configurações e uma diversidade de materiais possíveis de serem utilizados para construção de biodigestores, porém grande parte dos estudos é dimensionada para propriedades rurais, dificultando o entendimento da influência de parâmetros específicos, de modo que seja possível definir as melhores condições a serem empregadas no processo.

O produto principal da biodegradação anaeróbia de matérias-primas residuais é o biogás, um combustível com possibilidade de aproveitamento energético composto, basicamente, por metano e gás carbônico. Quando tratado adequadamente obtém-se biometano, um combustível com alto poder calorífico, podendo substituir o gás canalizado na matriz energética domiciliar, uma vez que o poder calorífico do último é menor que o do primeiro. O efluente da biodigestão, o biofertilizante, é um material rico em nutrientes podendo ser usado na agricultura após um tratamento prévio.

Em virtude de os produtos da digestão anaeróbica serem de interesse na matriz energética e pelos aspectos sustentáveis, esta técnica vem ganhando espaço e trata-se de uma alternativa viável e que vem sendo aceita com relevante aplicabilidade.

Outra atividade que gera muitos resíduos orgânicos é a produção de biodiesel. A Lei nº 613/2015 estabelece um aumento do percentual do biodiesel adicionado ao óleo diesel para 8% (B8) em 2017, teor que aumentará 1% ao ano até atingir 10% em 2019, e autoriza, ainda, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) a elevar a mistura obrigatória do biodiesel no diesel para 15%, caso testes validem a utilização dessa mistura em veículos e motores (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

O biodiesel é um combustível formado por alquil ésteres, oriundo de óleos e gorduras vegetais, animais e residuais, cujo principal subproduto de reação é o glicerol, passível de aproveitamento para melhorar a produção de biogás num sistema de biodigestão, por se tratar de uma matéria-prima facilmente degradável, com elevada disponibilidade de carbono (KONRAD et al., 2011). Atualmente o glicerol residual da produção de biodiesel é absorvido pelas indústrias química e farmacêutica, porém são insuficientes para consumir a oferta. Paralelo a isso, o glicerol destaca-se como um cosubstrato ideal para codigestão de resíduos, devido à sua alta produção de metano teórica ($0.43 \text{ m}^3/\text{CH}_4 \text{ kg}$), biodegradabilidade ($\approx 100\%$) e pureza (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Outra possibilidade de adicionar mais matéria orgânica e inóculo ao sistema anaeróbico é através da utilização de lodos de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) que são uma fonte excelente de organismos diversos e material orgânico putrescível disponível. O lodo digerido, fonte de microrganismos, é utilizado como inóculo e o lodo primário, fonte de material orgânico, é utilizado como segundo substrato principal da digestão.

Aliando o glicerol, os resíduos orgânicos alimentares e lodos de ETE é possível realizar uma codigestão anaeróbica com potencial de aumentar consideravelmente o rendimento da produção de biogás.

A matriz energética brasileira possui uma porcentagem de energia dita renovável muito maior do que a média mundial, porém ela é composta basicamente pelas energias hidrelétricas, lenha e carvão vegetal e derivados da cana-de-açúcar. A primeira, apesar de ser renovável, causa um impacto ambiental considerável na região em que a usina é construída, enquanto a segunda e a terceira geram energia através da queima, contribuindo com a geração de gases do efeito estufa. Devido a esses problemas, a busca por energias renováveis que geram pouco ou nenhum impacto ambiental vem crescendo bastante e um dos principais focos de pesquisa é geração de

energia através dos resíduos orgânicos dispostos de maneira incorreta utilizando de lodos de estações de tratamento de efluentes.

Em muitas localidades no interior do país a rede elétrica é deficiente e uma das soluções, atualmente, é a implantação de geradores que possuem um elevado custo e não são muito eficientes. Para essas regiões é muito importante o desenvolvimento de outras formas de obtenção de energia como a solar e a biodigestão anaeróbica que além do biogás produz biofertilizante passível de usar na agricultura.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto foi estudar o processo de biodigestão anaeróbica a partir de diferentes resíduos orgânicos alimentares provenientes da cantina do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e do Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e quantificar o gás metano (biogás), gerado em biodigestores artesanais montados no laboratório, através de cromatografia gasosa, bem como estudar o efeito da adição de glicerol residual da produção de biodiesel no processo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliação dos parâmetros físico-químicos para caracterização da matéria-prima escolhida;
- Avaliação do comportamento da produção de biogás em biodigestores alimentados com resíduo orgânico, glicerol residual da produção de biodiesel, lodo primário de ETE e lodo digerido de ETE com volumes distintos;
- Avaliação do impacto da adição de glicerol residual da produção de biodiesel em biodigestores de 3 e 10 litros;
- Avaliação de parâmetros físicos (temperatura e agitação) em biodigestores de 250 mL com a mesma alimentação dos biodigestores de 3L e 10L visando obter a melhor configuração para uma composição máxima de metano no biogás gerado;
- Avaliação do tempo de produção do biogás e sua qualidade.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica

2.1 Matriz energética brasileira

A matriz energética brasileira é muito diversificada com boa participação de energias renováveis. De acordo com o Ministério de Minas e Energia no seu Boletim Interno Mensal de Energia, em 2016, as renováveis atingiram 43,6% de participação na matriz. O Brasil se destaca no cenário mundial, uma vez que a média global de energia renovável incorporada na matriz energética é de 14%, enquanto a média de países desenvolvidos é de, apenas, 6%.

A Tabela 1 mostra a distribuição da produção de energia primária no Brasil dividido entre energias renováveis e não renováveis. De acordo com o Balanço Energético Nacional fornecido anualmente pelo Ministério de Minas e Energia, energia primária “é todo produto energético provido pela natureza na sua forma direta, como petróleo, gás natural, carvão mineral, resíduos vegetais e animais, energia solar, eólica etc”.

Tabela 1: Produção de Energia Primária em porcentagem

Fontes	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Não renováveis	53,2	51,9	52,1	53,8	53,0	54,8	54,7	54,2	56,5	58,1
Petróleo	42,1	40,6	39,7	42,0	42,1	42,5	41,7	40,6	42,8	44,0
Gás Natural	8,3	8,1	9,0	8,7	9,0	9,3	10,0	10,8	11,6	12,2
Carvão Vapor	1,0	1,0	1,1	0,8	0,8	0,8	1,0	1,3	1,1	1,1
Carvão	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Metalúrgico	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Urânio	1,1	1,6	1,7	1,7	0,7	1,6	1,5	0,9	0,2	0,2
Outras Não Renováveis	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
Renováveis	46,8	48,1	47,9	46,2	47,0	45,2	45,3	45,8	43,5	41,9
Energia Hidráulica	14,2	14,4	13,4	14,0	13,7	14,4	13,9	13,0	11,8	10,8
Lenha	13,5	12,8	12,4	10,2	10,3	10,1	10,0	9,5	9,1	8,6
Produtos da Cana-De-Açúcar	16,6	18,1	19,0	18,6	19,3	16,9	17,6	19,1	18,1	17,6
Outros Renováveis	2,6	2,9	3,1	3,4	3,7	3,8	3,8	4,1	4,5	5,0
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Balanço Energético Nacional (Brasil, 2016, p.22)

2.1.1 Matriz de oferta de energia brasileira

De acordo com a revista Energia do Mundo – Edição de agosto de 2012 da Eletronuclear pertencente ao Ministério de Minas e Energia a demanda total de energia é aquela necessária para movimentar a economia de um país ou região, também denominada de Oferta Interna de Energia (OIE).

A Tabela 2 mostra a OIE brasileira. Vale ressaltar que em 2015, 41,2% da energia disponibilizada para ser transformada, distribuída e consumida nos processos produtivos do país vem de energia renovável. Já a Figura 1 mostra a evolução da estrutura da oferta de energia no Brasil no período de 1970 – 2030.

Tabela 2: Oferta Interna de Energia brasileira em porcentagem

Fontes	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Não renováveis	55,4	54,5	54,4	53,2	55,3	56,5	58,2	59,6	60,6	58,8
Petróleo e Derivados	37,9	37,5	36,7	38,0	37,8	38,6	39,3	39,3	39,4	37,3
Gás Natural	9,6	9,3	10,3	8,8	10,2	10,2	11,5	12,8	13,5	13,7
Carvão Mineral e Coque	5,7	5,7	5,5	4,6	5,4	5,7	5,4	5,6	5,7	5,9
Urânio	1,6	1,4	1,5	1,4	1,4	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3
Outras Não Renováveis	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1
Renovável	44,6	45,5	45,6	46,8	44,7	43,5	41,8	40,4	39,4	41,2
Energia Hidráulica	14,9	14,9	14,1	15,2	14,0	14,7	13,8	12,5	11,5	11,3
Lenha e Carvão Vegetal	12,7	12,0	11,6	10,1	9,7	9,6	9,1	8,3	8,2	8,2
Derivados da Cana-De-Açúcar	14,6	15,9	17,0	18,1	17,5	15,7	15,4	16,1	15,8	16,9
Outros Renováveis	2,5	2,7	2,9	3,3	3,5	3,5	3,5	3,6	4,0	4,7
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Balanço Energético Nacional (Brasil, 2016, p.23)

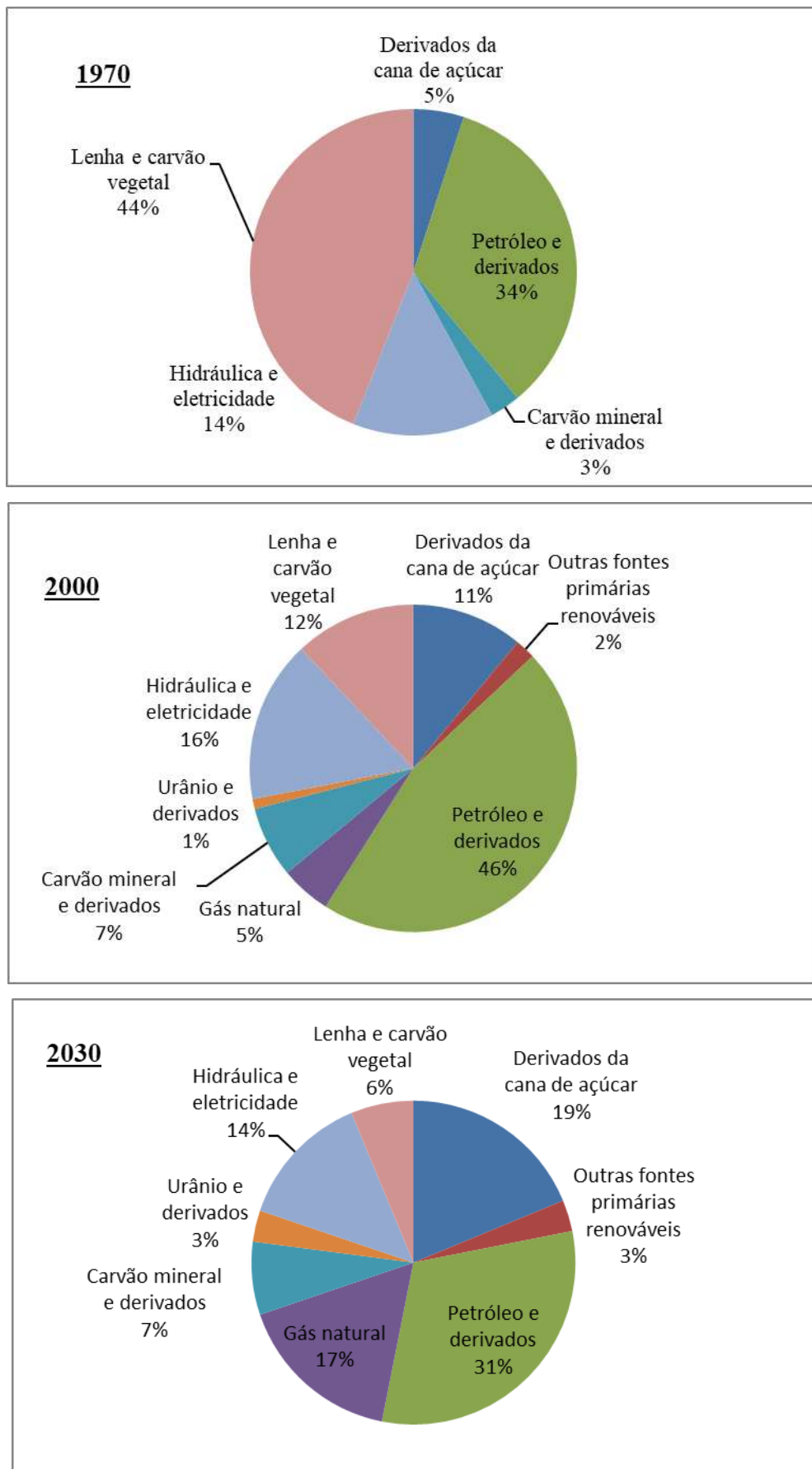


Figura 1: Evolução da estrutura da oferta de energia no Brasil no período de 1970 – 2030.

2.1.2 Biomassa como alternativa

A substituição de combustíveis fósseis por energias renováveis é um assunto debatido mundialmente e a biomassa vem se apresentando como uma alternativa interessante, pois há muita disponibilidade no Brasil com potencial de geração de energia é considerável.

De acordo com a ABRELPE em seu Panorama do ano de 2015, no Brasil cerca de 82 mil toneladas por dia de resíduos orgânicos são dispostos irregularmente gerando um grande passivo ambiental. Por outro lado, esse resíduo orgânico putrescível é rico em carbono e é uma matéria-prima em potencial para a digestão anaeróbica e geração de biogás.

Como o Brasil é um país majoritariamente agropecuário há uma geração enorme de resíduos tanto agrícola quanto pecuário. Os grandes destaques são os restos de alimentos ou partes não consumidas na alimentação humana, como bagaço de cana, cascas de frutas e alimentos jogados no lixo. Já na pecuária há uma grande produção de dejetos de diversos animais como os suínos, caprinos, bovinos, frangos, entre outros. Todos estes rejeitos são fontes ricas em carbono e são potenciais para digestão anaeróbica.

Um processo que gera uma quantidade expressiva de resíduo é a produção de biodiesel. Em 2016 foram produzidos 380,9 milhões de litros de glicerol bruta, um subproduto da produção de biodiesel que é absorvido pelas indústrias química e farmacêutica, porém com o aumento exponencial da produção de biodiesel essas indústrias não conseguem consumir toda o glicerol residual tornando-o um problema para o meio ambiente (RIVALDI *et al.*, 2008). Esta é uma substância pertencente à função orgânica álcool e possui 3 carbonos em sua cadeia, um composto interessante para potencializar a digestão anaeróbica.

Uma das principais vantagens da biomassa é que ela pode ser utilizada diretamente para produção de energia a partir da combustão da matéria orgânica dentro de fornos ou caldeiras. Porém, atualmente, a biomassa vem sendo largamente utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade de comunidades isoladas da rede elétrica (PROINFA, 2012). Entretanto, a biomassa possui um alto teor de umidade e quando queimada não atinge todo o seu potencial de combustão. Sendo assim, transformá-la em biogás seria uma forma de garantir um melhor aproveitamento energético desta matéria orgânica.

2.1.3 Glicerol da produção de biodiesel

A crescente demanda mundial por combustíveis, principalmente os de origem fóssil, gerou uma grande preocupação, devido às reservas limitadas de petróleo e pelo alarmante crescimento de graves problemas de poluição (MORA *et al.* 2015). Como consequência, nos últimos anos, houve um aumento nas pesquisas e desenvolvimento de tecnologias de obtenção de energia de uma forma sustentável e renovável, com destaque para os biocombustíveis como o etanol e o biodiesel. Os biocombustíveis surgem, portanto, como alternativa para minimizar os altos índices de poluição, com consequentes benefícios sociais e econômicos.

Depois das duas grandes crises do petróleo em 1973 e 1979 o Brasil considerou dar maior importância aos biocombustíveis, com destaque para o Programa Nacional do Álcool – Proálcool, que foi um programa de substituição em larga escala dos combustíveis veiculares derivados de petróleo por álcool combustível. Em janeiro de 2005 foi publicada a Lei 11.097 (Brasil, 2005) que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira com a regulamentação do setor feito pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e que implementou o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel.

Assim, o governo incentivou a produção do biodiesel e, através de leis e medidas provisórias constantemente reavaliadas, determinou a utilização de um percentual mínimo obrigatório do biodiesel no diesel comercializado no país, iniciando com 2% atingindo atualmente 8%, com aprovação de aumento para 10% até 2018 (BRASIL, 2016).

Com os incentivos do governo brasileiro a produção de biodiesel cresceu exponencialmente e com isso os resíduos gerados também cresceram e um desses resíduos, o mais gerado, é o glicerol bruto. Estima-se que a cada 100 litros de biodiesel produzido gera-se 10 litros de glicerol. De acordo com o Boletim Mensal dos Biocombustíveis de fevereiro de 2017 do Ministério de Minas e Energia o Brasil produziu 3.809 mil m³ de biodiesel em 2016, ou seja, gerou-se 380,9 milhões de litros de glicerol bruto. Como as indústrias química e farmacêutica não conseguem absorver 100% desse glicerol bruto gerada ela torna-se um passivo ambiental e uma das soluções seria utilizá-la na codigestão anaeróbica de resíduos orgânicos e lodos de ETE para a geração de biogás e biofertilizante.

O glicerol bruto é obtido após a reação de transesterificação do óleo vegetal ou gordura animal durante a produção do biodiesel e neste processo podem ser utilizadas

duas rotas alcoólicas, a etílica ou a metílica, que podem influenciar nas características do glicerol e seus futuros destinos, já que com maior quantidade do radical metil poderá ser considerada tóxica para fermentação anaeróbia.

2.2 Digestão anaeróbica de resíduos

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico que ocorre na ausência de oxigênio em sua forma livre, onde microrganismos com alto grau de seletividade degradam a matéria orgânica complexa em compostos mais simples, dentre elas metano (CH_4), amônia livre (NH_3), nitrogênio (N_2), gás carbônico (CO_2), gás sulfídrico (H_2S). Ela pode ser realizada em batelada ou em processo contínuo. No primeiro a biomassa é inserida no reator junto do inóculo e permanece por certo período de tempo em ausência de oxigênio, no segundo a biomassa e o inóculo são alimentados constantemente. A digestão anaeróbia é uma tecnologia de tratamento de resíduos que melhora a qualidade ambiental e produz energia sustentável (CHRISTY, GOPINATH e DIVYA, 2014).

2.2.1 Fases da digestão anaeróbia

Este processo microbiano envolve quatro etapas bioquímicas fundamentais, em que os microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio. As etapas são hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

- **Etapa 1 – Hidrólise:**

Esta etapa constitui na quebra de moléculas orgânicas complexas em substâncias mais simples de menor peso molecular (como açúcares, aminoácidos, ácidos graxos) e que podem ser assimiladas pelas bactérias, pois são capazes de atravessar as paredes celulares devido ao menor tamanho. Como existem moléculas orgânicas altamente complexas sua quebra é lenta e a velocidade da hidrólise é baixa, por este motivo esta etapa da digestão anaeróbia é a limitante de todo o processo (SOUZA, 1984).

- **Etapa 2 – Acidogênese:**

Esta etapa constitui da continuação da quebra das moléculas orgânicas da etapa anterior (hidrólise) em moléculas menores. Essa quebra ocorre pela metabolização das substâncias no interior das células das bactérias fermentativas que são em sua maioria

anaeróbias obrigatórias. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis de cadeia curta (AGV), álcoois, ácido láctico, dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas (SOUZA, 1984).

- Etapa 3 – Acetogênese:

Nesta etapa ocorre a oxidação das moléculas geradas na etapa de acidogênese gerando hidrogênio (H_2), CO_2 e ácido acético. As arqueas metanogênicas que são responsáveis pela última etapa da digestão anaeróbia, usam somente o H_2 e o acetato, dentre os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas, diretamente para a digestão. Porém, pelo menos 50% da matéria biodegradável é convertida em propionato e butirato que são posteriormente decompostos em acetato e hidrogênio pela ação das bactérias acetogênicas (AQUINO E CHERNICHARO, 2005).

- Etapa 4 – Metanogênese:

É a fase final da digestão anaeróbia onde são produzidos metano, CO_2 e H_2O . Existem dois tipos de microrganismos metanogênicos: acetotróficos e hidrogenotróficos. Os primeiros são responsáveis pela produção de metano e CO_2 a partir da redução do acetato e os demais são responsáveis pela produção de metano a partir da redução do CO_2 usando o H_2 como doador de elétrons, com isso há a liberação de H_2O .

Neste processo, as etapas são interdependentes, ou seja, o produto de uma é reagente de outra, obtendo-se como produtos finais metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), majoritariamente. A Figura 2 apresenta as etapas do processo de digestão anaeróbia e os produtos de cada etapa.

Os microrganismos presentes na digestão anaeróbia são, em sua maioria, bactérias que se alimentam de carbono, nitrogênio e sais minerais. Existem diversos tipos de matérias-primas que atendem a esses requisitos como restos de alimentos, dejetos de animais e humanos, resíduos urbanos, entre outros, porém é importante respeitar a proporção de carbono/nitrogênio de 20-30/1 (HARTMANN E AHRING, 2004) para se obter uma máxima produção de biogás.

A vantagem da produção de biogás através de processos anaeróbios é que a matéria-prima utilizada é considerada rejeito, sem nenhum valor econômico agregado. Isso contribui com o meio ambiente e caminha na mesma linha política de desenvolvimento sustentável, tornando-se uma opção altamente vantajosa tanto

economica quanto ambientalmente, porque além do biogás produzido o material que fica no biodigestor pode ser usado na agricultura como biofertilizante, fazendo com que este processo não produza nenhum tipo de rejeito.

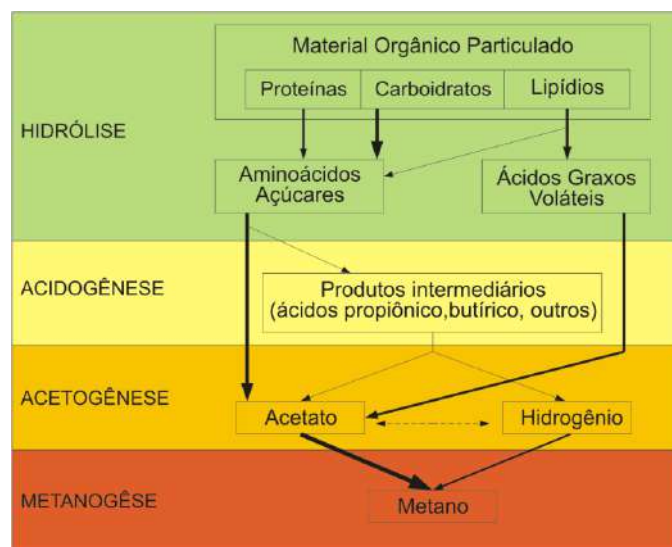


Figura 2: Etapas do processo de Digestão Anaeróbia (Reis, 2012)

2.2.2 Parâmetros que potencializam a digestão anaeróbia

Os parâmetros que potencializam a digestão anaeróbica são: temperatura, pH, agitação, inóculo, relação carbono/nitrogênio, relação inóculo/substrato, configuração do biodigestor e tempo de retenção hidráulica (BARCELOS, 2009).

Existem dois tipos de microrganismos anaeróbicos, os mesófilos e termófilos. Os primeiros trabalham em temperaturas intermediárias entre 25-40°C e os segundos trabalham em altas temperaturas (CHEN, CHENG e CREAMER, 2008). Para a digestão anaeróbica os mesófilos são os mais adequados, por isso a temperatura do sistema deve estar à, aproximadamente, 35°C (CHEN, CHENG e CREAMER, 2008). Caso haja alterações frequentes a digestão poderá ser comprometida, e conseqüentemente, tendo seu rendimento menor. As bactérias anaeróbicas são sensíveis ao pH e não resistem aos extremos, meios muito ácidos ou muito básicos. A faixa de pH ideal de trabalho é 6,8-7,3 (CHEN, CHENG e CREAMER, 2008).

Para sistemas com uma quantidade muito grande de matéria orgânica é ideal usar um sistema de agitação adequado para garantir que toda a matéria orgânica seja digerida pelas bactérias e garanta uma máxima geração de biogás para a carga adicionada.

No início da biodigestão estão presentes microrganismos anaeróbicos e aeróbicos no reator, porém com a ausência de oxigênio no sistema as bactérias aeróbicas vão morrendo e as anaeróbicas começam a se multiplicar. Ao introduzir um inóculo rico de flora microbiana esta etapa de multiplicação de bactérias anaeróbicas é acelerada e a reação começa mais cedo, além de ter mais organismos presentes no sistema potencializando a reação.

Conforme Esposito *et al.* (2012), a faixa ótima da relação carbono/nitrogênio (C/N) que permite uma biodegradação mais eficiente dos resíduos está entre 20:1 e 30:1. Silvestre, Fernández e Bonmatí (2015) relatam que a faixa aceitável de C/N para o processo de digestão anaeróbia encontra-se entre 15 e 30. Em estudos relatados por Siddiqui, Horan e Kofi (2011) sobre misturas com resíduos alimentares e lodo de esgoto com diferentes relações C/N (10, 15, 20 e 30), a maior produção de CH₄ (50 a 70% do total) foi relacionada com a relação C/N equivalente a 15. Se a concentração de nitrogênio for bastante elevada há a formação de amônia que é um inibidor do processo de biodigestão anaeróbica.

Na literatura, dados experimentais demonstraram que a produção de metano final, bem como as taxas de produção são dependentes dos tipos de substratos e do inóculo. Grandes volumes de inóculo garantem alta atividade microbiana, baixo risco de sobrecarga e baixo risco de inibição (ANGELIDAKI *et al.*, 2009). Alguns pesquisadores (RAPOSO *et al.*, 2011) sugerem como obrigatória para testes padronizados a razão inóculo/substrato (I/S) ≥ 2 .

Nartker *et al.* (2014) e Jensen *et al.* (2014) utilizaram a razão inóculo/substrato (I/S) ≥ 2 com base na quantidade de sólidos voláteis para avaliar a produção de biogás em misturas contendo lodo de esgoto e glicerol bruto. Li *et al.* (2013) investigaram o potencial bioquímico de metano (BMP) e biodegradabilidade de diversos tipos de resíduos sob condições mesofílicas (37°C) em sistema batelada utilizando diferentes razões de inóculo/substrato (I/S). Esses autores identificaram que a relação com teor de substrato 3 vezes maior do que o inóculo acarreta em baixo desempenho no que tange à produção de metano.

Potencializar a biodigestão está diretamente relacionado com o tipo de biodigestor utilizado e com o tempo de retenção hidráulica. Os biodigestores podem ser configurados continuamente ou a batelada, com ou sem sistema de agitação e controle de temperatura, janela de inspeção para controle de pH, entre outros. Quanto mais controles o biodigestor possuir, maior a quantidade de metano será produzida. Já o

tempo de retenção hidráulica varia de acordo com o sistema instalado e resíduo/inóculo utilizados.

2.2.3 Inibidores da biodigestão anaeróbica

A introdução de substâncias inibidoras no sistema pode levar a morte das bactérias envolvidas no processo, desacelerar a taxa de degradação da matéria orgânica ou até mesmo interromper a produção de biogás (CHERNICHARO, 1993; CHRISTY, GOPINATH e DIVYA, 2014). Substâncias desinfetantes, bactericidas, herbicidas, sais e metais pesados mesmo em pequenas quantidades podem comprometer o processo. Grandes cargas orgânicas também são inibidoras no processo. Antibióticos geralmente entram no sistema via adubos orgânicos e através de gordura animal.

2.3 Produção de Biogás

De acordo com a definição da ANP, o biogás é um gás produzido a partir da decomposição da matéria orgânica (resíduos orgânicos) por ação de bactérias. Tal processo denomina-se biodigestão anaeróbica. O biogás pode ser também produzido a partir de resíduos sólidos urbanos oriundos de aterros sanitários ou do esgoto sanitário em estações de tratamento de esgoto, sendo, em ambos os casos, também sob a ação de bactérias por biodigestão anaeróbica.

2.3.1 Composição do Biogás

O biogás é um gás composto, em sua maioria, de metano e gás carbônico e, em pequenas quantidades, gás sulfídrico e umidade. Ele é considerado uma fonte de energia renovável produzido a partir da biodigestão de compostos orgânicos (lixo doméstico orgânico, resíduos industriais de origem vegetal, esterco de animal) e de forma induzida (biodigestores).

Este gás pode ser utilizado em substituição aos gases convencionais de queima permutando, por exemplo, o gás liquefeito de petróleo (GLP), e o gás natural e pode ser, também, utilizado para geração de energia elétrica, neste caso, geradores específicos deverão ser empregados. Apesar do seu poder calorífico ser menor em relação aos gases derivados do petróleo, sua importância se dá, principalmente, no cunho ambiental tornando-se uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, tratamento de esgoto

doméstico e aterros sanitários visto que reduz as emissões de metano e, ao mesmo tempo, gera energia através da queima agregando ganho ambiental e redução de custos (COSTA, 2002). A Tabela 3 mostra a comparação do poder calorífico entre o biogás, com 60 e 95%, de metano e diversos gases derivados do petróleo, chegando à conclusão que o primeiro pode substituir os gases canalizados domésticos, de acordo com a Resolução ANP número 8 de 30 de janeiro de 2015. Porém, para a indústria, sua substituição integral seria complicada devido a seu baixo poder calorífico.

Segundo a literatura, para uma maior produção de biogás a matéria orgânica dentro do biodigestor deve possuir um teor de Sólidos Totais (ST) de até 8%.

A definição mais moderna de biogás segundo Coelho (2001) é o gás formado a partir da degradação anaeróbia da matéria orgânica. Durante a digestão anaeróbica, a energia química presente na composição orgânica é largamente conservada como metano. A Tabela 3 apresenta uma comparação entre o poder calorífico de diferentes gases combustíveis com o biogás.

Tabela 3: Comparação do poder calorífico de diversos gases combustíveis.

Gás	Poder Calorífico
Gás canalizado (RJ) (a)	3.900 kcal/m ³
Gás canalizado (SP) (a)	4.700 kcal/m ³
Gás de refinaria (a)	8.800 kcal/m ³
Gás natural úmido (a)	10.454 kcal/m ³
Gás natural seco (a)	9.256 kcal/m ³
GLP (a)	11.750 kcal/m ³
Biogás (60% CH₄) (b)	5.140 kcal/m ³
Biogás (95% CH₄) (b)	8.130 kcal/m ³

Fonte: (a) BEN (2015); (b) Avellar (2001)

2.3.2 Metano

O metano é um gás incolor, sua molécula é tetraédrica e apolar (CH₄), de pouca solubilidade na água e, quando adicionado ao ar se transforma em mistura de elevada inflamabilidade. É o mais simples dos hidrocarbonetos. As principais fontes do gás metano são gás natural e minas de carvão, emanação através de vulcões de lama e falhas geológicas, decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos, fontes naturais (ex: pântanos), extração de combustível mineral, processo de digestão de

animais herbívoros, carnívoros e onívoros, bactérias, aquecimento ou combustão de biomassa anaeróbica.

Cerca de 60% da emissão de metano no mundo é produto da ação humana, vindo principalmente da agricultura. Este gás era originariamente chamado gás dos pântanos e é o principal constituinte do biogás, pois pode ser produzido pela digestão anaeróbica de matéria orgânica, como lixo e esgotos, através de microrganismos anaeróbicos

Existem dois tipos de fontes de gás metano: as naturais e as alternativas. A maior fonte de metano para extração são depósitos geológicos conhecidos como campos de gás natural. Quanto às fontes alternativas, um método para a obtenção de metano é via geração de biogás. Significantes quantidades de metano também são produzidas por gado – não pela flatulência, como é erroneamente dito, mas 50% é produzido no processo de ruminção. A pecuária em geral (principalmente bois, galinhas e porcos) produz 37% de toda a emissão antropogênica de metano (CICERONE e OREMLAND, 1988). Industrialmente, o metano pode ser produzido e utilizado na indústria, assim como na natureza (vulcões e campos geológicos), em processos químicos, como processo Sabatier, Fischer-Tropsch, e reforma de vapor (CICERONE e OREMLAND, 1988).

É considerado o terceiro gás que mais contribui para o efeito estufa (depois do dióxido de carbono e vapor d'água). Ele possui um menor tempo de residência na atmosfera, quando comparado com o CO₂. No entanto, possui um potencial de aquecimento 60 vezes maior (KHALIL e RASMUSSEN, 1995).

2.4 Biodigestor

Biodigestores são reatores fechados destinados a digestões anaeróbicas. De modo geral, um biodigestor é definido como sendo o meio onde ocorre o processo de degradação, transformação ou decomposição de matéria orgânica, na ausência de oxigênio, tendo como produto final o biogás. De acordo com Gaspar (2003), digestores anaeróbios são câmaras herméticas, onde o efluente é inserido e no interior do qual ocorre a metabolização dos compostos orgânicos por bactérias anaeróbicas. Existem três modelos mais utilizados de biodigestores: modelo chinês, indiano e batelada, sendo o indiano o mais difundido pelo mundo pelo fato de sua construção ser simples e seu custo benefício ser maior (DEGANUTTI *et al.*, 2002).

O primeiro biodigestor construído do qual existem registros foi em Bombaim, na Índia, em 1857 com o objetivo de produzir energia e abastecer um hospital (GONÇALVEZ *et. al*, 2009). Nesta mesma época, os pesquisadores alemães Fischer e Schrader e o francês Granyon, fundaram as ideias centrais sobre a metodologia da produção de energia através da biodigestão anaeróbia (AFANAH, 2011).

Os biodigestores mostraram-se tão promissores que a Índia inaugurou institutos e desenvolveu usinas para pesquisa de biodigestão anaeróbica no intuito de difundir os reatores pelo país e potencializar a produção do biogás utilizando resíduos animais como substrato (GASPAR, 2003 *apud* PALHARES, 2008). Na década de 1950 existia meio milhão de biodigestores construídos no norte da Índia e, por ser muito promissor, motivou a China a investir na construção e pesquisa de biodigestores e biodigestão anaeróbica. Já em 1972, havia mais de 7,2 milhões de reatores instalados na região do Rio Amarelo (GASPAR, 2003 *apud* PALHARES, 2008).

A vantagem da instalação de biodigestores em regiões mais afastadas de países ditos continentais tem vantagens, pois a distribuição de energia é muito deficiente e torna-se custosa para chegar nestas regiões. Com isso os digestores atenuam esse problema porque gera biogás rico em metano que pode ser o combustível para geradores de energia e o substrato utilizado para produzir esse gás é resíduo orgânico, abundante nestas regiões agrícolas. Outro ponto de destaque da utilização dos biodigestores é que o subproduto deste processo é o biofertilizante que é produzido em grande quantidade, diminuindo a necessidade de compra e utilização de fertilizantes químicos, aumentando a produção de alimentos.

Com as crises mundiais do petróleo em 1973 e 1979 o Brasil começou a investir e a pesquisar energias alternativas. De acordo com os registros, o primeiro biodigestor instalado no Brasil foi do modelo chinês, na Granja no Torto em Brasília (SGANZERLA, 1983 *apud* PALHARES, 2008). Entre os anos de 1980 e 1984, o Programa de Mobilização Energética – PME, incentivou a instalação de biodigestores concedendo estímulos materiais e financeiros (PALHARES, 2008).

Conforme a economia mundial foi se recuperando os biodigestores deixaram de ser utilizados, pois o preço do petróleo era muito baixo. Em 2001, com o racionamento energético, os biodigestores poderiam voltar à cena, mas as fortes e constantes chuvas encheram reservatórios e a energia hidroelétrica ficou mais barata e os digestores não foram tão utilizados.

Segundo Deganutti *et al.* (2002) para um biodigestor tipo indiano o teor de sólidos totais não pode exceder 8% para garantir uma máxima área superficial para os microrganismos e não haver entupimentos nas tubulações do sistema.

Capítulo 3 – Metodologia

Este trabalho foi dividido em duas fases. A primeira fase consistiu na confecção de dois biodigestores de bancada com volume total de três litros e avaliação da produção de biogás usando água como meio diluente no primeiro e esgoto sanitário como meio diluente no segundo. A Figura 3 mostra um diagrama de todos os experimentos realizados nesta etapa do trabalho.

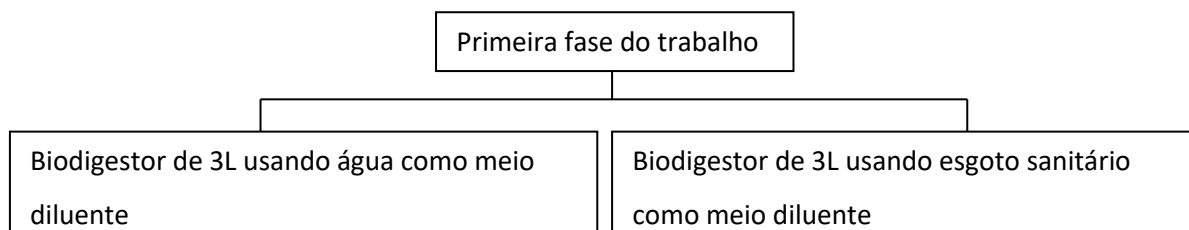


Figura 3: Diagrama dos experimentos realizados na primeira fase do trabalho

O objetivo da segunda fase foi solucionar os problemas ocorridos na primeira fase e aumentar a escala, e para isso foram realizados três experimentos. A Figura 4 mostra um diagrama com todos os experimentos executados nesta segunda etapa do trabalho.

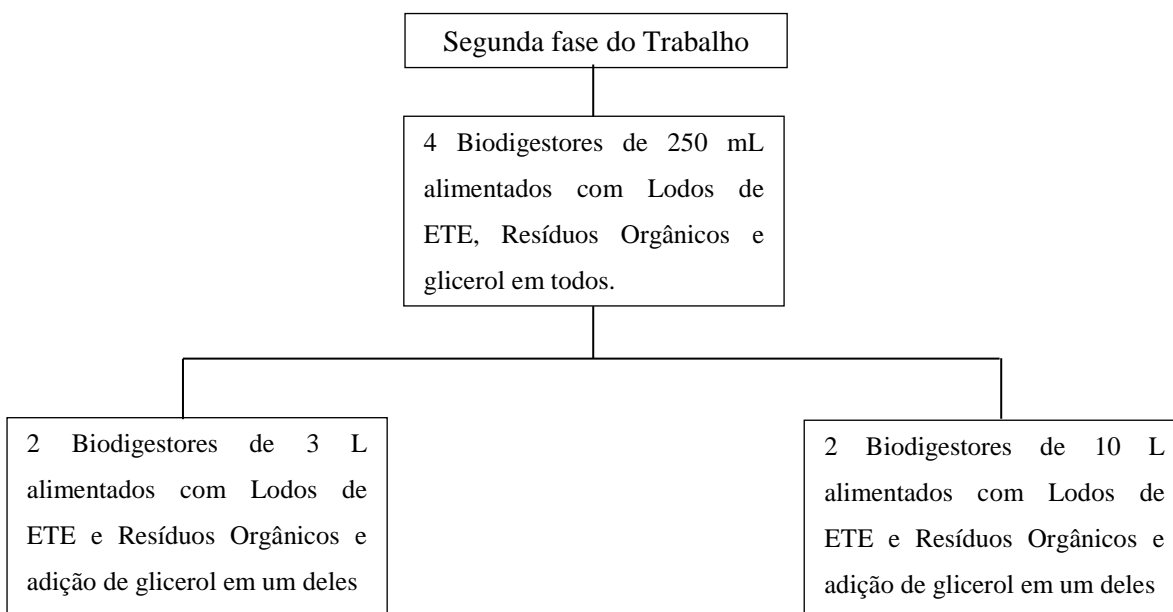


Figura 4: Diagrama dos experimentos da segunda fase do trabalho

Como mostrado na Figura 4, os experimentos da segunda fase foram realizados conforme descrição a seguir:

- O primeiro experimento consistiu em avaliar os parâmetros físicos temperatura e agitação, e para isso foram utilizados quatro biodigestores de 250 mL de volume total nas mesmas condições dos outros dois experimentos com adição de glicerol em todos os casos. O primeiro ocorreu com ausência de aquecimento (temperatura ambiente) e agitação, o segundo estava em uma placa de aquecimento à 50°C e ausência de agitação, o terceiro estava na presença de agitação e temperatura ambiente e o último estava em uma placa de aquecimento à 50°C e agitação.
- O segundo experimento foi o aprimoramento dos biodigestores de volume total de três litros utilizados na primeira fase do trabalho, alimentando-os com resíduo orgânico e lodo primário de ETE como substratos, e lodo digerido de ETE como inóculo. O objetivo foi avaliar a geração de biogás na presença e ausência de glicerol residual da produção de biodiesel.
- O terceiro experimento consistiu na confecção de biodigestor de volume total de dez litros nas mesmas condições e mesmos objetivos do primeiro experimento.

Para a primeira fase do trabalho as amostras foram coletadas na cantina do INT toda segunda, quarta e quintas-feiras durante o mês de janeiro de 2016. Eram coletados resíduos alimentares dos almoços, e esses resíduos eram compostos majoritariamente por carboidratos e saladas, a fim de se obter um valor médio de sólidos totais, já que as amostras eram bem diferentes de um dia para o outro. Já para a segunda fase as amostras foram coletadas no Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), foi realizada somente uma coleta em grande proporção.

Devido ao fato dos resíduos alimentares possuírem uma granulometria muito grande foi necessário fazer uma cominuição dos mesmos utilizando um liquidificador industrial. As Figuras 5 e 6 mostram o antes e o depois dos resíduos.

O modelo de biodigestor escolhido foi o indiano, pois era o mais utilizado na literatura, no regime em batelada, pois o regime contínuo costuma ser usado para escalas maiores. Como não havia muitos trabalhos na literatura utilizando modelos em batelada e quando tinha não informava as proporções alimentadas de resíduo e inóculo, optou-se, por segurança, utilizar a proporção de 2/1 de inóculo/substrato e máximo de 8% de sólidos totais para evitar quaisquer situações desagradáveis, como explosões dos reatores.

Caso fosse utilizada uma quantidade maior de substrato mais biogás seria gerado e o *headspace* seria insuficiente para acomodar o gás, gerando a explosão do reator.



Figura 5: Resíduo alimentar antes da cominuição



Figura 6: Resíduo alimentar depois da cominuição

3.1 Definição das variáveis de processo a serem monitoradas

Segundo dados da literatura, as variáveis mais importantes a serem monitoradas são pH, temperatura, teor de sólidos, agitação e demanda química de oxigênio (DQO). O pH e a temperatura foram medidos no momento da alimentação do biodigestor, porém ao longo do experimento a medição não pôde ser realizada devido à necessidade de abertura do frasco, o que levaria à perda do gás formado. O pH varia de acordo com a etapa da digestão anaeróbia, porém na última etapa, onde ocorre a produção de metano, o pH deve ser neutro, caso contrário os microrganismos metanogênicos não suportam e morrem, já a temperatura deve ficar sempre na faixa de 30 a 35 °C conforme relatado por Clarck & Morriss (1991) e Mata-Alvarez (2002). O teor de sólidos foi medido segundo metodologia apresentada no item 3.4.1 e a alimentação dos biodigestores ajustada para 8% de sólidos totais. A DQO fornece a

quantidade de nutrientes disponíveis para os microrganismos e a agitação garante que todo o meio reacional ficará em contato com os mesmos. Devido a problemas operacionais não foram incorporados sistemas de agitação nos biodigestores de 3L e 10L. Como os biodigestores de 3L ficaram dentro do banho automático da marca LAUDA não foi possível fazer a agitação, e como os biodigestores de 10L possuem 5L de volume útil as placas de agitação do laboratório não possuíam força magnética suficiente para manter os reatores agitados.

3.2 Confeção/Montagem dos biodigestores

A etapa seguinte foi o dimensionamento e a construção dos biodigestores em escala de bancada. O processo utilizado foi em batelada devido à restrição ao acesso à matéria-prima. Para os biodigestores de três litros foram utilizados dois frascos de vidro com o objetivo de analisar duas situações: uma usando água como meio diluente a outra usando esgoto. A tampa foi cortada para a introdução de um tubo de pvc, utilizado para a alimentação do frasco, e de uma mangueira, utilizada para a migração do gás. Por fim, a tampa foi colocada em seu lugar e vedada com *durepóxi*, para impedir a entrada de oxigênio no sistema, o tubo pvc foi tampado com uma rolha de borracha envolta com gel lubrificante e na ponta da mangueira coletora de gás instalou-se uma reguladora com uma válvula de duas vias com a finalidade de observar as alterações na pressão interna do biodigestor e fazer a coleta do gás gerado durante o processo. A Figura 7 mostra um dos biodigestores finalizado.



Figura 7: Biodigestor de 3 litros

Para os biodigestores de dez litros foram utilizados dois frascos de amostras de volume total de dez litros e uma tampa modificada contendo um manômetro e uma saída para a amostragem do gás gerado, conforme as Figuras 8 e 9.

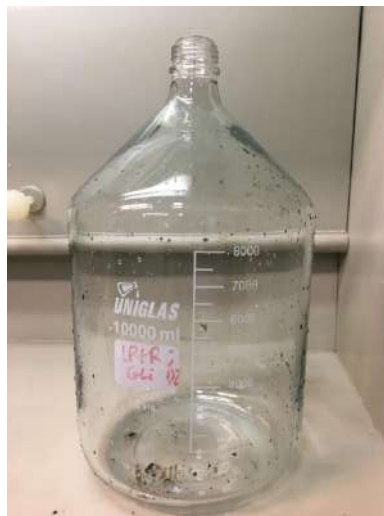


Figura 8: Frasco utilizado como biodigestor



Figura 9: Tampa adaptado do biodigestor

Já os biodigestores de 250 mL foram confeccionados da mesma maneira dos de 10 litros, porém usando frascos de 250 mL, conforme mostrado na Figura 10. As tampas foram as mesmas da Figura 9.



Figura 10: Biodigestor de 250 mL

3.3 Preparação do substrato e alimentação dos biodigestores

Para a alimentação da primeira fase do trabalho preencheu-se dois litros e deixou-se um litro para o *headspace* com a finalidade de acumular o gás produzido. Com os biodigestores prontos, os resíduos alimentares foram macerados e triturados com o objetivo de diminuir sua granulometria e, conseqüentemente, aumentar a área superficial para que os microrganismos aproveitassem ao máximo os nutrientes. Antes da alimentação, os biodigestores passaram por um processo de lavagem comum, secagem interna com nitrogênio e de remoção do ar com uma bomba de vácuo, a fim de retirar todo o oxigênio de dentro do frasco, visto que a digestão é anaeróbia, ou seja, sem a presença de oxigênio. A matéria-prima foi diluída com água de torneira no primeiro biodigestor e com esgoto no segundo para avaliar a influência do esgoto sanitário na biodigestão: ambos foram inoculados com lodo seco, diluído junto à matéria-prima. A Figura 11 mostra os biodigestores prontos e alimentados. Para a alimentação deste reator utilizou-se resíduos alimentares da cantina do INT e lodo seco proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto Alegria, localizada no Caju-RJ. No primeiro reator foram inseridos 203,20 gramas de resíduos alimentares e 50,79 gramas de lodo e avolumou-se com água até dois litros, já para o segundo reator foram inseridos 203,16 gramas de resíduo e 50,79 gramas de lodo e avolumou-se com esgoto até dois litros. Cabe ressaltar que as quantidades de resíduo e lodo foram calculadas de modo a manter no máximo 8% de sólidos totais no reator.



Figura 11: Biodigestores de 3L alimentados, à esquerda (meio diluente: água) e à direita (meio diluente: esgoto).

O processo de biodigestão começa a gerar biogás em torno de 20 dias após a alimentação, com isso, os biodigestores ficaram em operação durante um mês e sua temperatura externa foi monitorada diariamente. Após o décimo segundo dia foi observada uma inconstância na temperatura, com variações bruscas de um dia para o outro. Esta variação é prejudicial aos microrganismos que precisam de uma temperatura interna ótima de, aproximadamente, 35 °C e, por este fato, os biodigestores foram colocados em um banho automático com temperatura constante de 30 °C. A Figura 12 mostra os biodigestores dentro do banho e a temperatura fixada em 30 °C e envoltos em papel alumínio para que o calor ficasse conservado dentro dos recipientes.



Figura 12: Biodigestores de 3 L dentro do banho automático (à esquerda) e temperatura controlada (à direita).

Já na segunda fase, foi feita uma análise preliminar dos parâmetros físicos nos biodigestores de 250mL (B1, B2, B3 e B4) para obter a melhor condição e utilizá-la nos biodigestores de 3L e 10L.

Para os testes dos parâmetros físicos foram usados quatro biodigestores de 250 mL alimentados com resíduo orgânico e lodo primário como substrato e lodo digerido como inóculo e todos com adição de glicerol residual. As condições estudadas encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Condições de operação dos biodigestores de 250mL

Biodigestor	Temperatura	Agitação
B1	-	-
B2	✓	-
B4	-	✓
B5	✓	✓

Utilizou-se 50% de *headspace* também e a proporção 2/1 de inóculo/substrato, alimentando 83,4 mL de lodo digerido e 41,7 mL de substrato, sendo 2,52 gramas de resíduo orgânico avolumado em 20,9 e 1,83 gramas de lodo primário avolumado em 20,9 mL de solução e 1 mL de glicerol residual.

Os biodigestores foram fechados, testou-se vazamentos com nitrogênio e foram colocados em suas condições, a Figura 13 mostra os biodigestores de 250 mL.



Figura 13: Biodigestores de 250 mL alimentados

Com relação aos biodigestores de 3L houve mudanças no procedimento em relação à primeira fase visando a potencialização da geração de metano. Aumentou o *headspace* de 40% para 50%, por questões de segurança, inseriu-se dois tipos de lodo de ETE para trabalhar como substrato e inóculo. Então, para o substrato foram utilizados os resíduos orgânicos provenientes do RU da UFRJ e lodo primário, e como inóculo foi utilizado lodo digerido.

O lodo digerido, utilizado como inóculo, foi aclimatado dentro de um terceiro reator de 10L, conforme Figura 14, à fim de garantir uma atmosfera ausente de oxigênio (O₂) em sua forma livre.

Nos biodigestores de dez litros foram usados cinco litros de volume útil e proporção 2/1 de inóculo/substrato, com isso foi alimentado 3,4 litros de lodo digerido e 1,6 litros de substrato (50% de resíduo alimentar e 50% de lodo primário).

Para o primeiro biodigestor não foi adicionada o glicerol residual, então a alimentação foi de 88,03 gramas de resíduo orgânico avolumado para 800 mL e 64,64 gramas de lodo primário avolumado em 800 mL de solução.

Já para o segundo biodigestor houve a inserção de glicerol residual de 1% v/v, então a alimentação foi de 87,15 gramas de resíduo orgânico avolumado em 792 mL de solução, 63,36 gramas de lodo primário avolumado em 792 mL de solução e 16 mL de glicerol residual.

Os reatores foram fechados, testou-se vazamentos inserindo nitrogênio e deixando uma certa pressão interna. Comprovado que não havia vazamentos eles foram envoltos em fibra de vidro e colocados numa placa de aquecimento à 50°C e agitação constante, como pode ser observado nas Figuras 14 e 15.



Figura 14: Biodigestores prontos com e sem a manta de fibra de vidro



Figura 15: Biodigestores prontos nas placas de aquecimento e agitação

Nos biodigestores de três litros utilizou-se os mesmos substratos e inóculo do experimento anterior, bem como 50% de *headspace*, por questões de segurança. Sendo assim 1,5 litros de volume útil e proporção 2/1 de inóculo/substrato, com isso foi alimentado um litro de lodo digerido e 0,5 litro de substrato (50% de resíduo alimentar e 50% de lodo primário).

Para o primeiro biodigestor não foi adicionada o glicerol residual, então a alimentação foi de 29,67 gramas de resíduo orgânico avolumado para 250 mL e 20,20 gramas de lodo primário avolumado em 250 mL de solução.

Já para o segundo biodigestor houve a inserção de glicerol residual de 1% v/v, então a alimentação foi de 29,37 gramas de resíduo orgânico avolumado em 247,5 mL de solução, 20,0 gramas de lodo primário avolumado em 247,5 mL de solução e 5 mL de glicerol residual.

Os reatores foram previamente fechados e a alimentação ocorreu através da escotilha de alimentação, testou-se vazamentos inserindo nitrogênio e deixando uma certa pressão interna. Comprovado que não havia vazamentos eles foram inseridos em banho LAUDA à temperatura constante de 35°C conforme Chen, Cheng e Creamer (2008), como pode-se observar na Figura 16.



Figura 16: Biodigestores de 3 litros e 250 mL no banho LAUDA

A Tabela 5 mostra as quantidades alimentadas nos biodigestores de três litros na primeira fase do trabalho.

Tabela 5: Quantidade de cada substrato alimentado nos biodigestores na primeira fase do trabalho.

Biodigestor	Resíduo orgânico (g)	Lodo seco (g)	Meio diluente
3L	203,2	50,79	Água
3L	203,16	50,79	Esgoto sanitário

A Tabela 6 mostra as quantidades de substrato e inóculo, bem como o volume de glicerol residual, alimentados em todos os biodigestores da segunda fase do trabalho.

Tabela 6: Quantidade de cada substrato alimentado na segunda fase do trabalho.

Biodigestor	Resíduo orgânico (g)	Lodo primário (g)	Lodo digerido (L)	Glicerol (mL)
3L	29,37	20,0	1,0	5,0
3L	29,67	20,2	1,0	X
10L	88,03	64,64	3,4	X
10L	87,15	63,36	3,4	16,0
250mL	2,52	1,83	0,0834	1,0

3.4 Metodologia analítica

3.4.1 Ensaio de sólidos totais, fixos e voláteis

Com base na revisão bibliográfica, antes de começar os experimentos deste trabalho determinou-se o teor de sólidos totais dos resíduos alimentares da cantina do INT e do RU da UFRJ, matéria-prima utilizada para a alimentação dos biodigestores. Esta análise é necessária porque o máximo de sólidos totais presentes no biodigestor deve ser de 8%, pois garante uma máxima área superficial para os microrganismos (DEGANUTTI *et al.*, 2002). A produção de biogás está diretamente relacionada com a quantidade de sólidos voláteis presentes na matéria-prima, quanto maior o teor de sólidos voláteis maior será a produção de biogás, segundo Oliveira (2009).

Para tal foi desenvolvida no laboratório uma metodologia de determinação de sólidos totais (ST), voláteis (SV) e fixos (SF) de amostras sólidas baseada em trabalhos anteriores da literatura e validada com excelência no Estudo Interlaboratorial em Digestão Anaeróbia, organizado pela Rede Biogásfert no qual o Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes (LACOL) participou e obteve resultado satisfatório em todos os parâmetros analisados, indicando uma harmonização dos procedimentos analíticos com outros laboratórios no país. O procedimento desenvolvido no laboratório é descrito a seguir.

Procedimento para o Ensaio de Sólidos

- 1) O ensaio é realizado em triplicata. Para tal, deve-se iniciar calcinando três cadinhos de porcelana em mufla na faixa entre 550 a 600 °C por 30 minutos;
- 2) Resfriar a temperatura ambiente por 30 minutos em dessecador sem sílica;
- 3) Pesar os cadinhos resfriados e anotar as massas;
- 4) Pesar aproximadamente 5,0 g de amostra em cada cadinho;
- 5) Levar os cadinhos com amostra à estufa com temperatura entre 100 e 110 °C por 1 hora;
- 6) Retirar os cadinhos da estufa e resfria-lo no dessecador sem sílica por 1 hora. Após isso, pesa-los e anotar a massa;

→ Cálculo de Sólidos Totais (S_T):

$$S_T (\%) = \frac{M_{estufa}}{M_{amostra}} * 100 \quad (1)$$

$M_{amostra}$: Massa de aproximadamente 5,0 g de amostra;

M_{estufa} : Massa de amostra resfriada após 1 hora em estufa ($\pm 100^\circ \text{C}$);

7) Após a pesagem para o cálculo de sólidos totais, levar o cadinho com amostra à mufla ($\pm 600^\circ \text{C}$) por duas horas;

8) Retirar os cadinhos da mufla, resfriá-los em dessecador por duas horas e em seguida pesá-los;

→ Cálculo da relação de Sólidos Fixos (S_F):

$$S_F (\%) = \frac{M_{mufla}}{M_{amostra}} * 100 \quad (2)$$

M_{mufla} : Massa do resíduo resfriado após 2 horas em mufla ($\pm 600^\circ \text{C}$);

→ Cálculo de Sólidos Voláteis (S_V):

Para se obter o teor de sólidos voláteis (S_V) em % basta fazer a diferença entre o teor de sólidos totais (S_T) e o teor de sólidos fixos (S_F).

$$S_V (\%) = S_T - S_F \quad (3)$$

Para realização do estudo de comportamento dos sólidos no resíduo, as amostras foram coletadas as segundas, quartas e quintas feiras e os teores de sólidos monitorados as terças, quintas e sextas feiras durante todo o mês de abril/2016.

3.4.2 Análise da relação Carbono/Nitrogênio

Para avaliar os teores de carbono e nitrogênio dos resíduos alimentares e do lodo, uma análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN) através do

equipamento CHN628 da marca LECO foi realizada em alíquotas do resíduo. Esta análise é importante, pois a relação carbono/nitrogênio deve ficar em torno de 20-30/1. Caso esta relação seja elevada ocorrerá um *déficit* de nitrogênio (N_2), vital para a síntese celular, por outro lado, se essa razão for baixa ocorrerá um acúmulo de nitrogênio (N_2) formando assim amônia (NH_3) tóxica aos microrganismos presentes na digestão anaeróbia, segundo Hartmann e Ahring (2004).

3.4.3 Análises cromatográficas

3.4.3.1 Análises cromatográficas da primeira fase do trabalho

Periodicamente análises da composição do gás gerado deveriam ser realizadas através de um cromatógrafo em fase gasosa equipado com um detector de ionização por chama (DIC) e um detector de condutividade térmica (DCT). As amostras de gás eram colocadas em bolsas de amostragem de um litro – *bags* -, como pode ser visto na Figura 17, para que o gás pudesse ser analisado por cromatografia a gás.



Figura 17: Bolsas de amostragem (*bags*)

Para esta análise, foi utilizado um cromatógrafo a gás da marca Agilent modelo 6890 Plus, como pode ser visto na Figura 18, equipado com detector de ionização por chama (DIC).



Figura 18: Cromatógrafo em fase gasosa Agilent 6890 Plus

A composição de qualquer gás analisado pelo cromatógrafo em fase gasosa pode ser calculada através da Equação 4:

$$x_i = x_{pr,i} \frac{A_{ci}}{A_{cj}} \quad (4)$$

onde:

x_i é a concentração do componente na amostra, expressa em porcentagem molar (% molar);

A_{ci} é a área do pico do componente na amostra;

A_{cj} é a área do pico do componente no padrão de referência;

$x_{pr,i}$ representa os valores de concentração do padrão de referência, expressos em porcentagem molar (% molar);

i é o índice correspondente a cada constituinte presente no padrão de referência.

3.4.3.2 Análises cromatográficas da segunda fase do trabalho

As análises da segunda fase do trabalho foram realizadas em um micro cromatógrafo em fase gasosa da Thermo modelo C2V equipado com dois detectores de condutividade térmica (DCT), como mostra a Figura 19.



Figura 19: Micro cromatógrafo a gás Thermo

Este cromatógrafo é portátil e as análises demoram cerca de 60 segundos, possibilitando diversas por dia. As amostras são injetadas através das bolsas de amostragem, no caso dos biodigestores de 10L, ou por seringas, no caso dos biodigestores de 3L e 250 mL.

A composição de qualquer gás analisado pelo cromatógrafo em fase gasosa pode ser calculada, também, através da Equação 4.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões

4.1 Resultados das análises de sólidos totais e CHN

4.1.1 Resultados das análises de sólidos totais

Aplicando a Equação (1) chegou-se ao resultado aproximado de 46% de sólidos totais nos resíduos alimentares da cantina do INT. Já para os resíduos alimentares do RU da UFRJ chegou-se ao resultado de 67,4% de sólidos totais.

4.1.2 Resultados das análises de CHN

Os resultados de CHN foram de 14,7% de carbono e 1,15% de nitrogênio para os resíduos da cantina do INT e de 8,84% de carbono e 1,39% de hidrogênio para o lodo. Já para os resíduos do RU da UFRJ chegou-se ao resultado de 53,3% de carbono e 2,95% de nitrogênio

A relação carbono/nitrogênio da amostra do INT ficou em 12,78 e a da amostra da UFRJ ficou em 18. A primeira ficou abaixo da ideal, com isso espera-se um biogás mais pobre em metano e uma concentração maior de dióxido de carbono (CO₂), já a segunda ficou bem próxima do valor ideal que é de 30/1.

4.2 Avaliação da produção de biogás

A produção de biogás foi avaliada através da pressão dentro dos biodigestores medida através de manômetros. A pressão medida foi cumulativa, em nenhum momento foi realizada qualquer purga de gás.

4.2.1 Avaliação da produção de biogás nos biodigestores de 3L da primeira e segunda fases

A produção de biogás deveria ser verificada através da pressão, porém não pôde ser avaliada com eficácia nos biodigestores de três litros devido à sua configuração que foi desfavorável. Como a cânula que leva o gás do biodigestor até o manômetro não possuía um recipiente para remover a água, esta ficou acumulada impedindo a passagem do gás e, com isso, a leitura do manômetro ficou sempre em zero psi. A Figura 20 mostra a cânula e a configuração desfavorável.



Figura 20: Cãnula saindo do biodigestor e indo diretamente ao manômetro, sem recipiente para coleta de umidade.

4.2.2 Avaliação da produção de biogás nos biodigestores de 10L e 250mL da segunda fase

Para os biodigestores de 10L e 250 mL o monitoramento da pressão interna do gás mostrou-se eficaz e os resultados estão localizadas no Anexo A.

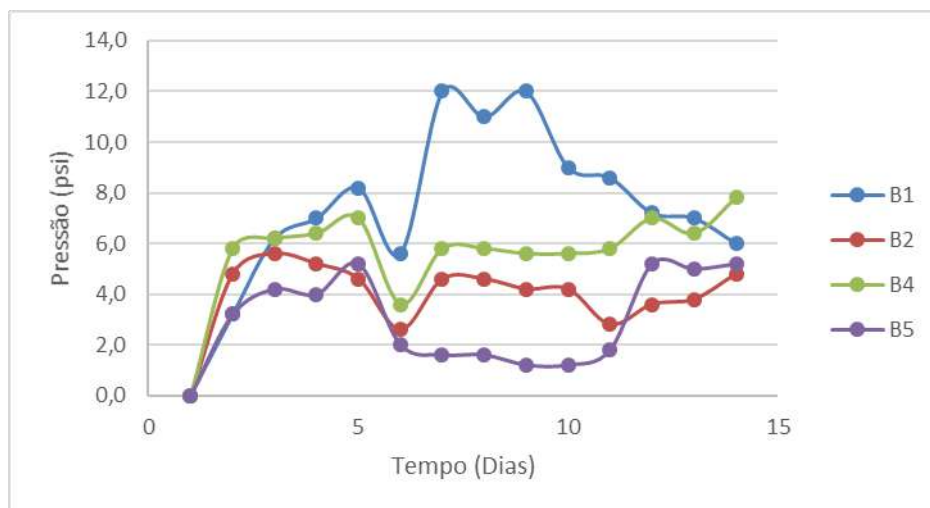


Figura 21: Gráfico da evolução da pressão versus tempo em dias. Legenda: B1 - Sem aquecimento (temperatura ambiente – aproximadamente 28°C) e sem agitação, B2 - Com aquecimento em placa de aquecimento à 50°C e sem agitação, B4 - Sem aquecimento (temperatura ambiente – aproximadamente 28°C) e com agitação magnética (600rpm), B5 - Com aquecimento em placa de aquecimento à 50°C e com agitação magnética (600rpm).

Analisando a Figura 21 pode-se notar que houve produção de gás nos quatro biodigestores e que nos primeiros dias as pressões eram muito parecidas, porém a partir do 5º dia o biodigestor na condição 1 (sem agitação e em temperatura ambiente) começou a produzir bem mais gás que os outros três.

No dia 10 foi necessário realizar um alívio na pressão do B1 porque a mesma encontrava-se muito elevada correndo o risco de explodir o biodigestor. Após este procedimento verificou-se uma queda na pressão nos dias subsequentes, deixando dúvidas se essa queda é normal ou aconteceu somente por causa do alívio.

Ao final do experimento, no dia 19, observou-se uma pressão maior no biodigestor B4, condição com aquecimento em placa de aquecimento à 50°C e sem agitação.

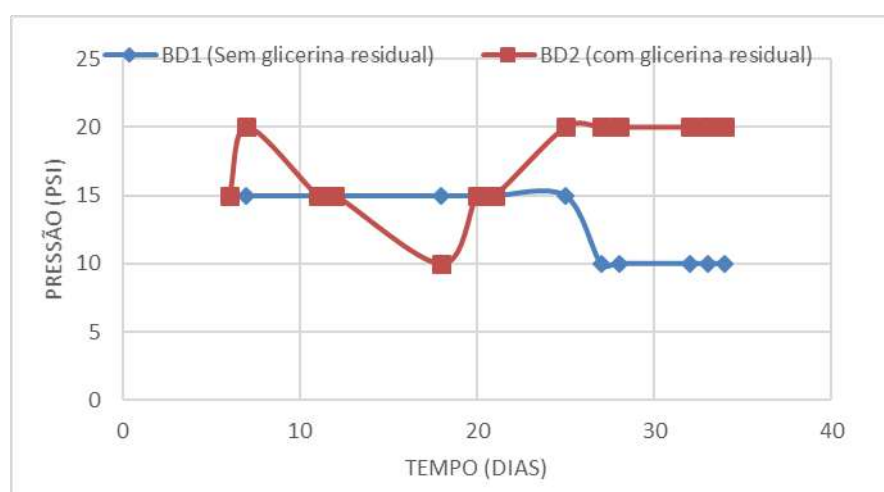


Figura 22: Gráfico da evolução da pressão versus tempo em dias

Analisando a Figura 22 pode-se notar que houve produção de gás nos biodigestores com as duas diferentes alimentações e que nos primeiros dias as pressões eram praticamente iguais, porém a partir do 25º dia o biodigestor que possuía a adição de glicerol residual produziu o dobro de gás em comparação com o biodigestor sem adição.

4.3 Composição do biogás

4.3.1 Composição do biogás da primeira fase do trabalho

Os resultados da primeira fase do experimento, dois biodigestores de 1,5L de volume útil usando água (primeiro reator) e esgoto (segundo reator) como meios diluentes, bem como a frequência de coleta e análises estão descritos a seguir.

O experimento dos biodigestores de 3L durou trinta dias e só foi feita uma análise ao final do mesmo devido a impossibilidades técnicas.

Durante o experimento a cânula do biodigestor que usava água como meio diluente soltou-se do manômetro ocasionando o escapamento de todo o gás armazenado, este incidente ocorreu após 18 dias de operação. A cânula foi colocada de volta em seu devido lugar e o experimento teve prosseguimento até o final, porém esse vazamento quase no final acabou com todos os resultados e, por consequência, com a comparação entre as duas diferentes alimentações. Após os 30 dias o resultado da composição do biogás neste biodigestor com água como meio diluente deu 0% mol/mol de metano.

De acordo com a Figura 23 é possível observar o pico característico do metano na análise do biogás gerado a partir do biodigestor alimentado com resíduos alimentares e diluído com esgoto. Baseando-se na calibração, o pico de metano identificado no cromatograma corresponde a um teor de aproximadamente 60% mol/mol deste componente. O cálculo da concentração do metano foi feito através da Equação 4.

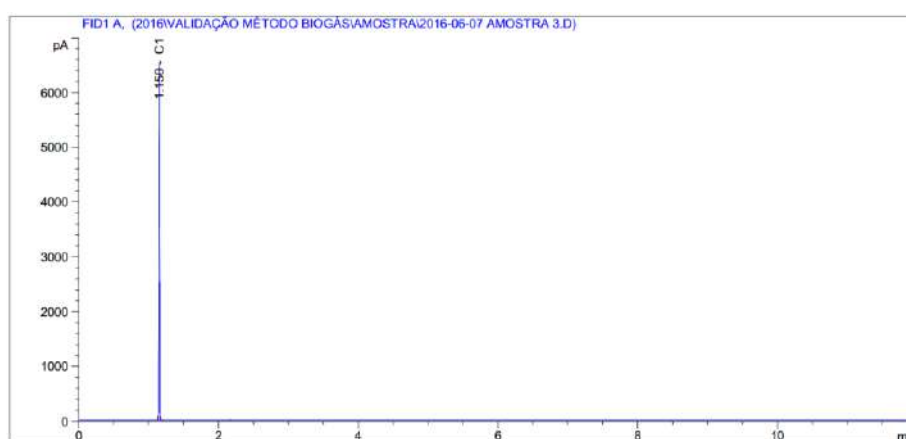


Figura 23: Cromatograma do biogás bruto com esgoto analisado pelo CG-DIC.

4.3.2 Composição do biogás na segunda fase do trabalho

Como a comparação das duas alimentações distintas não puderam ser realizadas e um novo substrato (lodos de ETE e adição de glicerol residual) foi proposto os experimentos foram repetidos na segunda fase do trabalho em sua escala original (3 litros) e com um aumento de escala (10 litros). Uma análise dos parâmetros físicos temperatura e agitação em biodigestores de 250 mL foi realizadas preliminarmente para definir qual a melhor condição de operação para aplicar nos biodigestores de 3L e 10L.

Para os biodigestores de 10 litros as análises de composição eram realizadas duas vezes por semana e para os de 3 litros uma vez por semana. Na última semana foram realizadas mais de uma análise para verificar a estagnação da produção de gás e até redução da mesma para finalizar os experimentos.

4.3.2.1 Avaliação da influência dos parâmetros físicos agitação e temperatura

Como na primeira fase do trabalho a variação de temperatura na sala onde os biodigestores foram armazenados era muito grande, sendo assim um novo experimento avaliando a influência da temperatura e agitação na geração e composição do biogás foi proposto e realizado.

Na avaliação da produção de biogás analisando a pressão, a condição que mais gerou gás foi sem agitação e em temperatura ambiente (28°C aproximadamente), biodigestor B1. Os resultados da composição de metano podem ser observados nas Tabelas 7, 8, 9 e 10.

Tabela 7: Composição do biogás gerado no biodigestor de 250 mL. Sem agitação e à temperatura ambiente (28°C aproximadamente)

B1				
Dia	Data	Metano (% mol/mol)	CO₂	N₂/Outros
5	02/mai	3,1961	36,8682	58,7634
19	16/mai	7,5214	38,4589	50,3269

Tabela 8: Composição do biogás gerado no biodigestor de 250 mL. Sem agitação e no banho automático LAUDA à 35°C

B2				
Dia	Data	Metano (% mol/mol)	CO₂	N₂/Outros
5	02/mai	3,5099	38,4886	56,5085
19	16/mai	9,2145	39,2569	52,0034

Tabela 9: Composição do biogás gerado no biodigestor de 250 mL. Agitação magnética (600 rpm) e à temperatura ambiente (28°C aproximadamente).

B4				
Dia	Data	Metano (% mol/mol)	CO₂	N₂/Outros
5	02/mai	2,7487	39,5266	55,9092
19	16/mai	4,3698	40,2547	50,2659

Tabela 10: Composição do biogás gerado no biodigestor de 250 mL. Agitação magnética (600 rpm) e aquecimento em placa de aquecimento à 50°C.

B5				
Dia	Data	Metano (% mol/mol)	CO₂	N₂/Outros
5	02/mai	0,2811	29,6054	628605
19	16/mai	0,3751	35,7327	57,7535

Diferentemente dos resultados de produção, em que o B1 mostrou-se ser a condição mais promissora, no resultado de composição a condição B2 gerou os melhores resultados com 9,2145% mol/mol de metano depois de 19 dias de experimento.

Vale ressaltar a condição B5 onde havia aquecimento em placa de aquecimento à 50°C e agitação magnética (600 rpm) e a geração de metano foi muito baixa, 0,3751% mol/mol de metano após 19 dias de experimento. Esta era a condição que, de acordo com a literatura, era a mais adequada para uma maior geração de biogás, porém não foi o observado. Analisando a fundo as possíveis causas, verificou-se que a placa de aquecimento e agitação fornece uma temperatura além do limite aguentado pelos microrganismos metanogênicos, mesmo na menor potência da placa. Logo, o que aconteceu foi possivelmente a morte de praticamente todos os microrganismos metanogênicos do sistema parando a digestão anaeróbica antes do fim e produzindo outros gases que não os esperados para este sistema.

De posse destes resultados os biodigestores de 3 e 10 litros foram montados na condição que deu os melhores resultados, com aquecimento constante em placa de aquecimento à 40°C ou dentro de um banho automático LAUDA à 35°C e sem agitação. Os de 3 litros ficaram num banho LAUDA à 35°C e os de 10 litros ficaram numa placa de aquecimento à, aproximadamente, 40°C.

4.3.2.2 Composição do biogás nos biodigestores de 3L

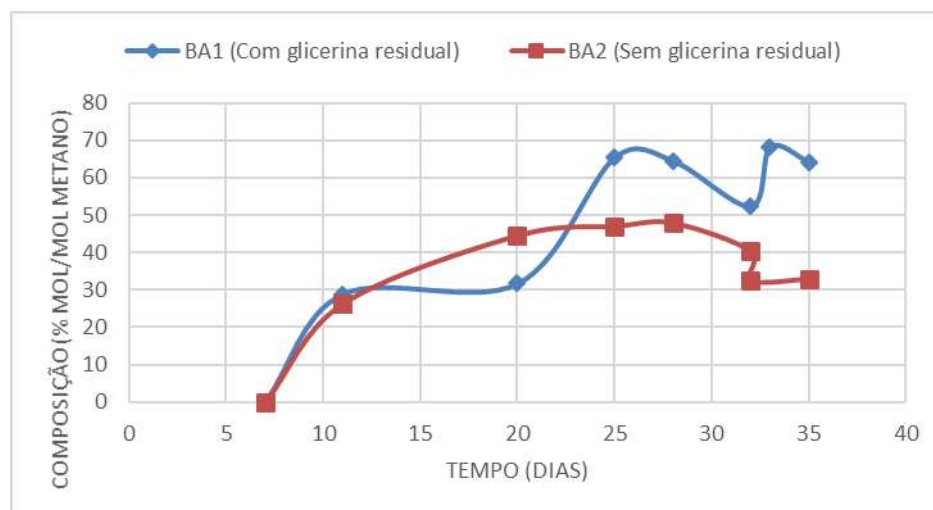


Figura 24: Gráfico da comparação da composição de metano através do tempo de experimento. Volume útil 1,5L, temperatura do banho de 35°C, sem agitação.

A análise da Figura 24 mostra que a adição de glicerol no sistema produziu mais metano a partir do 23º dia de experimento.

Verifica-se que o pico da composição de metano no biodigestor com adição de glicerol foi no dia 33 com 68,2393% mol/mol, já o pico da composição de metano no reator sem adição de glicerol foi no dia de operação 28 com 47,8356% mol/mol.

A produção de metano foi potencializada em 42,65% quando adicionado 1% de glicerol, como pode-se observar comparando a maior produção de BA1 com a de BA2. A produção de metano começou bem parecida e após 12 dias de experimento o biodigestor sem adição de glicerol residual produziu mais metano até o 23º dia quando o biodigestor com adição de glicerol passou a produzir mais metano até o final do experimento.

4.3.2.3 Composição do biogás nos biodigestores de 10L

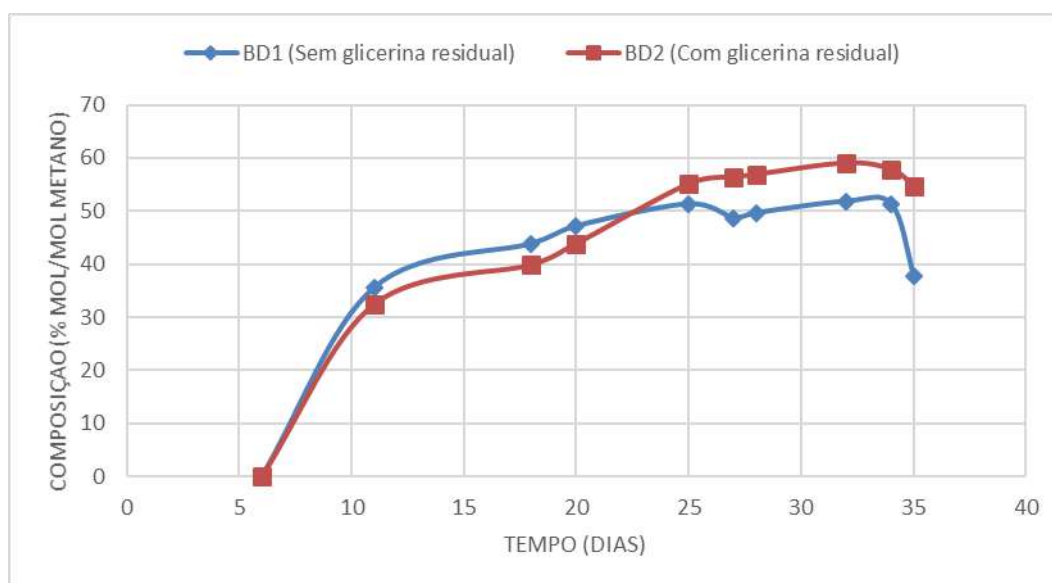


Figura 25: Gráfico da comparação da composição de metano através do tempo de experimento. Volume útil de 5L e colocado em uma placa de aquecimento à 50°C, sem agitação.

A análise da Figura 25 mostra que a adição de glicerol no sistema produziu mais metano a partir do 22º dia de experimento.

Verifica-se que o pico da composição de metano no biodigestor com adição de glicerol foi no dia 33 com 59,0164% mol/mol, já o pico da composição de metano no biodigestor sem adição de glicerol foi no dia 25 com 51,8215% mol/mol.

A produção de metano foi potencializada em 13,88% quando adicionado 1% de glicerol, como pode-se observar comparando a maior produção de BD1 com a de BD2. O perfil de produção deste experimento foi muito parecido com o do experimento anterior onde a composição começa muito parecida, em seguida o biodigestor sem adição de glicerol residual produz um pouco mais e, por fim, o biodigestor com adição de glicerol residual produz mais até final.

Os experimentos de 3L e 10L permitem chegar à conclusão de que a adição de glicerol potencializa a produção de biogás aumentando o teor de metano, porém quando aumentada a escala a potencialização diminuiu consideravelmente. As causas possíveis podem ser a agitação deficiente, como o biodigestor de 10L é muito grande pode ser que a homogeneização não tenha ocorrido como deveria. Outra causa pode ser o percentual de glicerol residual adicionado que foi o mesmo nos dois tamanhos (3L e 10L), para o de 10L talvez tenha que adicionar um percentual maior.

Capítulo 5 – Conclusão e propostas para trabalhos futuros

5.1 Conclusão

A escolha dos substratos e inóculo mostrou-se adequada, uma vez que todas elas são resíduos que seriam destinados aos aterros sanitários. São matérias-primas de fácil manuseio e que não oferecem grandes riscos à saúde e uma vez comprovada a eficiência da produção e potencial de geração de energia do biogás será uma produção ecologicamente correta, transformando rejeitos em produtos com valor agregado e que o mercado necessita.

A confecção dos biodigestores foi satisfatória para a proposta deste trabalho, porém para investigar mais a fundo a produção de biogás através da biodigestão anaeróbica melhorias devem ser feitas nos reatores de modo que possa existir um recipiente para captar a água que o biogás arrasta. Algumas possíveis alterações são incorporar uma abertura para inserir um termopar e controlar a temperatura em tempo real, ou uma escotilha para amostrar o líquido do reator e realizar análises de pH, condutividade, demanda química de oxigênio (DQO), entre outras.

Na primeira fase deste trabalho o objetivo foi confeccionar um biodigestor funcional de baixo custo e que fosse eficiente. Infelizmente, a comparação entre água e esgoto não pôde ser feita, porém no biodigestor que não foi prejudicado, usando esgoto como meio diluente, o resultado final foi de 60% mol/mol de metano. Resultado este bem satisfatório, mostrando que o reator produzido e os substratos utilizados têm elevado potencial.

A adição de glicerol residual bem como a adição de um inóculo e a troca do lodo na segunda fase deste trabalho acarretaram num resultado bastante animador. Foi comprovado que a presença do lodo digerido como inóculo foi fundamental e acelerou a produção de gás.

O lodo primário também ajudou a melhorar o sistema, uma vez que ele é rico em matéria orgânica e microrganismos. Outro fator positivo é que ele é líquido e o lodo da primeira fase era um pó, acaba sendo mais fácil de se manusear.

O glicerol residual potencializou o sistema de biodigestão. No biodigestor de três litros o pico de metano foi de 47,8356% mol/mol sem adição de glicerol residual, já com adição de 1% de glicerol residual no sistema o pico de metano foi de 68,2393% mol/mol, uma potencialização de 42,65%.

Já para o sistema de dez litros também houve uma potencialização da produção de metano, porém menor. No biodigestor sem adição de glicerol residual, o teor de metano foi de 51,8215% mol/mol e adicionando 1% de glicerol residual o teor foi de 59,0164% mol/mol, uma potencialização de 13,88%. Comparando os biodigestores de 3 e 10 litros verifica-se que os de 3 litros deram uma maior potencialização de geração de metano.

Os reatores de 250 mL foram de suma importância para identificar e utilizar as condições ótimas de produção. A condição que gerou mais biogás foi sem aquecimento (temperatura ambiente) e sem agitação, porém a que gerou um maior percentual de metano dentro do biogás foi com aquecimento numa placa à 50°C e sem agitação, sendo esta última a utilizada no trabalho. Entretanto a melhor condição segundo a literatura era com aquecimento e com agitação, mas a placa de aquecimento e agitação utilizada forneceu muito calor mesmo na menor temperatura da placa (a umidade da placa evaporou e o volume dentro do reator diminuiu drasticamente, confirmando a temperatura muito alta como problema) inibindo a digestão anaeróbica.

Sendo assim, a utilização do glicerol bruto pode ser uma perspectiva promissora em estações de tratamento de esgoto combinado ao tratamento de resíduos, uma vez que aumenta significativamente a produção de metano. A adição de glicerol pode ser otimizada em sistemas contínuos, entretanto, doses elevadas podem acarretar em acúmulo de ácidos, instabilidade da digestão anaeróbia e sobrecarga do sistema (RAZAVIARANI e BUCHANAN, 2015).

5.2 Propostas para trabalhos futuros

Para o prosseguimento deste trabalho, sugere-se

- Aprimorar os sistemas de aquecimento, agitação e monitoramento da temperatura para que possa encontrar uma condição ótima para a geração de biogás em escala de bancada;
- Testar empregar um sistema contínuo usando a condição ótima encontrada com o objetivo de produzir mais gás e estudar o comportamento da produção do mesmo por mais dias e encontrar uma tendência;
- Aumentar a escala de bancada para uma escala piloto contínua com o objetivo de verificar se a geração de metano se mantém a mesma;
- Verificar a viabilidade da utilização do metano produzido em escala piloto para geração de energia elétrica e gás veicular, através de um balanço entre energia de

entrada (agitação, bomba de circulação, aquecimento, por exemplo) e energia de saída (metano produzido) para verificação da energia excedente, que pode ser aplicada, entre outros casos, como combustível para o caminhão que realiza o transporte das matérias-primas (glicerol e/ou resíduo orgânico) até a estação de tratamento de esgoto;

- Pesquisar outros tipos de substratos que possam gerar melhores resultados do que o glicerol residual, já que a potencialização caiu consideravelmente com o aumento do volume dos biodigestores.

Capítulo 6 – Referências bibliográficas

AFANAH, S. Tecnologia de produção de biogás industrial e artesanal: uma proposta de abordagem para o ensino médio. 2011;

ANGELIDAKI, I. et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 927-934, 2009;

AQUINO, S.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Eng. Sanit. Ambient**, v. 10, n. 2, p. 152-161, 2005;

BARCELOS, B. **Avaliação de diferentes inoculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos. 2009. 51f.** 2009. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília;

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

CHEN, Y.; CHENG, J.; CREAMER, K. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4044-4064, 2008;

CHERNICHARO, C.; SPERLING, M. Considerações sobre o dimensionamento de sistemas de lodos ativados de fluxo intermitente (batelada). In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 17.** ABES, 1993. p. 118-29;

CHRISTY, P.; GOPINATH, L. R.; DIVYA, D. A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 167-173, 2014;

CICERONE, R.; OREMLAND, R. S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 2, n. 4, p. 299-327, 1988;

CLARK, B.; MORRIS, J. M. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. 1991;

COELHO, S. et al. Estado da arte do biogás. Relatório de Acompanhamento. **Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2001;**

COSTA, D. Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização. (Monografia). **Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE)** da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002;

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

EMBRAPA. Concentração de Inóculo e Produção de Biogás em Reator de Batelada Alimentado com Água Residuária de Suinocultura. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 48, 2012;

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. **Relatório Final 2014**. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal.aspx?anoColeta=2014&anoFimColeta=2013>>. Acesso em 14 de Julho de 2016;

ESPOSITO, G. et al. Bio-methane potential tests to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates. **The Open Environmental Engineering Journal**, v. 5, n. 1, 2012;

GASPAR, R. et al. Utilização de biogestores em pequenas e médias propriedades rurais, com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na Região de Toledo-PR. 2003;

GONÇALVES, H. **O Biodigestor Como Princípio de Sustentabilidade de uma Propriedade Rural.** Disponível em: <http://www.catolica-to.edu.br/portal/portal/downloads/docs_gestaoambiental/projetos2009-1/1periodo/O_biodigestor_como_principio_de_sustentabilidade_de_uma_propriedade_rural.pdf>. Acesso em 22/02/2016;

HARTMANN, H.; MØLLER, H.; AHRING, B. Efficiency of the anaerobic treatment of the organic fraction of municipal solid waste: collection and pretreatment. **Waste Management & Research**, v. 22, n. 1, p. 35-41, 2004;

JENSEN, P. et al. Anaerobic codigestion of sewage sludge and glycerol, focusing on process kinetics, microbial dynamics and sludge dewaterability. **Water Research**, v. 67, p. 355-366, 2014;

KHALIL, M.; RASMUSSEN, R. The changing composition of the Earth's atmosphere. **Composition, Chemistry and Climate of the Atmosphere**, p. 50-87, 1995;

KONRAD, O. et al. Avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes e glicerol residual. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 2, n. 4, 2011;

LI, Y. et al. Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates. **Bioresource Technology**, v. 149, p. 565-569, 2013;

MATA-ALVAREZ, J. et al. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 412-427, 2014;

MATA-ALVAREZ, J.; MACE, S.; LLABRES, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 74, n. 1, p. 3-16, 2000;

MATA-ALVAREZ, J. (Ed.). **Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes**. IWA Publishing, 2002;

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira - Exercício de 2016**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017;

MORA, F. et al. Acceptability of gramineous and leguminous for grazing swine. **Revista Unellez de Ciencia y Tecnologia. Produccion Agricola**, v. 23, p. 1-7, 2005;

NARTKER, S. et al. Increasing biogas production from sewage sludge anaerobic co-digestion process by adding crude glycerol from biodiesel industry. **Waste Management**, v. 34, n. 12, p. 2567-2571, 2014;

OLIVEIRA, R. Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono. **Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Elétrica de São Carlos/Universidade de São Paulo. São Carlos/SP**, 2009;

PALHARES, J. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro. **Embrapa Suínos e Aves, I Curso sobre Uso de Biodigestores no Tratamento de Dejetos de Suínos. Concórdia, Sc**, v. 20, 2008;

PROINFA. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Disponível em http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/tecnologias_contempladas.html. Acesso em: 28 mar. 2017;

RAPOSO, F. et al. Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 86, n. 8, p. 1088-1098, 2011;

RAZAVIARANI, V.; BUCHANAN, I. Anaerobic co-digestion of biodiesel waste glycerin with municipal wastewater sludge: microbial community structure dynamics and reactor performance. **Bioresource Technology**, v. 182, p. 8-17, 2015;

RIVALDI, J. et al. Glicerol de biodiesel: Estratégias biotecnológicas para o aproveitamento do glicerol gerado da produção de biodiesel. **Biociência & Desenvolvimento**, v. 37, p. 44-51, 2008;

SAKUMA, A. Desenvolvimento e análise experimental de biodigestores modulares de baixo tempo de residência. 2013;

SIDDIQUI, Z.; HORAN, N. J.; ANAMAN, K. Optimisation of C: N ratio for co-digested processed industrial food waste and sewage sludge using the BMP test. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 9, n. 1, 2011.

SILVESTRE, G.; BONMATÍ, A.; FERNÁNDEZ, B. Optimisation of sewage sludge anaerobic digestion through co-digestion with OFMSW: effect of collection system and particle size. **Waste Management**, v. 43, p. 137-143, 2015;

SILVESTRE, G.; FERNÁNDEZ, B.; BONMATI, A. Addition of crude glycerine as strategy to balance the C/N ratio on sewage sludge thermophilic and mesophilic anaerobic co-digestion. **Bioresource Technology**, v. 193, p. 377-385, 2015b;

SOUZA, M. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia ("). **Revista DAE, São Paulo**, v. 44, n. 137, p. 88-94, 1984.

Anexo A- Tabelas da produção e composição do biogás na segunda fase do trabalho

Tabela: Resultados de pressão dos biodigestores de dez litros
Pressão (psi)

Dia	Data	BD1 (sem glicerol)	BD2 (com glicerol)
6	08/jun	15	15
7	09/jun	15	20
11	13/jun	15	15
12	14/jun	15	15
18	20/jun	15	10
20	22/jun	15	15
21	23/jun	15	15
25	27/jun	15	20
27	29/jun	10	20
28	30/jun	10	20
32	04/jul	10	20
33	05/jul	10	20
34	06/jul	10	20

Tabela: Resultados de pressão dos biodigestores de 250 mL
Pressão (psi)

Dia	Data	B1	B2	B4	B5
1	27/mar	0,0	0,0	0,0	0,0
2	28/mar	3,2	4,8	5,8	3,2
3	29/mar	6,2	5,6	6,2	4,2
4	30/mar	7,0	5,2	6,4	4,0
5	31/mar	8,2	4,6	7,0	5,2
5	31/mar	5,6	2,6	3,6	2,0
8	03/abr	12,0	4,6	5,8	1,6
9	04/abr	12,0	4,2	5,6	1,2
10	05/abr	9,0	4,2	5,6	1,2
11	06/abr	8,6	2,8	5,8	1,8
16	11/abr	7,2	3,6	7,0	5,2
18	13/abr	7,0	3,8	6,4	5,0
19	17/abr	6,0	4,8	7,8	5,2

Legenda 1: B1 - Sem aquecimento (temperatura ambiente – aproximadamente 28°C) e sem agitação, B2 - Com aquecimento em placa de aquecimento à 50°C e sem agitação, B4 - Sem aquecimento (temperatura ambiente – aproximadamente 28°C) e com agitação magnética (600rpm), B5 - Com aquecimento em placa de aquecimento à 50°C e com agitação magnética (600rpm)

Tabela: Evolução da composição do biogás gerado com glicerol residual no biodigestor BA1 de 3L

Composição (% mol/mol)				
Dia	Data	CH ₄	CO ₂	N ₂ /Outros
7	09/jun	31,0200	38,2132	25,5095
11	14/jun	28,8792	23,6749	38,6535
20	23/jun	31,6649	18,4373	44,3114
25	27/jun	65,3844	25,0196	7,4546
28	30/jun	64,4276	20,6496	12,0878
32	04/jul	52,2861	15,1879	24,3187
33	05/jul	68,2393	24,0077	4,5677
35	07/jul	64,1842	20,7818	11,6745

Tabela: Evolução da composição do biogás gerado sem glicerol residual no biodigestor BA2 de 3L

Composição (% mol/mol)				
Dia	Data	CH ₄	CO ₂	N ₂ /Outros
7	09/jun	37,6556	24,9487	32,3192
11	14/jun	26,299	13,6338	53,6068
20	23/jun	44,4996	20,8846	30,4038
25	27/jun	46,9718	22,2265	26,7931
28	30/jun	47,8356	22,8547	24,3872
32	04/jul	40,2892	17,1429	36,4646
32	05/jul	32,4832	15,7765	45,2265
35	07/jul	32,8919	16,4114	45,8672

Tabela: Evolução da composição do biogás gerado com glicerol residual no biodigestor BD2 de 10L

Composição (% mol/mol)				
Dia	Data	CH ₄	CO ₂	N ₂ /Outros
6	08/jun	22,6701	33,7542	38,6889
11	13/jun	32,4013	33,1161	32,9518
18	20/jun	39,8652	32,8780	22,9637
20	22/jun	43,8820	31,4464	22,7394
25	27/jun	55,1225	29,9028	12,4233
27	29/jun	56,3403	28,5379	12,6453
28	30/jun	56,8804	28,1854	10,9883
32	04/jul	59,0164	26,8109	9,9860
34	06/jul	57,7788	26,3448	12,2442
35	07/jul	54,6642	28,6627	13,9159

Tabela: Evolução da composição do biogás gerado sem glicerol residual no biodigestor BD1 de 10L

Composição (% mol/mol)				
Dia	Data	CH₄	CO₂	N₂/Outros
6	08/jun	18,9976	26,5642	50,1393
11	13/jun	35,5850	25,9717	36,0453
18	20/jun	43,8476	23,8261	28,4281
20	22/jun	47,1630	25,0612	23,4276
25	27/jun	51,3045	27,4700	15,8652
27	29/jun	48,6703	26,5439	20,7181
28	30/jun	49,6375	27,3916	18,2142
32	04/jul	51,8215	29,0992	14,6340
34	06/jul	51,2266	28,7985	15,8153
35	07/jul	37,6527	21,7718	35,552