



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

PEDRO DE SOUSA LIRA FILHO

**PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES DO
RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DO CAMPUS DO PICI**

FORTALEZA

2017

PEDRO DE SOUSA LIRA FILHO

PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES DO
RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DO CAMPUS DO PICI

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia e Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.
Co-orientador: Geísa Vieira Vasconcelos Magalhães

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F498p Lira Filho, Pedro de Sousa.
Produção de Metano a partir de Resíduos Alimentares do Restaurante Universitário do Campus do Pici /
Pedro de Sousa Lira Filho. – 2017.
64 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.
Coorientação: Profa. Ma. Geísa Vieira Vasconcelos Magalhães.
1. Biodigestão. 2. Metano. 3. Resíduo Alimentar. I. Título.

CDD 628

PEDRO DE SOUSA LIRA FILHO

PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES DO
RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DO CAMPUS DO PICI

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia e Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.
Co-orientador: Ma. Geísa Vieira Vasconcelos Magalhães.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Ma. Geísa Vieira Vasconcelos Magalhães
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Ari Clecius Alves de Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Pedro e Célia.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida e por ter me dado a oportunidade de realizar esta graduação, sempre me abençoando e protegendo durante a minha caminhada.

À minha mãe Célia, meu pai Pedro e minha irmã Danyelle, por todo o amor transmitido, por sempre me apoiar, me instruir e me dar suporte nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti, pela atenção, excelente orientação e por ter me dado a oportunidade de poder trabalhar com pesquisa durante a graduação

À minha co-orientadora Geísa Vasconcelos Vieira Magalhães pelo apoio, confiança, disponibilidade e pela ajuda com este trabalho. Foi um prazer ser seu bolsista durante a graduação.

A todos os amigos que fiz durante a graduação, em especial os do grupo FFF-Friends: Lauryanne, Sérgio, Leonardo, Marianna, Rayane, Pedro, Patrick, Washington, Vinícius, Matheus, Uly, Mariellen, Nobre e Romeu por todas as saídas, risadas e momentos em que passamos juntos.

Ao LABOSAN por ter disponibilizado meios para a realização das análises deste trabalho.

À Amanda, Paula, Renata e Leandro e todos os outros que estiveram no LABOSAN durante toda a época em que fui bolsista por toda ajuda, apoio e momentos compartilhados.

Ao Mauro e aos trabalhadores da Estação de Água e Esgoto do Pici pela disponibilização do espaço e pela ajuda na montagem e manutenção dos reatores.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Ari Clecius Alves de Lima e Ma. Geísa Vieira Vasconcelos Magalhães por terem aceitado o convite, pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

“Cada vez que você faz uma opção está transformando sua essência em alguma coisa um pouco diferente do que era antes.”

C.S. Lewis

RESUMO

A biodigestão anaeróbia é um dos métodos mais eficazes para o tratamento dos resíduos orgânicos, que tem como característica principal a produção de biogás. O objetivo desse estudo foi avaliar a produção de metano através da biodigestão dos resíduos alimentares durante 100 dias. Dentre as motivações para a pesquisa está o grande desperdício de comida e a viabilidade de tratamento dos resíduos sólidos orgânicos. O estudo foi feito em dois reatores (R1 e R2) com capacidade de 60L cada, utilizando lodo de fossa séptica da empresa Desentupidora e Limpa Fossa Estrela do Sol como inóculo e alimentados com resíduo orgânico proveniente do Restaurante Universitário da Universidade Federal do Ceará (UFC) Campus do Pici, onde no R1 inicialmente foi colocado uma carga orgânica de 16gO₂/L e no R2, 44gO₂/L. Os parâmetros analisados foram pH, alcalinidade total, ácidos graxos voláteis, sólidos totais, sólidos totais voláteis, COT%, NTK, N% e DQO. Os biodigestores mostraram atividade microbiana ideal, atingindo valores estáveis, até 40 dias desde a inoculação e posteriormente a estabilização por volta do dia 80. Foram feitas duas alimentações com 1kg de resíduo alimentar em ambos os reatores por volta dos 50º e do 70º dia de operação. A partir deste momento até 80 dias de operação, os reatores apresentaram a maior eficiência de remoção de substrato com valores próximos a 60,19% e 67,24% de remoção de DQO, 56,8 % e 53,38 % de remoção de STV no R1 e R2, respectivamente. Os valores de alcalinidade e AGV tenderam a aumentar ao decorrer da pesquisa, influenciando os valores de pH, que foi controlado utilizando bicarbonato. O volume máximo do biogás gerado nos biodigestores foi de 15,26L para o R1 e 13,45 L para o R2, sendo que o R1 apresentou uma melhor estabilidade. Quanto à porcentagem de metano no biogás, R1 apresentou o maior valor, com 62,9% contra 53% do R2. Portanto, apesar das flutuações dos valores de algumas análises, o biogás produzido apresentou boa qualidade para a possível utilização transformando-o em energia. Logo, conclui-se que é viável a produção de biogás com percentuais ótimos de metano para a geração de energia por meio da utilização de biodigestores. Entretanto deve-se avaliar melhor o tipo de inóculo e como a quantidade de resíduo alimentar utilizado no reator influencia na produção de biogás, visto que no presente trabalho a carga orgânica influenciou na quantidade produzida, pois durante esses 100 dias de experimento o biodigestor que produziu mais biogás e maiores teores de metano foi o que tinha uma menor carga orgânica.

Palavras-chave: Biodigestão. Resíduos orgânicos. Biogás. Metano.

ABSTRACT

Biodigestion is one of the most effective methods for the treatment of organic waste whose main characteristic is the production of biogas. The objective of this study was to evaluate the methane production through biodigestion of food waste during a period of 100 days. Among the motivations for this research is the great waste of food and a viability of treatment of organic solid waste. The study was carried out in two reactors (R1 and R2) with a capacity of 60L each, using septic tank sludge from Desentupidora e Limpa Fossa Estrela do Sol as inoculum and fed with organic waste from the University Restaurant of the Federal University of Ceará, located in Campus do Pici. In R1 was initially added an organic load of 16gO₂/L and in R2 it was added 44gO₂/L. The analyzed parameters were pH, total alkalinity, volatile fatty acids, total solids, total volatile solids, COT%, NTK, N% and COD. The biodigestors showed ideal microbial activity reaching stable values up to 40 days from inoculation and it stabilized around day 80. Two portions of 1kg of feed residue were added in both reactors around the 50th and the 70th day of operation. From this moment up to 80 days of operation, the reactors presented a higher substrate removal efficiency reaching values close to 80.69% and 69.05% of COD removal and 56.8% and 53.38% of STV removal in reactors 1 and 2, respectively. During the research, the values of alkalinity and AGV tended to increase, influencing the pH values, which were controlled by adding bicarbonate. The maximum volume of biogas generated in the biodigesters were 15.26L for R1 and 15.24L for R2, with R1 having a better stability. As for the percentage of non-biogas methane, R1 presented the highest value, with 62.9% versus 53% of R2. Therefore, in spite of the fluctuations in the values of some analysis, the biogas produced presented a satisfactory quality which allowed it to be used to generate electricity. Hence, one can conclude that it is viable to produce biogas with optimum percentages of methane by using biodigesters and that it can be used for the purpose of producing electricity. However, the inoculum type should be better evaluated as well as how the amount of food residue used in the reactor influences the production of biogas. The reason being that, in the present work, the organic load influenced the total amount of biogas produced, because during those 100 days of experiment the biodigester that produced more biogas and higher methane contents were the ones that had a lower organic load.

Keywords: Biodigestion. Organic Waste. Biogas. Methane

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Geração de RSU no Brasil	5
Figura 2 - Coleta de RSU no Brasil	5
Figura 3 - Participação das regiões do país no total de RSU coletado	6
Figura 4 - índice de cobertura da coleta de RSU (%).....	6
Figura 5 - Disposição final dos RSU coletados no Brasil no ano (T/ano). Erro! Indicador não definido.	
Figura 6 - Rotas metabólicas envolvidas na digestão anaeróbia	10
Figura 7 - Local onde os biodigestores foram montados.....	22
Figura 8 - Resíduo alimentar coletado do RU	22
Figura 9 - Resíduo alimentar triturado	23
Figura 10 - Lodo de fossa séptica coletado	23
Figura 11 - Biodigestores utilizados na pesquisa	24
Figura 12 - Cromatógrafo GC 17A.....	25
Figura 13 - Medidor de Pressão.....	26
Figura 14 - Valores de pH dos Reatores R1 e R2 ao longo do período experimental	29
Figura 15 - Alcalinidade total para os reatores R1 e R2 durante o período experimental.....	30
Figura 16 - Valores de ácidos graxos voláteis para R1 e R2 durante o período experimental .	31
Figura 17 - Perfis referente à relação AGV/AT para os reatores R1 e R2	32
Figura 18 - Teor de Sólidos Totais nos reatores R1 e R2 durante o período experimental	33
Figura 19 - Teor de Sólidos totais, fixos e voláteis para R1 durante o período experimental ..	34
Figura 20 - Teor de Sólidos totais, fixos e voláteis para R2 durante o período experimental ..	35
Figura 21 - Valores de DQO para os reatores R1 e R2 durante o período experimental.....	36
Figura 22 - Valores de NTK para os reatores R1 e R2 durante o período experimental	37
Figura 23 - Valores de C/N para os reatores R1 e R2 durante o período experimental.....	38
Figura 24 - Volume acumulado de biogás para R1 e R2 durante o período experimental	40
Figura 25 - Volume acumulado de metano para R1 e R2 durante o período experimental.....	40
Figura 26 - Porcentagem de metano produzido por R1 e R2 durante o período experimental	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Metodologia adotada para caracterização de resíduos.....	25
Tabela 2 – Condições de análise do biogás no GC-TCD.....	26
Tabela 3 – Resultados dos parâmetros físico químicos analisados para substrato e inóculo.....	28
Tabela 4 – Percentuais de metano obtidos em biodigestores utilizados para tratamento de resíduos sólidos orgânicos.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACFOR	Autorarquia de Regulação, Fiscalização e Controle dos Serviços Públicos de Saneamento Ambiental
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
AT	Alcalinidade Total
CH ₄	Metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
COT	Carbono Orgânico Total
COV	Carga Orgânica Volumétrica
CO ₂	Gás Carbônico
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETARs	Estações de Tratamento de águas Residuárias
GEE	Gases de Efeito Estufa
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NTK	Nitrogênio Total Kjeldhal
RSU	Resíduo Sólido Urbano
RU	Restaurante Universitário
R1	Reator 1
R2	Reator 2
STV	Sólidos Totais Voláteis
ST	Sólidos Totais
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Resíduos Sólidos Urbanos: Aspectos Gerais	4
<i>3.1.1 Classificação dos resíduos sólidos</i>	8
3.2 Digestão Anaeróbia	8
<i>3.2.1 Processo Microbiológico de Digestão Anaeróbia</i>	10
3.3 Parâmetros Fundamentais de Operação	12
<i>3.3.1 Temperatura</i>	12
<i>3.3.2 Carga Orgânica</i>	13
<i>3.3.3 Agitação</i>	14
<i>3.3.4 Umidade</i>	14
<i>3.3.5 pH, alcalinidade e ácidos graxos voláteis</i>	15
<i>3.3.6 Nutrientes</i>	16
3.4 Inóculo	17
3.5 Biogás	17
3.6 Biodigestores	18
<i>3.6.1 Tipos de Biodigestores</i>	20
4 METODOLOGIA	21
4.1 Local da pesquisa	21
4.2 Substrato e Inóculo	22
4.3 Biodigestores	24
4.4 Monitoramento das análises	24
4.5 Estimativa da produção de biogás	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.1 Análises físico-químicas do substrato e inóculo	28
5.2 Análise físico-química dos reatores	29

5.2.1 pH, alcalinidade e AGV	29
5.2.2 Série de sólidos	33
5.2.3 DQO, Carbono Orgânico Total (%), NTK, N%	36
5.2.3.1 DQO	36
5.2.3.2 NTK	37
5.2.3.3 COT (%), N% e relação C/N	38
5.2.4 Biogás e Metano	39
5.2.5 Geração de energia elétrica sustentável	42
6 CONCLUSÃO	44
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos urbanos são todos os materiais resultantes dos comércios, domicílios e da limpeza urbana. A geração desses resíduos está inteiramente ligada aos processos de urbanização e ao aspecto concentrador das relações do modo de produção capitalista, bem como à incapacidade de absorção, pelo sistema urbano, desses resíduos. (SANTOS, 2009).

Apesar de o problema ser grave e influenciar diretamente a qualidade de vida nas cidades, o sistema utilizado para coletar, tratar e dispor os resíduos sólidos não evoluiu na mesma progressão que o aumento da quantidade de seus moradores e da produção de lixo per capita. Entretanto é notável as melhorias no acesso à coleta de lixo, o tipo de maquinário para fazê-la e, em menor escala uma destinação final mais adequada. (LOPES, 2006).

Para dar um destino final correto aos resíduos sólidos, é necessário conhecer suas composição e características. Segundo IPEA (2012) são coletadas cerca de 180 mil toneladas de resíduos sólidos por dia no Brasil, em 90% do total de domicílios onde a matéria orgânica representa 51,4% do lixo diário, e apenas 31,9% é composto de material reciclável (alumínio, plásticos, papel, aço, metais e vidro).

Essa fração orgânica possui um potencial energético importante, e que normalmente é dissipado em aterros sanitários perdendo essa capacidade de gerar energia de forma sustentável. Dentre os vários métodos para o tratamento desses resíduos, têm-se a digestão anaeróbia, também conhecida como biometanização ou biogaseificação, que é um processo natural que ocorre na ausência de oxigênio e envolve a decomposição bioquímica da matéria orgânica realizada por um grupo específico de microrganismos. Esse processo resulta na produção de um gás rico em energia, o biogás e um efluente rico em nutrientes. Portanto, trata-se de uma alternativa viável e que vem sendo aceita com relevante aplicabilidade, visando à estabilização da matéria orgânica e o aproveitamento energético desses resíduos. (REIS, 2012).

O biogás é composto por uma mistura de gases que, dentre eles, os que mais se destacam são: o metano (55% a 65%) que confere poder calorífico e responsável pela geração de energia através da sua queima, gás carbônico (35% a 45%) e o gás sulfídrico (0 a 1%). A qualidade do biogás está ligada à porcentagem de metano presente no mesmo, no qual depende de vários aspectos do processo de digestão, como: temperatura, pH, microrganismos e presença de compostos inibidores.

Nos últimos anos, o crescimento da implantação de plantas de digestão anaeróbia na Europa é resultado da necessidade do tratamento dos resíduos orgânicos, antes da disposição

em aterros, haja vista a legislação de alguns países proibirem o aterramento de matéria orgânica in natura. Ademais, a demanda por energia renovável que é gerada nestas plantas, aliada a vários outros benefícios ambientais, é um fator de estímulo ao mercado energético. (REIS, 2012).

No Brasil, a utilização de biodigestão anaeróbia para tratamento de resíduos orgânicos começou a ganhar força recentemente. O País vem se empenhando para manter o equilíbrio entre as suas fontes de energia renováveis e tradicionais, e o progresso de geração de energia a partir do biogás, que tem papel importante no equilíbrio entre as fontes de energia disponíveis no país, à medida que aumenta o consumo de eletricidade. Porém, as iniciativas para geração de biogás no Brasil ainda andam a passos lentos em comparação ao panorama internacional. (KARLSSON, 2014). Alguns problemas como barreiras administrativas, falta de planejamento e envolvimento da população, custos de investimento e procedimentos burocráticos dificultam a utilização e ampliação do sistema de biogás.

Vale salientar que a utilização de biodigestores anaeróbios também é uma alternativa para os meios rurais, onde os agricultores podem utilizar não só a sobra de resíduos, mas também os dejetos de animais (bovinos e suínos) na geração de energia para a sua propriedade, visto que muitas vezes é difícil o acesso à energia em algumas fazendas e campos de agricultura. Biodigestores de menor escala são utilizados em vários países como África, Índia e China, tratando os resíduos domiciliares e usando o biogás gerado na cozinha.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a produção de biogás visando a geração de metano através da biodigestão dos resíduos alimentares oriundos do restaurante universitário da Universidade Federal do Ceará campus Pici.

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Analisar os parâmetros físicos químicos (pH, alcalinidade, ácidos graxos voláteis) no sistema de biodigestão;
- ✓ Avaliar a remoção da parte orgânica (carbono, DQO, STV), para a eficiência na produção de metano;
- ✓ Comparar a produção de biogás e sua porcentagem de metano na digestão anaeróbia com diferentes cargas orgânicas;
- ✓ Avaliar a produção de metano no sistema semi-contínuo;
- ✓ Avaliar uma possível destinação ambiental adequada dos resíduos alimentares para a serem reutilizados na biodigestão anaeróbia e produção de energia sustentável;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos Urbanos: Aspectos Gerais

Um dos grandes problemas da sociedade contemporânea é a grande geração de resíduos sólidos. A disposição dos resíduos sólidos urbanos sem nenhum controle possibilita uma série de transtornos como a contaminação do solo, do ar, das águas superficiais e subterrâneas, bem como propicia a criação de focos de proliferação de vetores transmissores de uma série de doenças e de microrganismos patogênicos, causando riscos à saúde pública. Essa grande geração pode ser associada ao aumento do grau de industrialização, à alteração qualitativa da composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e à falta de uma política específica para o setor, o reaproveitamento e a reciclagem dos resíduos. (PARANÁ, 2012).

Os locais de armazenamento e de disposição final também se tornam ambientes propícios para a proliferação de vetores e de outros agentes transmissores de doenças. Pode haver também a emissão de partículas e outros poluentes atmosféricos, diretamente pela queima de lixo ao ar livre ou pela incineração de dejetos sem o uso de equipamentos de controle adequados. De modo geral, os impactos dessa degradação estendem-se para além das áreas de disposição final dos resíduos, afetando toda a população. (GOUVEIA, 2012).

Para a gestão desses resíduos, bem como diretrizes, princípios e responsabilidades, têm-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010, que define resíduo sólidos como:

“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.”

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2016 o Brasil possuiu uma geração anual de RSU de quase 78,3 milhões de toneladas, cerca de 214,520 t/dia como pode ser visto na Figura 1. Já a quantidade de RSU coletada para o mesmo ano foi de 195,452 t/dia (Figura 2), apresentando índices negativos se comparados com a quantidade coletada. Isso mostra que a geração de resíduos sólidos no Brasil é expressiva e ainda se vê necessário a ampliação dos serviços de coleta.

Figura 1 - Geração de RSU no Brasil



Fonte: Abrelpe (2016).

Figura 2 - Coleta de RSU no Brasil



Fonte: Abrelpe (2016).

ABRELPE (2016) relata que a população brasileira apresentou um crescimento de 0,8% entre 2015 e 2016, enquanto a geração per capita de RSU registrou queda de quase 3% no mesmo período. A geração total de resíduos sofreu queda de 2% e chegou a 214.405 t/dia de RSU gerados no país, indicando uma diminuição na produção de resíduos por parte da população. Entretanto, a quantidade de RSU coletados no país apresentou índices negativos condizentes com a queda na geração de RSU, tanto no total quanto no per capita e na comparação com o ano anterior.

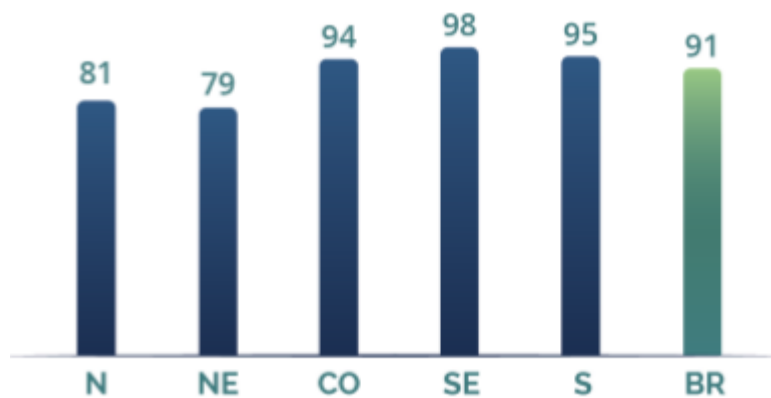
Embora isso tenha ocorrido, a cobertura de coleta nas regiões e no Brasil apresentou ligeiro avanço e a região Sudeste continua respondendo por cerca de 52,7% (Figura 3) do total e apresenta o maior percentual de cobertura dos serviços de coleta do país (Figura 4). (ABRELPE, 2016).

Figura 3 - Participação das regiões do país no total de RSU coletado



Fonte: Abrelpe (2016).

Figura 4 - índice de cobertura da coleta de RSU (%)



Fonte: Abrelpe (2016).

Já em relação à disposição final, ABRELPE (2016) constatou que o país apresentou retrocesso no encaminhamento ambientalmente adequado dos RSU coletados, passando a 58,4% do montante anual disposto em aterros sanitários. As unidades inadequadas como lixões e aterros controlados ainda estão presentes em todas as regiões do país e receberam mais de 81 mil toneladas de resíduos por dia como mostra a Figura 5, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos na saúde.

Figura 5- Disposição final dos RSU coletados no Brasil no ano (T/ano)



Fonte: Abrelpe (2016).

De acordo com Andreoli *et al.* (2012) o planeta é um sistema fechado, ou seja, em que não há troca de matérias com o meio e, portanto, o resíduo é o resultado de um processo de transformação da natureza. Os resíduos sólidos são, na realidade, ou deveriam ser considerados, as matérias-primas para produção de outros artefatos, diminuindo, assim, a exploração massiva de recursos naturais, que são finitos.

Figueira (2016) lista algumas soluções que colaboram para minimizar os impactos negativos associados ao descarte inadequado de resíduos sólidos na natureza: Reuso de materiais, reciclagem de materiais, compostagem, uso de resíduos sólidos para a geração de energia (biogás) e o descarte de materiais preferencialmente em aterros sanitários.

Diversas tecnologias vêm sendo aplicadas para promover o reaproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos e minimizar os riscos ambientais causados pela disposição inadequada, como também para o tratamento dos resíduos gerados. Dentre elas estão os métodos biológicos, em condições aeróbias ou anaeróbias, com vistas à reciclagem com valorização dos resíduos orgânicos através da conversão em compostos orgânicos para fins agrícolas ou pela produção de biogás que é composto de metano, oxigênio e gás carbônico, através da digestão anaeróbia com recuperação energética ou aproveitamento como gás natural (GONÇALVES, 2005).

3.1.1 Classificação dos resíduos sólidos

Com esse quadro de grande geração de resíduos sólidos no país e a atual preocupação com o desenvolvimento sustentável, existe, como mecanismo de gerenciamento de resíduos sólidos, a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 10004-2004. Essa norma classifica os resíduos quanto ao seu risco à saúde humana e ao meio ambiente, envolvendo a identificação do processo que deu origem ao resíduo em questão, suas características e a comparação deste resíduo com listagem de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. (ABNT, 2004).

Na referida norma, os resíduos são classificados em:

- ❖ Resíduos classe I: Perigosos: Nessa classe os resíduos são classificados pela sua inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- ❖ Resíduos classe II: Não Perigosos
 1. Resíduos classe II A: Não Inertes Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes. Os resíduos classe II A não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
 2. Resíduos classe II B: Inertes quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007/2004, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006/2004, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

3.2 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico que converte matéria orgânica em uma mistura de gases de metano, dióxido de carbono, por um complexo comunidade de microrganismos (LIU *et al.*, 2012). Destaca-se ainda que a digestão anaeróbia ocorre, preferencialmente, em ambientes onde o oxigênio, o nitrato e o sulfato não estão disponíveis como aceptores de elétrons, logo inibindo o crescimento de microrganismos aeróbios que se utilizam destes compostos na oxidação da matéria orgânica (CHERNICHARO, 2007).

Segundo Liu *et al.* (2012) esse tipo de digestão tem sido usado no tratamento de muitos tipos de resíduos orgânicos, e devido à variedade de substratos e a utilização como inóculo o lodo de esgoto, este processo tem a vantagem de proporcionar um aumento da produção potencial do biogás, a estabilização orgânica e recuperação de energia.

De acordo com Lin *et al.* (2011) a digestão anaeróbica é a melhor escolha para tratamento desses resíduos orgânicos em consideração de estabilização de resíduos e recuperação de energia. É um processo bioquímico bastante complexo, que consiste em várias vias metabólicas que envolvem a participação de diferentes grupos de bactérias, na qual certas espécies podem desempenhar função específica para cada fase da digestão, apresentando, portanto, necessidades diferentes e condições ambientais ideais (KHALID, 2011).

Nos últimos anos, muitos esforços estão sendo dedicados a melhorar o desempenho de digestores que tratam diferentes tipos de resíduos, principalmente os resíduos sólidos, devido a pesquisas já feitas que obtiveram ótimos resultados. O aspecto econômico desse tipo de digestão é muito importante para a indústria, mas é um ponto não muito relatado nos estudos referentes. (MATA-ALVAREZ, 2000).

Além da produção de biogás para a utilização de seu alto poder energético, os resíduos da biodigestão apresentam alta qualidade para o uso como fertilizante agrícola, pois há o aumento no teor de nitrogênio e demais nutrientes em consequência da perda de carbono para o biogás, o que melhora as condições do material para fins agrícolas e gera uma maior facilidade de imobilização do biofertilizante pelos microrganismos do solo, devido ao material já se encontrar em grau avançado de decomposição, aumentando a sua eficiência e solubilização parcial de alguns nutrientes. (BONTURI; VAN DIJK, 2012).

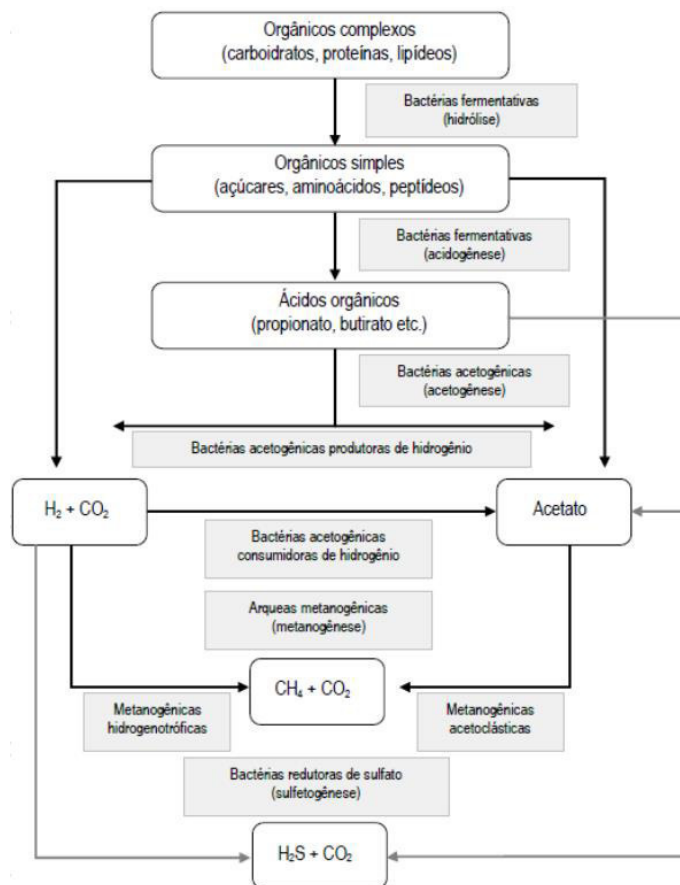
Segundo Reis (2012) alguns dos obstáculos enfrentados no tratamento de resíduos sólidos são: A necessidade vital de controle e acompanhamento do processo, desde a sua partida até a coleta e utilização do gás gerado, e os custos de confecção e instalação do equipamento. Superadas essas dificuldades, o processo de tratamento anaeróbio de resíduos alimentares apresenta possibilidade real de se tornar uma alternativa viável de tratamento para os resíduos sólidos, no âmbito doméstico, visando o aproveitamento energético por meio da produção de metano.

Para Oliveira e Rosa (2003), o Brasil tem condição para abastecer energeticamente 17% do território nacional, a partir da energia dos resíduos sólidos, tal afirmativa corrobora a viabilidade da digestão anaeróbia no tratamento de resíduos sólidos orgânicos.

3.2.1 Processo Microbiológico de Digestão Anaeróbia

As fases e as várias etapas do processo de digestão anaeróbia são mediadas por microrganismos e enzimas sintetizadas pelos mesmos. Como pode ser visto na Figura 6, cada etapa corresponde a uma sequência, que se desenvolve em paralelo ou em série. As reações químicas desenvolvidas no processo podem ser espontâneas a determinadas condições de pH, temperatura e pressão. (SILVA 2009).

Figura 6 - Rotas metabólicas envolvidas na digestão anaeróbia



Fonte: Chernicharo (2007).

Nos processos de tratamentos biológicos a eficiência de transformação de material orgânico está associada à presença de uma equilibrada massa bacteriana, que seja capaz de suportar as variações de cargas orgânicas aplicadas, à presença de materiais com características tóxicas no substrato e às variações das condições ambientais. (LEITE, 2008)

Segundo Chernicharo (2007) o processo de digestão anaeróbia pode ser dividido e 4 etapas denominadas como:

- **HIDRÓLISE** – Primeira fase no processo de degradação anaeróbia, consiste na degradação de materiais particulados complexos (polímeros) em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores), os quais podem atravessar as paredes celulares dos microrganismos fermentativos. Esta conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos é conseguida através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas.
- **ACIDOGÊNESE** – Nesta etapa, os produtos oriundos da fase de hidrólise, são metabolizados no interior das células, através do metabolismo fermentativo. A maioria dos microrganismos acidogênicos fermenta açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, resultantes da hidrólise da matéria orgânica complexa, e produzem diversos compostos mais simples, a exemplo de ácidos orgânicos, álcoois, cetonas, dióxido de carbono e hidrogênio, além de novas células bacterianas. Os microrganismos desta etapa apresentam as mais elevadas taxas de crescimento no consórcio microbiano.
- **ACETOGÊNESE** - As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos orgânicos intermediários gerados na fase acidogênica em um substrato apropriado para os microrganismos metanogênicos. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato. No entanto, a produção de acetato resulta na produção de grandes quantidades de hidrogênio, fazendo com que o ph do meio decresça. As reações acidogênicas só poderão acontecer se as concentrações de acetato e hidrogênio forem mantidas em baixas quantidades.
- **METANOGÊNESE** – etapa final do processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono efetuada pelas arqueas metanogênicas. Em função de sua afinidade por substrato e magnitude de produção de metano, as metanogênicas são divididas em dois grupos principais:
 - ◆ Metanogênicas acetoclásticas: formam metano a partir do ácido acético ou metanol. São os microrganismos predominantes na digestão anaeróbia, responsáveis por cerca de 60 a 70 % de toda a produção de metano.

Pertencem a dois gêneros principais: *Methanosarcina* (formato de cocos) e *Methanosaeta* (formato de filamentos).

- ◆ **Metanogênicas hidrogenotróficas:** praticamente todas as espécies conhecidas de bactérias metanogênicas são capazes de produzir metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Os gêneros mais frequentemente isolados em reatores anaeróbios são: *Methanobacterium*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter*.

Um dos problemas que podem ocorrer durante a digestão anaeróbia é a inibição da atividade dos microrganismos metanogênicos. Ela é consequência da diminuição de atividade ou até mesmo morte de um microrganismo devido à presença de compostos tóxicos no ambiente. O caso mais comum de inibição do processo de digestão anaeróbia é a acumulação de ácidos graxos voláteis e amônia dentro do reator. Outros inibidores menos comuns, como ácido sulfídrico, metais alcalino e alcalino-terrosos e outros metais pesados como, crômio, níquel, zinco e cobre, são apontados na bibliografia como possíveis causadores de instabilidade e falhas de sistemas de tratamento anaeróbio. (GONÇALVES, 2012).

3.3 Parâmetros Fundamentais de Operação

3.3.1 Temperatura

A temperatura é um parâmetro muito importante na digestão anaeróbia já que influencia diretamente a velocidade das reações químicas. A temperatura é um dos fatores ambientais que mais interferem no processo de digestão anaeróbia, pois a atividade biológica é extremamente dependente desse parâmetro, sendo o processo de degradação comprometido, quando as temperaturas são inferiores a aproximadamente 20 °C (CHERNICHARO, 2007).

Segundo Leite (2015) a ocorrência do processo de digestão anaeróbia tem sido observada entre as temperaturas 0 °C e 97 °C, abrangendo três faixas associadas ao crescimento microbiano: a faixa psicrófila compreendida entre 4 °C e aproximadamente 15 °C, a faixa mesófila, entre 20 °C e 40 °C e a faixa termófila situada acima de 45 °C.

Sotti (2014) ressalta que as bactérias possuem diferentes faixas de temperatura ideal para a manutenção do seu metabolismo, sendo assim, faz-se necessário identificar o grupo desejado de bactérias (termofílicas, mesofílicas ou psicofílicas) que se pretende utilizar no biodigestor e regular a temperatura a fim de se manter a faixa ótima para esses microrganismos.

A digestão entre a faixa termofílica tem algumas vantagens, principalmente na fase hidrolítica, quando há resíduos celulósicos na digestão, mas mudanças bruscas de temperatura, quando se operam reatores nesta faixa, causam a destruição das bactérias metanogênicas, por este fato que não se operam grandes digestores nesta faixa de temperatura, porque exigem um bom sistema de controle de temperatura e bom isolamento. (SANTA CATARINA, 2004)

Rodrigues (2005) fala que independentemente da gama escolhida, a manutenção da temperatura é uma condição essencial para a estabilidade do processo de digestão anaeróbia, dado que as bactérias acidogênicas e metanogênicas são altamente sensíveis a variações bruscas de temperatura.

3.3.2 Carga Orgânica

A carga é um termo que indica a quantidade de material novo agregado no processo por unidade de tempo, normalmente chamado carga orgânica ou carga orgânica volumétrica (COV). A fim de ter controle sobre o processo é importante saber o teor de sólidos totais (ST) e de sólidos voláteis (SV) contidos no substrato, com o intuito de fornecer a carga orgânica ideal para o processo de biogás. Onde o valor de sólidos totais é o material que resta quando há a evaporação da água do substrato e o de sólidos voláteis a parte orgânica da matéria seca. (KARLSSON, 2014).

Os resíduos orgânicos, de elevada carga orgânica e mineral, são poluentes para serem lançados em cursos de água, mesmo após tratamento biológico adequado, pois o efluente tratado continua com elevada carga orgânica e nutrientes (N, P e K), sendo impróprios para lançamento em corpos d'água receptores, conforme legislação em vigor. Entretanto o tratamento biológico anaeróbio e aeróbio demonstrou ser plenamente viável em todos os aspectos, transformando esses resíduos em excelente material fertilizante e com boas características para a reciclagem, em sistemas intensivos de produção. (ANGONESE, 2006).

Uma carga orgânica acima da recomendada leva a uma acidificação do ambiente, causada pelo acúmulo de ácidos graxos e/ou geração excessiva de dióxido de carbono, devendo ser reduzida até o ponto em que os ácidos graxos acumulados sejam consumidos num ritmo maior do que são produzidos, retornando o pH para níveis próximos do neutro e retomando a atividade metanogênica. Não costumam haver problemas de acidificação com cargas de até 8,5 kg DQO/m³.dia. REICHERT (2012, *apud* MARCHI, 2013).

Karlsson (2014) também afirma que a carga orgânica deve ser adaptada à microflora de microrganismos que está ativa. O processo geralmente inicia com uma carga relativamente

baixa, a qual aumenta gradualmente conforme há o crescimento do consórcio de microrganismos. Muitas vezes, podem-se levar vários meses até que se consiga obter a carga orgânica desejada, o que pode ser explicado pelo lento crescimento dos microrganismos anaeróbios.

3.3.3 Agitação

A agitação é outro parâmetro muito importante pois aumenta a área de contato entre os microrganismos e o substrato e, conseqüentemente, a produção de biogás. De acordo com Souza, Júnior e Ferreira (2005) o emprego da agitação tem como finalidade manter a temperatura uniforme no substrato e evitar a formação de crostas, podendo ser feita por meio de agitadores mecânicos ou de recirculação do efluente ou do biogás.

Em biodigestores sem agitadores, após um período observa-se a separação do conteúdo e a formação de camadas em virtude da diferença de densidade entre as várias substâncias que compõem o substrato. Por causa da sua densidade mais elevada, a maior parte da massa de bactérias se encontra embaixo, sendo que o substrato em decomposição frequentemente se acumula na camada superior. Em casos como esse, a área de contato entre essas duas camadas está restrita ao ponto em que elas se tocam e a decomposição é muito baixa. Além disso, forma-se um sobrenadante de sólidos flutuantes que dificulta a saída do gás. (FNR, 2010).

Embora agitação seja essencial, não deve ser muito forte porque, muitas vezes, os microrganismos crescem juntos em pequenos agregados, facilitando a sua cooperação estreita e de transferência de hidrogênio (KARLSSON, 2014).

3.3.4 Umidade

A água é um fator imprescindível para o processo de digestão anaeróbia, uma vez que serve como o substrato e fornece os nutrientes necessários aos micro-organismos, além de ser agente condutor de enzimas e de outros metabólitos microbianos importantes no processo de decomposição. (REIS, 2012).

A umidade estimula o crescimento dos microrganismos que compõem o processo de degradação além de facilitar o contato entre microrganismos substrato e nutrientes. (PICANÇO, 2004).

Segundo Fujishima *et al.* (1999, *apud* Mata-Alvarez, 2000) A produção de metano tende a diminuir quando a umidade atinge valores menores que 91%. Reatores alimentados com 80% de umidade apresentam melhor performance do que com porcentagens mais baixas e isso pode estar relacionado a fatores como: transporte de massa, difusão e distribuição dos microrganismos em toda a massa do substrato, levando em consideração, claro, outros parâmetros intervenientes. LOPES (2002)

3.3.5 pH, alcalinidade e ácidos graxos voláteis

De acordo com Reis (2012) cada microrganismo possui uma faixa específica de pH onde o seu crescimento é favorável, havendo um valor considerado ótimo, no qual a taxa de crescimento é máxima. Os microrganismos produtores de metano têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4 embora se possa conseguir estabilidade, na formação de metano, numa faixa mais ampla de pH, entre 6,0 e 8,0. Valores de pH abaixo de 6,0 e acima de 8,0 devem ser evitados, uma vez que estes podem inibir por completo os microrganismos formadores de metano. (CHERNICHARO, 2007).

A alcalinidade é a medida da capacidade de tamponamento ou de neutralização de ácidos em um digestor. Como essa capacidade de tamponamento pode ser gerada por várias substâncias, a alcalinidade total é uma medida não específica frequentemente interpretada como a determinação de carbonato, bicarbonato e hidróxido em um meio (CHYNOWETH, 1987).

A concentração de ácidos graxos voláteis e a alcalinidade de bicarbonatos são referentes a instabilidade do sistema. Uma relação alta entre esses dois parâmetros, nesta ordem, indica que a produção de ácidos graxos voláteis, durante a acidogênese, é excessiva e pode vir a acidificar o meio. Esta acidificação revela uma ineficiência das bactérias em consumir o acetato, o gás carbônico e o hidrogênio produzido, causando um acúmulo dos produtos obtidos nas fases anteriores. (NASCIMENTO, 1996)

Torres Lozada (2005, *apud* Reis, 2012) relata que, quando o sistema acumula grande quantidade de ácidos orgânicos ou em casos eventuais de instabilidade, uma opção para preservar a biomassa mantendo-se o pH próximo à neutralidade é adicionar substâncias alcalinizantes, como o bicarbonato de sódio, visto que o bicarbonato já é um produto final da metanogênese.

3.3.6 Nutrientes

A presença de alguns macroelementos como carbono nitrogênio e fósforo e enxofre e alguns micronutrientes minerais, vitaminas e aminoácidos, são indispensáveis para o processo de produção de metano, sendo assim o conhecimento da composição química e o tipo de biomassa utilizada são importantes. (OLIVEIRA, 2009)

Para os macronutrientes carbono, nitrogênio e fosforo e assumindo-os que estejam numa forma disponível para as bactérias Lettinga *et al.* (1996, *apud* Chernicharo, 2007) são considerados as seguintes relações entre eles para diferentes tipos de biomassa:

- Biomassa com baixo coeficiente de produção celular ($Y \sim 0,05$ gSSV/gDQO).
 $DQO:N:P = 1000:5:1$
 $C:N:P = 330:5:1$
- Biomassa com elevado coeficiente de produção celular ($Y \sim 0,15$ gSSV/gDQO).
 $DQO:N:P = 350:5:1$
 $C:N:P = 130:5:1$

A quantidade requerida de cada nutriente é variável, o que não o torna menos importante. Se o nutriente em questão não atingir esta quantidade requerida, pode limitar o crescimento da massa microbiana. No entanto, se o nutriente exceder esta quantidade, pode assumir características tóxicas e inibir o crescimento da massa microbiana. Assim os valores de interesse da concentração de um determinado nutriente ao crescimento da massa microbiana estão compreendidos numa faixa. (NASCIMENTO, 1996).

Segundo Hartmann e Ahring (2005, *apud* REIS, 2012), a fração orgânica dos resíduos sólidos usualmente contém todos os nutrientes e micronutrientes necessários para que o crescimento dos micro-organismos não seja limitado. Em relação aos macronutrientes carbono e nitrogênio a literatura recomenda as proporções de $C/N = 20 - 30$. Caso essa relação seja elevada as metanogêneses consomem rapidamente o nitrogênio e isso resulta em um baixo rendimento de gás, enquanto que se essa relação for baixa tem se um acúmulo de amoníaco e o pH do meio fica superior 8,5 influenciando negativamente a atividade das arqueas metanogênicas (KOTHARI *et al.*, 2014 *apud* NEVES, 2016)

3.4 Inóculo

A produção de biogás pode variar durante os testes realizados com o mesmo substrato. Essa variação deve-se ao inóculo, em que estão concentrados os microrganismos que realizam a degradação real do substrato, apresentando capacidades distintas para decompor o material. (KARLSSON, 2014).

Os inóculos geralmente utilizados são lodos de esgoto sanitário e alguns materiais de origem animal, como esterco bovino, suíno e de frango, ricos em microrganismos anaeróbios capazes de acelerar o tempo de bioestabilização. (BARCELOS, 2009).

Neste sentido, a adição de inóculos tem mostrado resultados satisfatórios, já que propicia o equilíbrio da relação Carbono/Nitrogênio, melhora a estrutura física do substrato, a densidade microbiana, o percentual de umidade, além de incorporar diversos outros tipos de agentes tamponantes, proporcionando redução significativa do tempo de retenção de sólidos. Além disso, a digestão com inóculo melhora substancialmente a rentabilidade de produção de biogás. (BARCELOS, 2009).

Em algumas literaturas, os resultados do monitoramento dos reatores estáticos de bancada, por um período superior a um ano, indicam que uma fase de inoculação, aclimação e bioestimulação podem resultar em um lodo melhor adaptado ao substrato, assim como uma partida mais rápida para o reator. (MORAIS, 2016).

Vários autores mostram diversos estudos utilizando a digestão anaeróbia com diferentes inóculos, resultado de seu potencial uso como alternativa tecnológica para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos. Verifica-se que, na maior parte das pesquisas apresentadas, são demonstrados resultados positivos com relação ao uso de inóculos. (REIS, 2012).

3.5 Biogás

O biogás é uma mistura gasosa originada por processo biológico pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica. É um processo comum na natureza e pode ocorrer, por exemplo, em pântanos, fundos de lagos e no rúmen de animais ruminantes. Sua composição é principalmente de metano (50% - 75% em volume), dióxido de carbono (25% - 50% em volume) e pequenas quantidades de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e outros gases traço. (FNR, 2010).

Chernicharo (2007) ressalta que a composição global do biogás produzido durante a digestão anaeróbia varia de acordo com as condições ambientais presentes em um reator. Esta composição muda rapidamente durante o período inicial de partida do sistema e também quando o processo de digestão é inibido.

Segundo Rocha (2016), o biogás pode ser utilizado em fogões, motores, lâmpadas, e geladeiras a gás, podendo ser considerado uma das fontes energéticas mais econômicas e de fácil aquisição em pequenas propriedades rurais e até mesmo em residências. Apresenta grande vantagem diante de outros combustíveis, pois é produzido pela degradação de resíduos orgânicos, sendo uma fonte de energia renovável.

Adicionalmente, o biogás produzido a partir de gás de aterros pode diversificar parcialmente a matriz energética brasileira, já que, apresenta potencial interessante de substituição do gás natural em alguns setores de consumo. Independentemente das características de produção e consumo a serem adotadas, é importante evitar a mera transposição de modelos e políticas internacionais, e, sobretudo, construir políticas e regulações compatíveis entre os setores de saneamento e energia do país (VEIGA, 2015).

Portanto, é necessário manter o equilíbrio entre as suas fontes de energia renováveis e tradicionais, e o progresso de geração de energia a partir do biogás, que tem papel importante no equilíbrio entre as fontes de energia disponíveis no país, à medida que aumenta o consumo de eletricidade. Porém, as iniciativas para geração de biogás no Brasil ainda andam a passos lentos em comparação ao panorama internacional. Contudo, sabe-se que o investimento nessa área pode resultar em reflexos significativos na matriz energética do país. O Brasil, mesmo sendo um dos líderes em produção de energias a partir de biomassa, enfrenta problemas para inserir o biogás como fonte renovável de energia no quadro nacional, pois os subsídios por parte do governo e o investimento das políticas públicas são pouco estimulados. (KARLSSON, 2014)

3.6 Biodigestores

Um biodigestor compõe-se, basicamente, de uma câmara fechada na qual uma biomassa (em geral detritos de animais) é fermentada anaerobicamente, isto é, sem a presença de ar. Como resultado desta fermentação ocorrem a liberação de biogás e a produção de biofertilizante. É possível, portanto, definir biodigestor como um aparelho destinado a conter a biomassa e seu produto: o biogás. (GASPAR, 2003)

Um biodigestor trabalha com qualquer tipo de material que se decompõe biologicamente sob ação das bactérias anaeróbias. Praticamente todo resto de animal ou vegetal

é biomassa capaz de fornecer biogás através do biodigestor. Os resíduos animais são o melhor alimento para os biodigestores, pelo fato de já saírem dos seus intestinos carregados de bactérias anaeróbicas. (BONTURI; VAN DIJK, 2012).

Os primeiros países a utilizarem o processo de biodigestão, de forma mais intensa e com finalidade energética foram a Índia e a China, nas décadas de 50 e 60, sendo que esses países e outros, geralmente do terceiro mundo, desenvolveram seus próprios modelos de biodigestores NOGUEIRA (1986, *apud* PRATI, 2004).

Encontram-se aí dois extremos da utilização de biodigestores. Chineses buscam, nessa tecnologia, o biofertilizante necessário para produção dos alimentos necessários ao seu excedente de população. Já os Indianos precisam dos biodigestores para cobrir o imenso déficit de energia. Com isso, foram desenvolvidos dois modelos diferentes de biodigestor: o modelo chinês, mais simples e econômico e o modelo indiano, mais sofisticado e técnico, para aproveitar melhor a produção de biogás. (GASPAR, 2003)

Durante a década de 70, devido à crise do petróleo e a elevação do seu preço, o Brasil mostrava-se extremamente dependente, pois 80% do óleo bruto então consumido no país eram de fonte externa. Por isso, foi necessário estabelecer estratégias para contornar a crise. Logo iniciou-se a busca por outras fontes de energia, em substituição ao petróleo externo. Dentre essas fontes, o biogás foi uma delas, por meio da construção de biodigestores. (KARLSSON, 2014)

No entanto, O Brasil enfrentou uma série de problemas que foram responsáveis pelo fracasso dessas pesquisas: falta de treinamento dos proprietários dos biodigestores sobre seu sistema de funcionamento; conhecimentos técnicos falhos a respeito da construção dos biodigestores; baixa qualidade dos materiais utilizados para o uso do biogás, por ter em sua composição gases corrosivos e baixa durabilidade dos equipamentos adaptados para converter o biogás em energia elétrica. (BONFANTE, 2003 *apud* BONFANTE, 2010)

Apesar das dificuldades da época, o interesse pelo biogás voltou a ganhar força nos anos 90. Dessa vez, o que motivava a implantação dos biodigestores não era apenas a conversão da biomassa em biogás, mas sim a geração de uma energia que pudesse dar suporte à matriz energética, caso houvesse novos aumentos no preço do petróleo. A preocupação agora era também voltada à questão ambiental, pois começava-se a falar em gases do efeito estufa e em aquecimento global. (KARLSSON, 2014).

São Paulo foi a primeira cidade do Brasil a aproveitar o biogás como fonte de energia. Vinte e quatro geradores de alta potência queimam todo o gás do lixo. As máquinas transformam o biogás do aterro em energia elétrica suficiente para abastecer 35 mil domicílios

da cidade de São Paulo. Do aterro, o biogás é levado até uma estação de tratamento para a retirada de impurezas. Dali, segue por um gasoduto de seis quilômetros de extensão até a refinaria Duque de Caxias. O volume de biogás bombeado a cada dia para a Reduc vai equivale a 10% de todo o consumo da refinaria. (JORNAL DA GLOBO, 2013).

Uma das mais recentes usinas de biogás instaladas no Brasil, ocorreu setembro desse ano pela empresa italiana Asja no aterro sanitário de Sabará, em Minas Gerais, em uma planta com potência instalada de 5,7MW. Segundo a empresa, a usina terá a capacidade de produzir 46 mil MWh por ano de energia elétrica, capaz de atender 25 mil famílias por ano. Além disso, o projeto evitará a dispersão de cheiros desagradáveis e agentes poluentes na natureza. Estima-se, conforme a Asja, que a usina seja capaz de evitar o envio de 380 mil toneladas por ano de CO₂, "equivalente à quantidade emitida por 180 mil automóveis em um ano". (JORNAL DO BRASIL, 2017)

Segundo Ribeiro (2013), atualmente algumas das motivações para o uso de biodigestores no Brasil são: créditos de carbono (flaring, geração de energia elétrica), redução da poluição local, iniciativas individuais com produção de biogás para usos térmicos em processos internos e geração de energia elétrica, produção de biofertilizantes para agricultura orgânica, pioneirismo, entre outros. A utilização de biodigestores, além de trazer benefícios energéticos, mitigam as emissões de carbono equivalente para a atmosfera e promovem o saneamento. (VELOSO, 2014).

3.6.1 Tipos de Biodigestores

A literatura classifica os biodigestores sobre diversos aspectos. Como por exemplo, quanto ao teor de sólidos, forma de alimentação e número de estágios e, também, pela quantidade de resíduo orgânico tratado. FILHO (2014, *apud* FRIGO, 2015).

Segundo Reis (2012) os biodigestores podem ser classificados da seguinte forma:

- Classificação pelo número de estágios

Os reatores anaeróbios também podem ser classificados em reatores de um estágio ou multiestágios (normalmente dois estágios). Em reatores de um estágio, todas as etapas do processo de degradação anaeróbia ocorrem simultaneamente em um único reator, enquanto em reatores de dois ou mais estágios, as etapas ocorrem sequencialmente.

A maioria dos biodigestores em escala real são sistemas de um único estágio, porque, embora sejam menos eficientes, têm projeto mais simples, são mais fáceis de operar e são mais robustos (EMBRAPA, 2011).

Nos biodigestores de dois estágios os vários processos bioquímicos tais como a hidrólise, a acidificação acetogênica e metanogênica ocorrem em lugares separados, permitindo a seleção e o enriquecimento de diferentes bactérias em cada fase. Um sistema de multiestágios pode melhorar a estabilidade do processo em comparação ao sistema de fase única. (REMPEL, 2014).

- Quanto à forma de alimentação

Eles podem ser categorizados como contínuo, onde os biodigestores, se operados corretamente podem fornecer gás permanentemente. E descontínuo ou batelada, isto é, fornece gás durante certo período, sendo interrompido para a descarga do material fermentado e nova carga de material orgânico a ser digerido. A matéria orgânica a ser digerida é colocada em uma câmara selada hermeticamente. (OLIVEIRA, 2009).

- Quanto ao teor de sólidos

Teor de água: o teor de água dentro do biodigestor deve variar de 60% a 90% do peso do conteúdo total, sendo os biodigestores que operam com o teor de água próximo a 90% classificados como biodigestores com baixo teor de sólidos totais e aqueles com teor de água próximo a 60%, classificados como biodigestores com alto teor de sólidos totais; (ROCHA, 2016).

4 METODOLOGIA

4.1 Local da pesquisa

A pesquisa e análise laboratorial foi desenvolvida no LABOSAN (Laboratório de Saneamento) do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Os biodigestores utilizados na pesquisa se localizaram na Estação de Tratamento de Água e Esgoto (Figura 7), pertencente à UFC - Campus do Pici localizado na cidade de Fortaleza, no Estado do Ceará na qual teve duração de 100 dias.

Figura 13 - Local onde os biodigestores foram montados.



Fonte: O Autor (2017).

4.2 Substrato e Inóculo

O substrato orgânico utilizado (Figura 8) era proveniente dos resíduos orgânicos do restaurante universitário da UFC do campus do Pici, e dentre os resíduos estavam restos de arroz, macarrão, carne, frango, frutas, feijão, farofa, tendo um substrato bastante diversificado como mostra a Figura 8. Os resíduos foram coletados por volta das 14:15h, horário que o restaurante encerrava o expediente do almoço.

Figura 14 - Resíduo alimentar coletado do RU



Fonte: O Autor (2017).

Após a coleta, foi feita uma triagem dos resíduos, retirando materiais de difícil degradação como ossos, e outros tipos de materiais que porventura vinham junto com os

resíduos coletados que são inviáveis à pesquisa, como copos e pedaços de pano. Após isso, os resíduos foram triturados em um liquidificador industrial (Figura 9) até se obter uma massa homogênea para facilitar o processo de digestão e posteriormente diluídos, para em seguida, abastecer os biodigestores.

Também foram feitas coletas posteriores para a alimentação dos reatores. O resíduo alimentar apresentava as mesmas características do que foi utilizado na partida dos reatores, utilizando-se 1 kg de resíduo para a alimentação em cada um dos reatores. Essas alimentações foram realizadas por volta dos dias 50 e 70 da referente pesquisa.

Figura 23 - Resíduo alimentar triturado



Fonte: O Autor (2017).

O inóculo utilizado foi oriundo de fossa séptica com características bastante propícias para a digestão anaeróbia. Foram coletados 10 litros de lodo de fossa (Figura 10), da empresa Desentupidora e Limpa Fossa Estrela do Sol. O inóculo foi armazenado em bombonas para aclimação antes da digestão.

Figura 32 - Lodo de fossa séptica coletado



Fonte: O Autor (2017).

4.3 Biodigestores

O experimento foi constituído na utilização de dois biodigestores em modo e agitação semi-contínuo de modelo vertical, de fluxo contínuo, fabricado em bombonas de polietileno com uma saída para coleta de amostra, um extravasor e uma saída para a coleta de biogás produzido. Na Figura 11 pode ser visto os biodigestores R1 e R2, onde sua capacidade total é de 60L sendo 30% destinado ao *headspace*. A capacidade útil do biodigestor foi de 42L, sendo que 80% foram destinados para o substrato e 20% para o inóculo.

Figura 41 - Biodigestores utilizados na pesquisa



Fonte: O Autor (2017).

No estudo foram utilizados dois biodigestores com diferentes concentrações de sólidos totais. O biodigestor chamado de R1 foi introduzido inicialmente com 2kg de resíduo alimentar e o R2 com 5kg de resíduo alimentar.

4.4 Monitoramento das análises

Após finalizar a montagem dos reatores, amostras foram coletadas semanalmente para a análise dos parâmetros em laboratório. A Tabela 1 mostra os parâmetros utilizados para a caracterização físico química dos resíduos.

Tabela 1 – Metodologia adotada para caracterização de resíduos

Parâmetro	Método	Referência
pH	Potenciométrico – 9045D	EPA (2004)
Sólidos totais - ST (g/L)	Gravimétrico: evaporação e Secagem a 103 – 105°C.	APHA <i>et al.</i> (2005)
Sólidos totais voláteis – STV (g/L)	Gravimétrico: ignição a 500 – 550°C	APHA <i>et al.</i> (2005)
Alcalinidade Total (g CaCO ₃ /L)	Titulação Potenciométrico: titulação de neutralização com H ₂ SO ₄	APHA <i>et al.</i> (2005)
Ácido Graxos Voláteis (g Hác/L)	KAPP	KAPP (1984) <i>apud</i> Ribas, Moraes e Foresti (2007)
DQO (g O ₂ /L)	Espectrofotométrico: digestão por refluxação fechada. Oxidação da matéria orgânica com K ₂ Cr ₂ O ₇ em meio ácido.	APHA <i>et al.</i> (2005)
Carbono Orgânico Total (%)	Estimativa = 1,8 x % STV	KIEHL (1998)
NTK mg/L	Método Kjeldahl	APHA <i>et al.</i> (2005)

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

A coleta do biogás gerado, também semanalmente, foi feita em bags com válvula de coleta para gás. O biogás foi caracterizado e quantificado por análise de cromatografia gasosa, utilizando um cromatógrafo GC-17A, marca Shimadzu (Figura 12) acoplado a um detector de condutividade térmica (TCD).

Figura 50- Cromatógrafo GC-17A



Fonte: O Autor (2017).

Na Tabela 2 é especificado as condições da técnica de cromatografia gasosa aplicada na análise do biogás conforme metodologia desenvolvida e validada por Carneiro (2012). Com os dados de área fornecidos pelo cromatógrafo após a leitura, calculou-se as concentrações de cada composto presente no biogás utilizando constantes cedidas pelo laboratório, estas retiradas do processo de calibração do aparelho. A partir dessas concentrações, obteve-se os percentuais dos compostos.

Tabela 2 - Condições de análise do biogás no GC-TCD.

Parâmetros GC-TCD	
Modo de injeção	<i>Splitless</i>
Volume de injeção (mL)	1
Temperatura do injetor (°C)	40
Gás de arraste	He
Fluxo na coluna (mL/min)	0,7
Temperatura do forno (°C)^a	50
Temperatura do detector (°C)	200

Fonte: Carneiro (2012).

4.5 Estimativa da produção de biogás

A quantificação do biogás gerado no interior dos biodigestores foi mensurada por método manométrico, com a utilização de um indicador universal microprocessador acoplado a um transmissor de pressão de um medidor universal da marca WARME que pode ser observado na Figura 13. Foram mantidos constantes a temperatura num valor de 35° C e o volume de *Headspace*, contudo o acréscimo de pressão medido no interior do recipiente correspondia ao volume de biogás produzido.

Figura 59- Medidor de Pressão



Fonte: O Autor (2017).

Os resultados de volume de biogás gerado nos biodigestores foram calculados através das leituras das pressões e temperaturas de cada reator, bem como das pressões e temperaturas atmosféricas. Os cálculos realizados estão expostos abaixo, expressando o volume em litro normal de biogás pelas Condições Normais de Temperatura e Pressão – CNTP. As Equações 1, 2, 3 mostram as fórmulas utilizadas para os cálculos do potencial de geração de biogás (ALVES, 2008).

- ✓ Volume de biogás acumulado em T2: (Equação 1)

$$Volume = \frac{PF \times VUF \times 22,41 \times 1000}{83,14 \times TF}$$

Onde:

- T: Tempo [dias];
- PF: Pressão do frasco no momento T+1 [mbar];
- VUF: Volume útil do frasco [l];
- TF: Temperatura do frasco [K].
- VA: Volume Acumulado entre T1 e T2;

- ✓ Volume Acumulado (mL): [Volume Gerado entre T e (T+1)] + VGA (mL) (Equação 2)
- ✓ Volume de biogás acumulado CNTP (NmL): (Equação 3)

$$Volume\ acumulado\ normal = VA \times \frac{273}{TF} \times \frac{(Patm - 42)}{760}$$

Onde:

- Patm: Pressão atmosférica [mbar];
- VA: Volume acumulado entre T1 e T2
- VA_n: Volume acumulado CNTP entre T1 e T2 [NmL]

Portanto observa-se que o volume de biogás acumulado (mL) foi então calculado e corrigido para a CNTP, sendo então obtido o volume de biogás em NmL.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de remoção usados na discussão dos resultados foram os máximos, escolhidos entre a partida, a primeira alimentação e a segunda alimentação, para as análises físico-químicas realizadas.

5.1 Análises físico-químicas do substrato e inóculo

A tabela 3 mostra o resultado dos parâmetros analisados para o substrato e inóculo utilizados na pesquisa:

Tabela 3 - Resultados dos parâmetros físico químicos analisados para substrato e inóculo

Parâmetro	Substrato	Inóculo
pH	4,58	8,77
Alcalinidade (g/L)	0,143	3,2839
AGV (g/L)	0,1385	0,49
DQO (g/L)	196,5	11,8
COT (%)	60,5	48,1
ST (g/L)	319	2,260
STV (g/L)	291	1,080
ST (%)	31,9	0,2
STV (%)	91,22	47,8
NTK (g/L)	1,283	0,3453

Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Analisando o substrato, percebe-se uma acidez em relação a esse material, com pH da ordem de 4,58. Lima (2015), afirma que a matéria orgânica no geral possui alto teor de alcalinidade, nutrientes e carga orgânica, embora o valor de alcalinidade do substrato não tenha sido tão elevado.

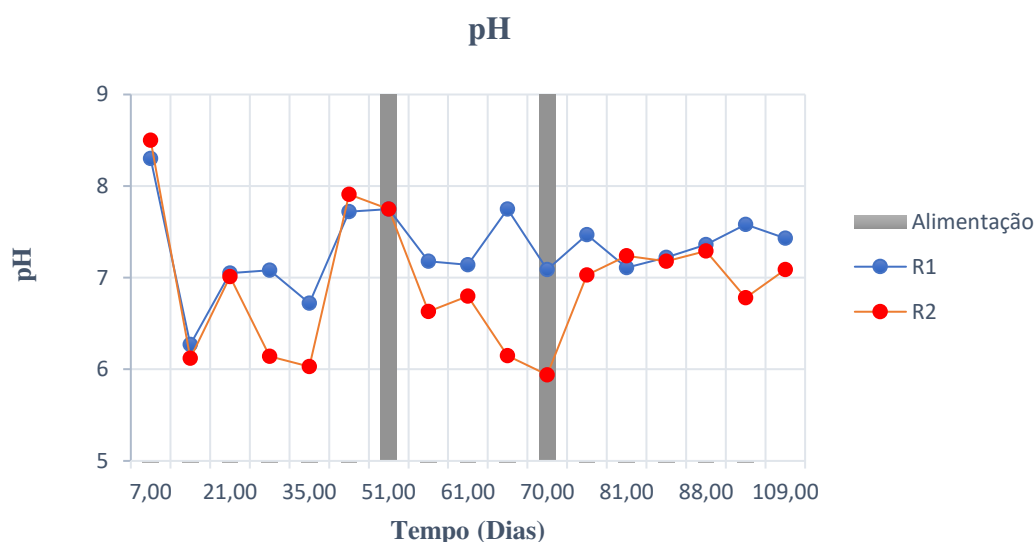
Já o lodo de fossa séptica utilizado como inóculo apresentou pH de 8,77, com valores de sólidos muito próximos ao utilizado por Neves (2016). Entretanto foi verificado alto teor de alcalinidade e nitrogênio total, podendo prejudicar o sistema caso a microbiota não esteja estabilizada.

5.2 Análise físico-química dos reatores

5.2.1 pH, alcalinidade e AGV

Durante os primeiros dias, o controle do pH foi necessário em ambos os reatores devido a diminuição do valor de pH, como pode ser visto na Figura 14. Essa diminuição provavelmente ocorreu devido ao teor ácido dos resíduos orgânicos e a produção de ácidos graxos voláteis nas etapas iniciais de hidrólise e acidogênese pelos microrganismos envolvidos no processo de digestão.

Figura 68- Valores de pH dos Reatores R1 e R2 ao longo do período experimental



Fonte: O Autor (2017).

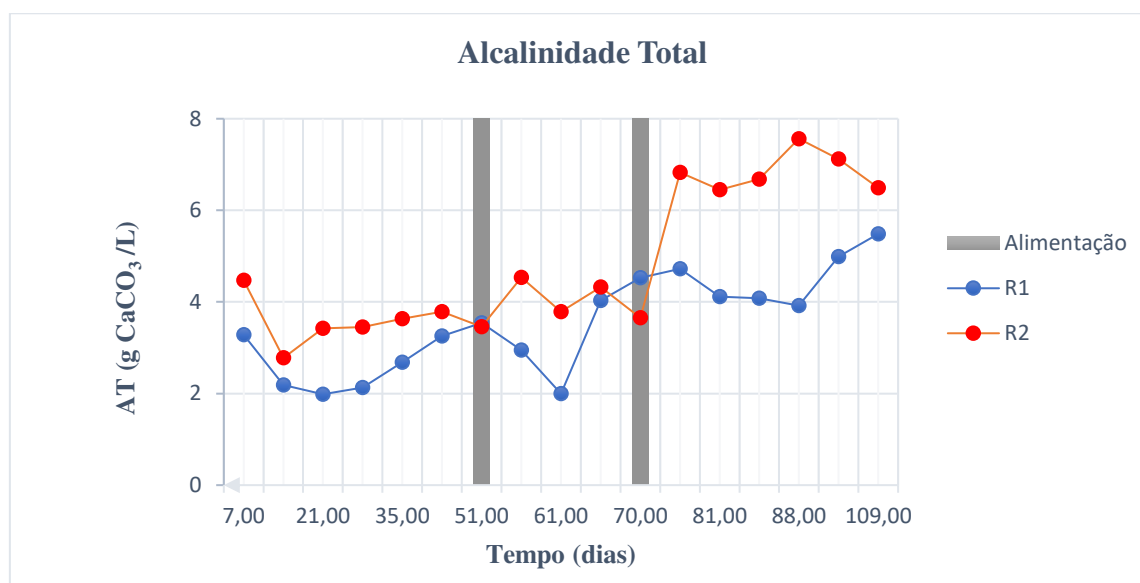
Segundo Pereira (2009) quando o pH diminui, os ácidos graxos voláteis estão menos desassociados (tóxicos). A um pH em torno de 5, os ácidos graxos voláteis estarão desassociados em 50% aproximadamente. A presença de ácidos graxos voláteis em sua forma não ionizada em um pH inferior a 6, pode causar uma severa inibição das bactérias metanogênicas, já que essas bactérias são muito mais sensíveis a mudanças de pH do que as bactérias acidogênicas.

No início da biodigestão, até a completa estabilização dos reatores, para a manutenção do pH na faixa ideal de produção de biogás, foi adicionado bicarbonato de sódio (NaHCO_2). Além disso, segundo Chernicharo (2007) o bicarbonato é bastante solúvel, e não eleva o pH substancialmente, mesmo quando dosado em excesso. Quando o bicarbonato de sódio é adicionado ao reator, e entra em contato com o meio de ração, libera íons carbonato e

bicarbonato, que ao reagirem com prótons produzem ácido carbônico, o qual devido a sua instabilidade dissocia-se liberando CO_2 e água, reduzindo as condições de acidez no reator. (SILVA, 2009).

Os valores de pH variaram entre 5,5 – 8,5, estabilizando em torno de 7 em ambos os reatores por volta do dia 80, quando o sistema de biodigestão adquiriu capacidade tamponante, ou seja, estabilizou evitando mudanças drásticas no pH.

Figura 75- Alcalinidade total para os reatores R1 e R2 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

Na Figura 15 é mostrado os valores de alcalinidade total referente à ambos os reatores. A interação da alcalinidade com os ácidos voláteis, durante a digestão anaeróbia fundamenta-se na capacidade da alcalinidade do sistema em neutralizar os ácidos formados no processo e também em tamponar o pH, na eventualidade de acumulação de ácidos voláteis. Tanto a alcalinidade como os ácidos voláteis derivam primariamente da decomposição dos compostos orgânicos durante a digestão. (CHERNICHARO, 2007).

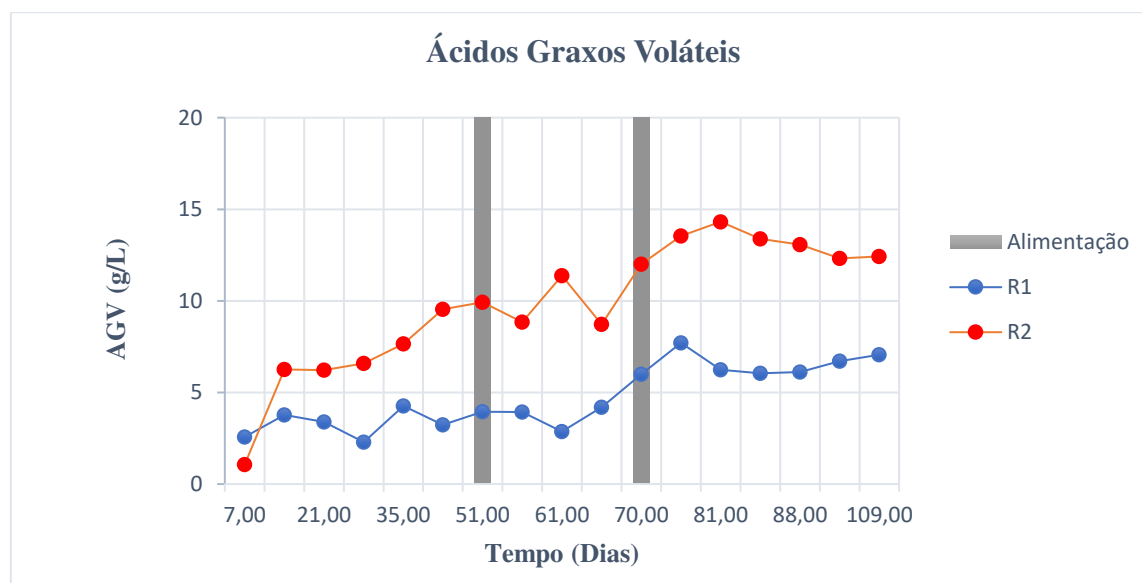
Os reatores, de modo geral, apresentaram aumento nos valores de alcalinidade com o passar do tempo, apresentando o R1 ao valor máximo de 7,56 g CaCO_3/L e mínimo de 1,99 g CaCO_3/L ; e o R2 valor máximo de 7,56 g CaCO_3/L e valor mínimo de 2,78 g CaCO_3/L . Isso provavelmente ocorreu devido à adição de bicarbonato, já que valores de pH maiores que 5 são referentes à parcela de alcalinidade bicarbonato, e menores que 5, equivalentes à alcalinidade de ácidos graxos voláteis.

De acordo com Mata-Alvarez, Macé e Llabrés (2000, *apud* Ingrid, 2016), para assegurar condições estáveis, o digestor deveria ter alcalinidade total acima de 1,5 CaCO_3/L . Já

de acordo com Metcalf & Eddy (1991, *apud* Pereira-Ramirez, 2004), para o processo de digestão anaeróbia ocorrer de forma satisfatória, a alcalinidade deve ter valores entre 1 e 5 g/L e a concentração dos AGV se manter menor que 0,25 g/L. Mesmo os valores de alcalinidade de ambos os reatores ultrapassando esse limite máximo, não houve problemas no processo de digestão. Na pesquisa feita por Pereira (2009) a mesma alteração aconteceu, mas também não apresentou um problema significativo para a geração de biogás.

Já em relação aos ácidos graxos voláteis, como pode ser visto na Figura 16, os biodigestores R1 e R2, apresentaram um aumento em relação a sua produção, com valores bastante elevados. A concentração destes ácidos voláteis no biodigestor é determinada pela sua taxa de produção e a sua taxa de remoção, com uma alta geração de ácido graxo. Para o R2, que foi alimentado com maior quantidade de resíduo orgânico, o máximo valor de AGV chegou próximo dos 15 g CaCO₃/L. Após o dia 80, os valores de AGV tenderam a se estabilizar.

Figura 76- Valores de ácidos graxos voláteis para R1 e R2 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

Reis (2012) afirma que no processo de bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, quando acontece redução da concentração dos ácidos graxos voláteis geralmente se observa acréscimo proporcional do percentual de gás metano no biogás. Em seu estudo após 60 dias de operação, houve um decréscimo abrupto do pH, chegando a valores compreendidos entre 4,2 e 5,0, indicando ter havido processo de acidificação no reator, mas após a suplementação do sistema com bicarbonato de sódio, houve um acréscimo nas concentrações de alcalinidade e conseqüentemente um decréscimo no teor de AGV, com

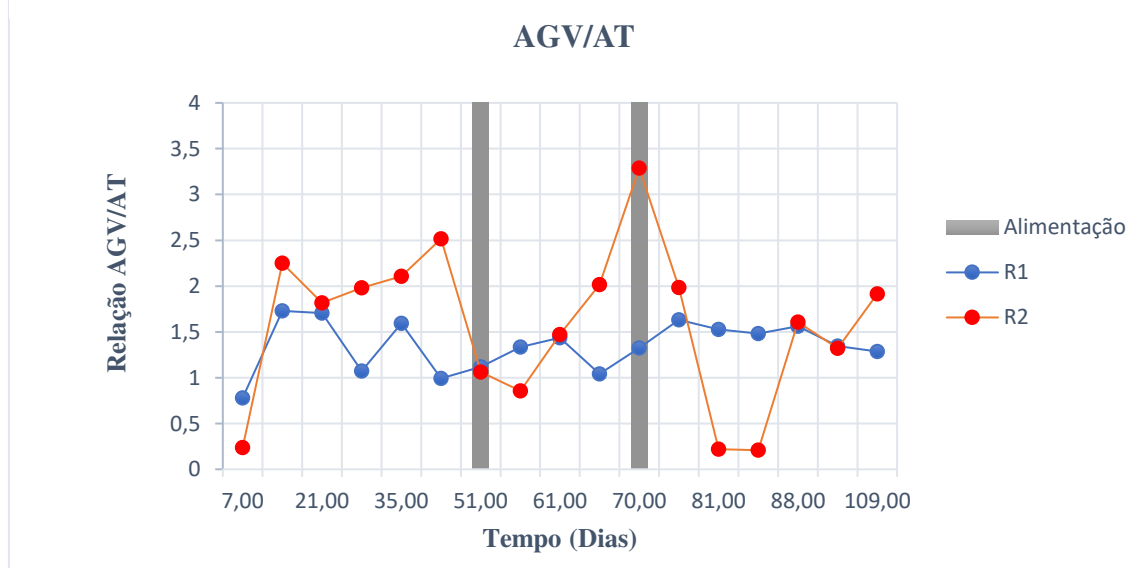
estabelecimento do equilíbrio entre produção e consumo de ácidos e manutenção do pH na faixa ideal.

Já os reatores monitorados por Braúna (2012) apresentaram valores de pH constantes durante todo o monitoramento (entre 7,02 e 8,41), elevando-se apenas no final da pesquisa, e altas taxas de alcalinidade produzidas, provavelmente pela elevação da concentração de amônia.

Luna (2008) utilizando resíduos sólidos vegetais inoculados com lodo de esgoto sanitário em seu reator, verificou variações de pH até o 133º dia. Após esse período, o pH do material efluente adquiriu características neutras com valores de pH superiores a 7,0 até o final do tempo de monitoração. Mesmo após as mudanças de cargas orgânicas aplicadas em seu reator, não foram verificadas reduções significativas nos valores de pH, indicando a presença de mecanismos de tamponação.

Para processos de tratamento anaeróbio, a relação entre ácidos graxos voláteis e alcalinidade total em torno de 0,5 favorece o estado de equilíbrio dinâmico no reator e o biogás produzido passa a conter em média 60% (percentagem em volume) de gás metano (CHERNICHARO, 2007). Analisando os valores experimentais das relações AGV/AT (Figura 17) verifica-se que estes valores se mantiveram superiores aos ideais para o processo de tratamento anaeróbio, estes fatos estão atribuídos as elevadas concentrações de ácidos graxos voláteis presentes no conteúdo do reator. No entanto não foram evidenciados sérios problemas de instabilidade no decorrer do sistema e produção de metano.

Figura 77- Perfis referente à relação AGV/AT para os reatores R1 e R2



Fonte: O Autor (2017).

Os valores de AGV/AT conseguidos por Silva (2009) também ficaram fora dessa faixa ideal, atingindo valores de 4,5 e 4,3 unidades, apresentando redução apenas a partir do 174º dia de operação, mas mesmo assim, não atingindo o valor recomendado pela literatura.

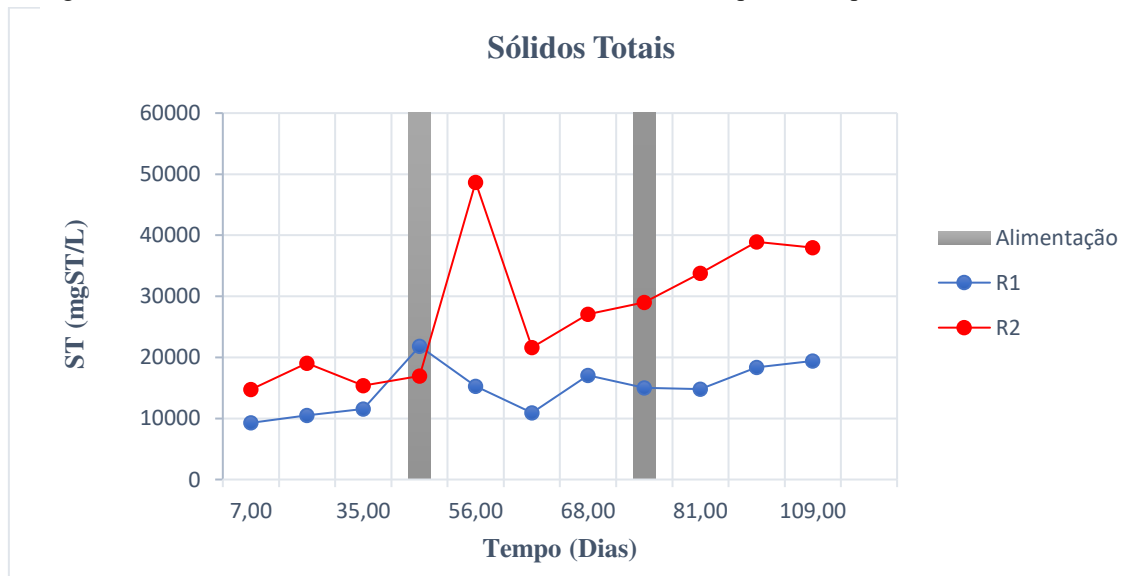
5.2.2 Série de sólidos

De acordo com acordo com Gao *et al.* (2016) a desintegração de partículas grandes não é o passo limitante da velocidade, em comparação aos compostos orgânicos acumulados digeridos. Isto implica que a hidrólise enzimática de compostos orgânicos solúveis é o passo limitante da velocidade no processo de hidrólise.

Como pode ser visto na Figura 18, o R2 apresentou um máximo de teor de sólidos totais de 48680 mgST/L. Um valor bastante elevado, provavelmente por causa da alimentação com uma nova carga de sólidos. Mesmo com essa sobrecarga, o reator conseguiu se recuperar posteriormente. Já o R1 não apresentou variações significativas no teor de sólidos totais, com máximo de 21820 mgST/L, indicando que a microbiota dos reatores estava estável e conseguia degradar bem a matéria orgânica. Os valores de remoção de sólidos totais alcançados pelos biodigestores foram 55,58% para o R2 e 49,86% para o R1, logo após a primeira alimentação.

Reis (2012) encontrou valores de remoção de sólidos totais de 30% em sua primeira etapa de experimento sem suplementação de alcalinidade, e 80% nas etapas posteriores com suplementação. Já Angonese (2005) utilizando dejetos suínos em seu biodigestor alcançou remoções de sólidos totais de 45%.

Figura 84- Teor de Sólidos Totais nos reatores R1 e R2 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

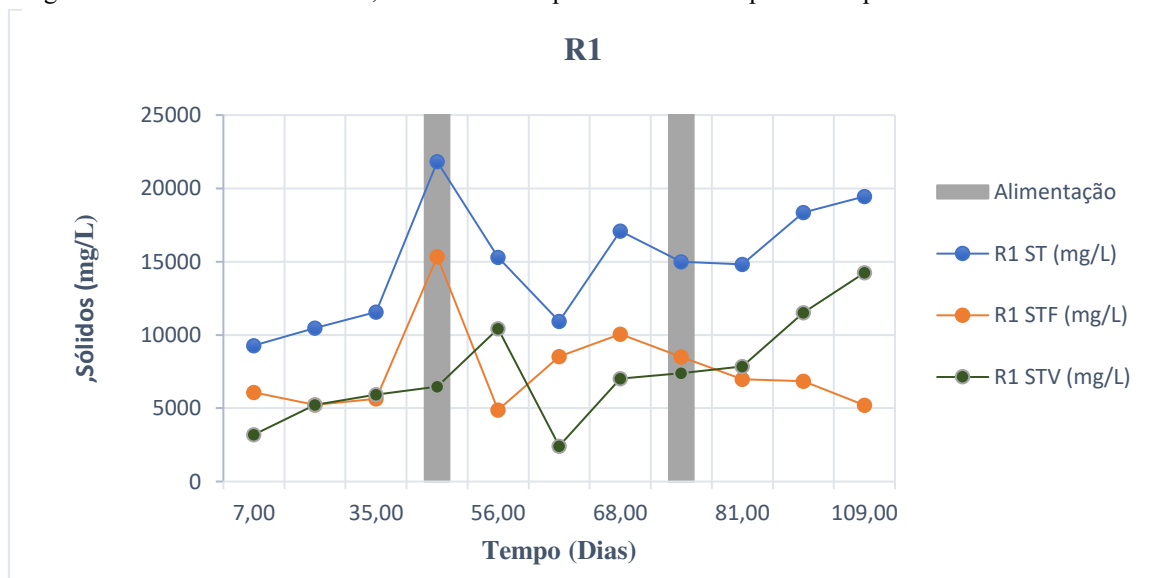
O reator de Neves (2016) também apresentou um máximo conteúdo de ST (15,27 g/kg). A autora justifica esse aumento devido à sobrecarga de alimentação do reator com vinhaça. Entretanto, após o quadragésimo quinto dia de experimento, foi possível observar que os ST reduziram quase pela metade, atingindo o mínimo valor de 4,63 g/kg no 50º dia. Neves (2016) também ressalta que essa redução indica elevada eficiência da comunidade microbiana na redução da matéria orgânica.

Leite e Povinelli (1999, *apud* Silva, 2009) relata que o comportamento dos sólidos totais não expressa de maneira satisfatória os mecanismos envolvidos na digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, devido à presença em sua composição de materiais de natureza extremamente complexa.

As Figuras 19 e 20 mostram a variação de sólidos voláteis (STV%) ao longo da pesquisa, onde até o dia 40 manteve-se uma certa estabilidade nos dois biodigestores. Após a alimentação entre os dias 15-45 e depois entre 35-80, mais uma vez os melhores valores de remoção de STV% foram para R1 com 56,8% de eficiência de remoção contra a 53,38% para o R2, também logo após a primeira alimentação.

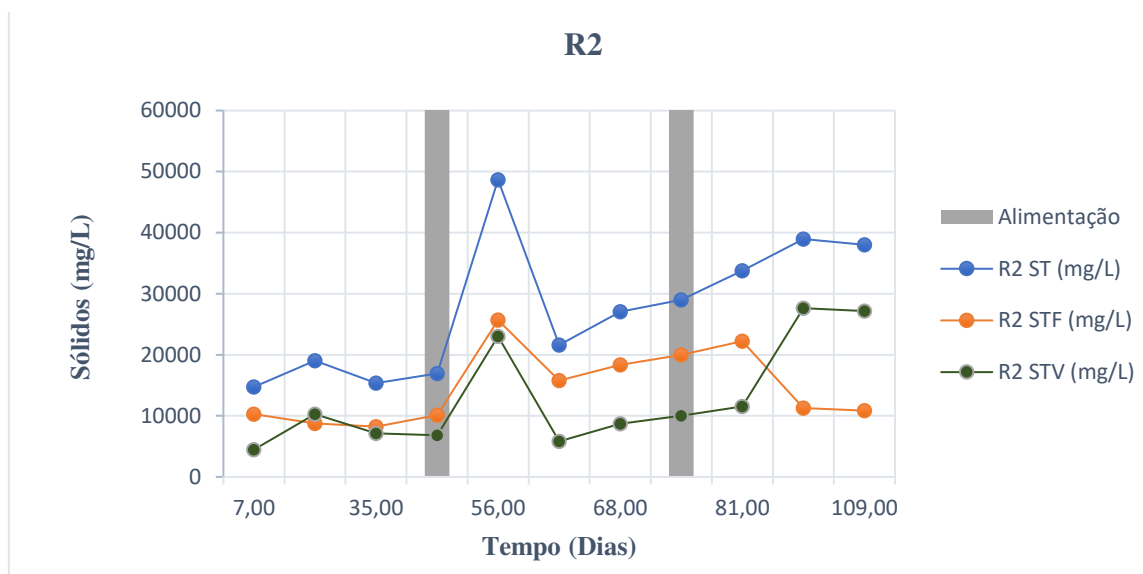
Segundo Neves (2016), a remoção de matéria orgânica na forma de sólidos voláteis, presentes em biodigestores anaeróbios, é um importante parâmetro para avaliar a eficiência da atividade microbiana na degradação da matéria orgânica, já que representa a parte orgânica que será utilizada pelos microrganismos. Com uma boa digestão anaeróbia é possível observar significativa redução no conteúdo de sólidos voláteis ao longo dos dias de investigação.

Figura 85- Teor de Sólidos totais, fixos e voláteis para R1 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

Figura 94- Teor de Sólidos totais, fixos e voláteis para R2 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

Neves (2016) em seu reator metanogênico, que também utilizou resíduo orgânico proveniente de restaurante universitário, apresentou estabilidade no teor de sólidos totais e sólidos voláteis por volta do quadragésimo dia de operação, conseguindo cerca de 51,42% de remoção de STV. Já Amorim (2017), utilizando em seus reatores o mesmo tipo de resíduo alimentar, mas adicionando resíduo de poda e de fibra de coco como co-substratos conseguiu valores de remoção de sólidos voláteis da ordem de 86,93% no que tinha coco e 94,10% no de poda. A biodegradação de compostos orgânicos é considerada como um fator essencial para a digestão anaeróbia, desempenho e recuperação de biogás de resíduos biológicos.

Reis (2012) conseguiu valores médios de remoção de 82% de sólidos voláteis por volta do 150º dia de operação, quando iniciou a suplementação de seu biodigestor de fibra de vidro com alcalinidade, usando esterco bovino como inóculo.

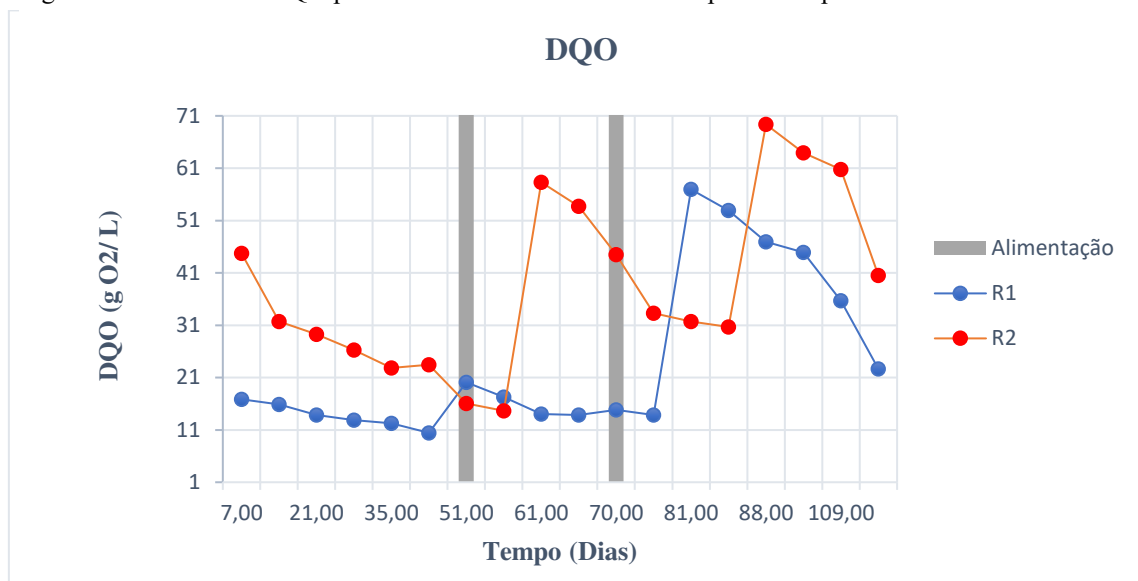
Esses resultados indicam que houve uma boa eficiência de contato entre o resíduo alimentar e os microrganismos presentes nos biodigestores, fato no qual a trituração do resíduo e a agitação com a utilização de bombas também auxiliaram positivamente. Por fim, o inóculo também apresentou uma boa atividade microbiana, já que os reatores apresentaram ótimos valores de degradação da matéria orgânica, não havendo sobrecarga mesmo após as duas alimentações realizadas.

5.2.3 DQO, Carbono Orgânico Total (%), NTK, N%

5.2.3.1 DQO

Como pode ser visto na Figura 21, os valores da demanda química de oxigênio (DQO) diminuíram com o tempo de digestão. Somente após as alimentações com substrato é que se elevavam.

Figura 103- Valores de DQO para os reatores R1 e R2 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

Os biodigestores mostraram atividade microbiana ideal, atingindo valores estáveis de remoção, após 35 ou 40 dias desde a inoculação. A partir deste momento e até 45 e 80 dias de operação, o reator apresentou a maior eficiência de remoção de substrato com valores próximos a 60,19% e 67,24% de remoção de DQO no R1 e R2, respectivamente.

Reis (2012) ao analisar o tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio apresentou valores médios de remoção de DQO em torno de 65%, alcançando valores máximos de 71%.

Neves (2016) ao avaliar o desempenho da produção de hidrogênio e metano via co-digestão anaeróbia em reatores de dois estágios a partir de resíduo alimentar e lodo de tratamento de vinhaça conseguiu redução de DQO da ordem de 64,98%. Já Amorim (2017) conseguiu remoções de 98,52% utilizando resíduo de coco como substrato.

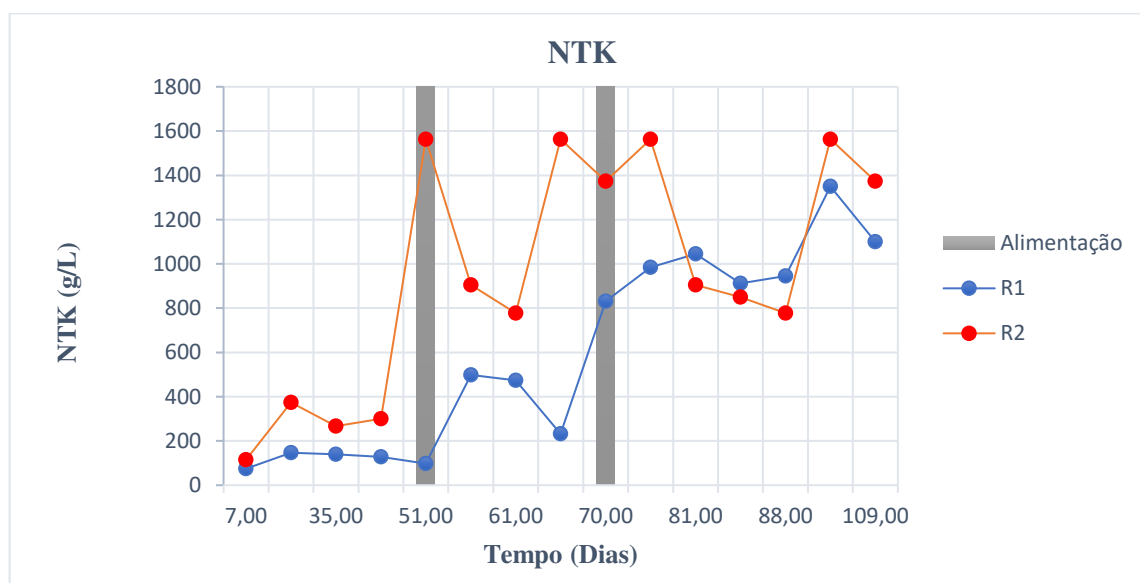
Conforme analisado, os reatores utilizados nesse trabalho apresentaram desempenhos de remoção de DQO elevados e muito próximos em relação aos autores previamente citados.

Um experimento realizado por DHAR *et al.* (2015) onde estudou o efeito da DQO e sólidos voláteis em subsequente produção de metano (CH_4) durante a digestão anaeróbica da fracção orgânica dos resíduos sólidos num digestor de escala laboratorial, foi verificado que a remoção de DQO foi influenciada pela variação da produção de CH_4 .

5.2.3.2 NTK

Os valores de NTK de ambos os reatores também apresentaram aumento quando as alimentações foram realizadas (Figura 22). Para o R2, o valor máximo foi 1562,40 mg NTK/L, ocorrendo 4 vezes durante a operação e para o R1 foi 1349,60 mg NTK/L. Foi possível atingir eficiências de remoção de 53,37% para o R1, que ocorreu logo após à primeira alimentação e valores 50% para o R2 que ocorreu após as duas alimentações. O valor de NTK no reator tende a aumentar após a alimentação devido ao resíduo alimentar ser composto por matéria orgânica rica em nutrientes.

Figura 112- Valores de NTK para os reatores R1 e R2 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

Segundo Chernicharo (2007) o nitrogênio utilizado pelos microrganismos na digestão anaeróbia na forma de nitrito e nitrato não se encontra disponível para o crescimento bacteriano, uma vez que este é reduzido a nitrogênio gás e liberado na atmosfera. As principais fontes de nitrogênio utilizada por esses microrganismos são amônia e nitrogênio orgânico. Valores elevados de NTK podem acarretar em aumento das quantidades de amônia, nitrito e

nitratos, causando instabilidade no sistema, inibindo a atividade da microbiota responsável pela produção de metano.

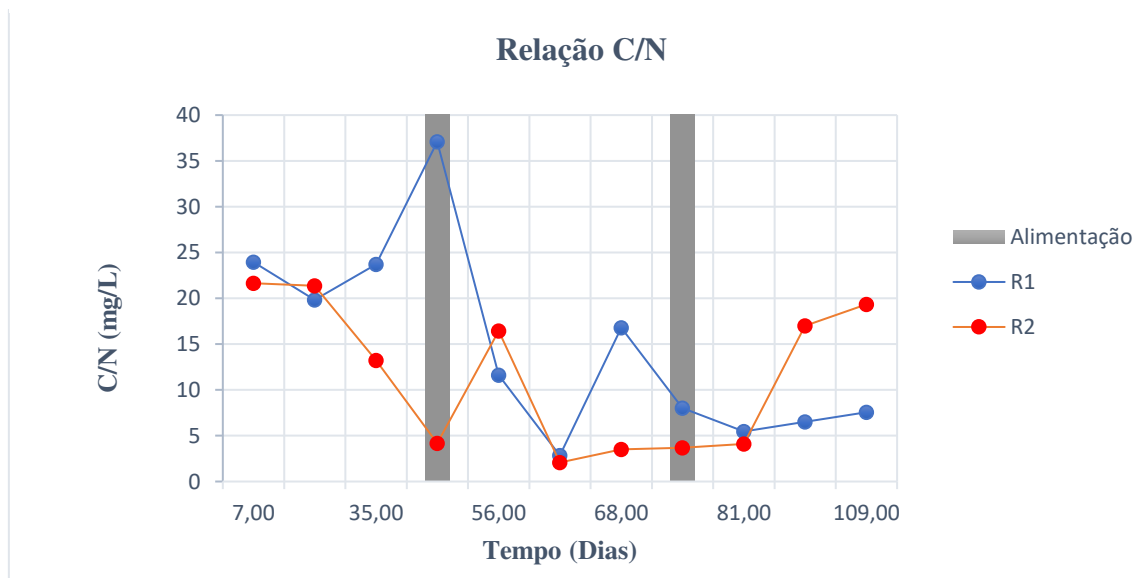
Silva (2009) em seu experimento, atingiu valores máximos de NTK de 1106 mg NTK/L e 1111,6 mg NTK/L e remoção de 67,3%. O autor afirma que essa razoável remoção de NTK muito provavelmente está associada a elevação da concentração do nitrogênio amoniacal, nitrogênio molecular e óxidos de nitrogênio desprendidos para a fase gasosa, com redução das concentrações de nitrito e nitrato.

Já os biodigestores monitorados por Picanço (2004) apresentaram valores crescentes de nitrogênio total, entretanto não foi verificada influência das taxas de recirculação usadas em seu experimento e nem prejuízos à operação de seus reatores.

5.2.3.3 COT (%), N% e relação C/N

A Figura 23 mostra os valores da relação C/N para os reatores R1 e R2. Reis (2012) afirma que em relação aos macronutrientes carbono e nitrogênio, é recomendada a seguinte proporção: C/N = 20-30. Houve muita variação na relação C/N ao longo dos dias, apresentando valores máximos de 37 para o R1 e 21,64 para R2 e mínimos de 2,83 para o R1 e 2,07 para o R2, com a maioria dos valores se situando abaixo de 20. Os valores de C/N só se situaram entre esse intervalo por volta dos primeiros 40 dias de operação. Após as alimentações realizadas esses valores tenderam a sair dessa faixa, provavelmente ao alto teor de nitrogênio presente no resíduo utilizado, já que os valores de C/N diminuíram.

Figura 121- Valores de C/N para os reatores R1 e R2 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

Se a razão C/N dos resíduos é muito elevada verifica-se um déficit de nitrogênio fundamental à síntese celular. Por outro lado, se esta razão é baixa, poderá significar na degradação do substrato a formação de amônia em quantidades elevadas, o que poderá ter um efeito tóxico. (HARTMANN E AHRING, 2005 *apud* REIS, 2012).

Silva (2009) Na segunda fase de seu experimento também conseguiu valores de C/N dentro do intervalo ideal na sua primeira câmara, da ordem de 23,4 unidades, mas também muito baixos, da ordem de 8,5 unidades, verificado na sua terceira câmara.

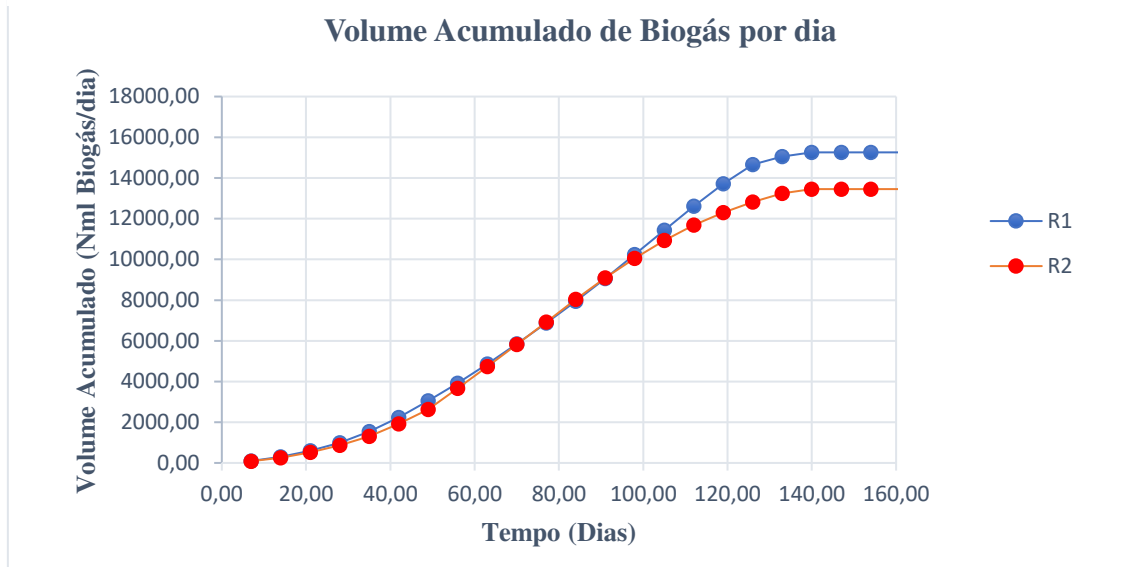
Já em experimento realizado por Sgorlon (2011) foi observado um aumento no valor de C/N com o tempo em função do aumento de carbono no meio, provavelmente por algum fator que favoreceu a inibição microbiana. Assim, essa biomassa morta pode ter aumentado o teor de carbono e minimizada a capacidade de degradação da matéria orgânica.

Segundo Hamawand (2015, *apud* Neves, 2016) um método para se otimizar a relação C/N dos substratos utilizados em biodigestores seria a utilização de cossustratos. Isso foi verificado por Amorim (2017), que ao utilizar cossustratos (resíduo de poda e coco), observou melhora nessa relação, o que indicou um melhor equilíbrio nutricional do sistema em comparação ao sem a utilização de cossustratos.

5.2.4 Biogás e Metano

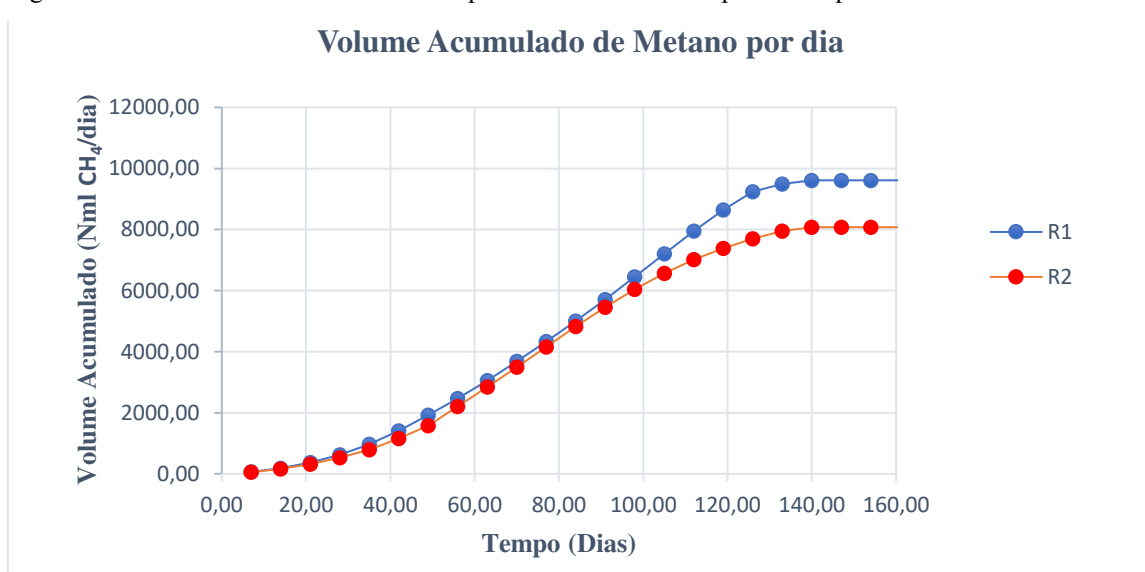
O efeito da DQO subsequente produção de CH₄ durante a digestão anaeróbica dos resíduos sólidos orgânicos não foi tão representativa para a produção de biogás, já que o R1 tinha uma carga orgânica menor do que o R2 e apresentou uma estabilidade maior com relação a produção de biogás e concentração de metano. O volume máximo do biogás gerado (Figura 24) nos biodigestores foram 15,26 L para o R1 13,45 L para o R2, apresentando quantidades bem próximas, sendo que o R1 apresentou quantidades maiores de metano como mostra a Figura 25.

Figura 130 - Volume acumulado de biogás para R1 e R2 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

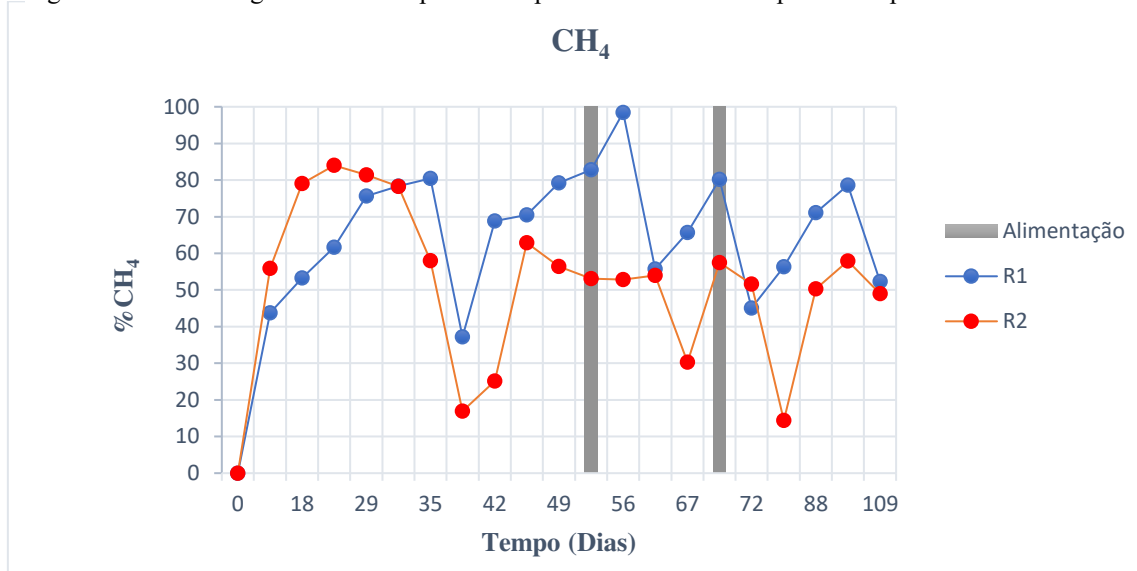
Figura 139- Volume acumulado de metano para R1 e R2 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

Ambos os reatores começaram a produzir metano significativamente por volta do 20º dia de operação (Figura 26), onde o R2 apresentou maiores porcentagens de produção de metano logo no início da pesquisa e foi diminuindo com o passar do tempo, mesmo com as alimentações realizadas. Já o R1 apresentou porcentagens constantes de produção de metano ao longo dos dias. No fim da pesquisa obteve-se um percentual de produção de metano no biogás de 62,9% para o R1 e de 53% para o R2.

Figura 146- Porcentagem de metano produzido por R1 e R2 durante o período experimental



Fonte: O Autor (2017).

A menor produção de metano no R2 pode ter sido causada devido à predominância da etapa acidogênica já que R2 apresentou grande produção de AGV. Isso foi verificado por Luna (2003) onde, ao longo do período de monitoração de seu reator anaeróbio compartimentado, juntamente com a elevação do pH e a redução da concentração de ácidos graxos voláteis no material efluente, o gás metano pôde ser verificado com um crescente percentual na composição geral do biogás, chegando a alcançar valores de 65% na quarta fase de monitoração em sua pesquisa.

Kretzer *et al.* (2016) em seu trabalho, também utilizando resíduos orgânicos de restaurante universitários e esterco bovino em seus biodigestores de escala laboratorial obteve rápida produção de biogás, com quantidades de 1,25L e 1,48L por volta do sexto dia de experimento.

Bouallagui *et al.* (2003), tratando resíduos sólidos vegetais em um biodigestor tubular, com TDH de 20 dias, também apresentou rápida diminuição do pH e rápida produção de ácidos graxos voláteis, mas ainda assim obteve de produção de biogás com 65% de metano, valores similares ao desta pesquisa.

Na tabela 4 são mostrados valores de teor de metano no biogás obtido por outros autores que utilizaram resíduos orgânicos semelhantes ao deste trabalho. Os valores percentuais conseguidos nessa pesquisa foram muitos próximos aos dos referidos autores.

Tabela 4 - Percentuais de metano obtidos em biodigestores utilizados para tratamento de resíduos sólidos orgânicos.

Substrato utilizado na alimentação	Faixa de Temperatura	% de CH₄ obtida	Autor
Frutas e Verduras	Mesófila	61,5	Silva (2009)
Resíduo de restaurante Universitário	Mesófila	60+	Reis (2012)
Resíduo de restaurante Universitário	Mesófila	73,61	Sotti (2014)
Resíduo de restaurante Universitário	Mesófila	72,7	Neves (2016)
Resíduo de restaurante Universitário	Mesófila	62,9	Autor (2017)

Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

5.2.5 Geração de energia elétrica sustentável

Energia elétrica sustentável é a energia gerada a partir de fontes que possa atender as necessidades atuais, sem comprometer e causar prejuízos às gerações futuras. Dentre as fontes de energia elétrica sustentável têm-se: energia hidroelétrica, energia solar, energia eólica, energia das ondas, a energia geotérmica, a bioenergia, a energia das marés e também as tecnologias destinadas a melhorar a eficiência energética.

As áreas potenciais principais de produção de Energia do Biogás são as do setor agropecuário, da indústria agroalimentar, das ETARs municipais e dos resíduos sólidos urbanos, todas essas áreas contribuem para o aumento da produção da biomassa. (ENERGIA, 2015). No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. (MALINOWSKY, 2016).

Analisando a produção de resíduos orgânicos em Fortaleza, de acordo com a Autarquia de Regulação, Fiscalização e Controle dos Serviços Públicos de Saneamento Ambiental (ACFOR) o volume de resíduos domiciliares no município de Fortaleza totaliza 49107,6 toneladas por mês (ACFOR 2012), correspondente a 1636,92 ton/dia. Santos (2010)

segundo estudo, afirma que em média os resíduos domiciliares sólidos apresenta em média 47,5% de material orgânico, logo fortaleza apresenta 777,537 ton/dia de material orgânico.

Admitindo-se uma produção média de 120 m³ de biogás por tonelada de resíduo orgânico (EPE 2008). Fortaleza possui o potencial para produção de 93304,4m³ de biogás por dia. Segundo Scarlatto e Pointi (1992, *apud* Silva, 2009), 1m³ de biogás com 60% de metano é equivalente a 0,62L de gasolina; 0,79L de álcool combustível; 0,56 L de óleo diesel; 0,48Kg de GLP e 1,43 kWh de energia elétrica.

Fortaleza geraria cerca de 133.425,35 kWh de energia elétrica sustentável a partir da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos domiciliares, considerando a utilização de todo o resíduo alimentar que seria descartado. Essa produção poderia até ser utilizado como desconto na conta de energia do bairro de Fortaleza, já que o Ceará apresenta uma das tarifas mais elevadas de preço de energia do Nordeste e aumentos no consumo de energia nos meses mais quentes do ano.

Vale lembrar que a biodigestão também traria benefícios para os agricultores, já que a bovinocultura é responsável pela emissão de um montante significativo de gases GEE (24.257.183 toneladas de CO₂/ano). Logo, os biodigestores implantados para o tratamento do esterco gerado nas propriedades, além de evitarem a emissão de CO₂, ainda representariam uma fonte de renda extra para as propriedades. (GIOVANINI, 2013).

Portanto, verifica-se positivamente o potencial de geração de energia através da biodigestão de resíduos alimentares. Esse resíduo representa uma fonte de matéria prima que, normalmente é desperdiçado, sendo lançado em aterros e lixões, ou causa problemas ambientais e de saúde para a população, poderia ser utilizado como importante fonte de energia, agregando à matriz energética do país de forma sustentável.

6 CONCLUSÃO

Após a análise dos dados discutidos, foi feita as seguintes conclusões referentes aos objetivos específicos estipulados para essa pesquisa:

Em relação ao pH, alcalinidade e ácidos graxos voláteis, houve decréscimos dos valores de pH de ambos os reatores ao longo da pesquisa, devido à predominância da etapa acidogênica e aumento dos valores de AGV. Foi verificado que o R2 apresentou maiores concentrações de AGV, o que resultou em uma menor porcentagem de metano no biogás. Logo, conclui-se que é necessário a manutenção dos valores de pH na faixa ideal para a digestão anaeróbia, para isso foi utilizado bicarbonato de sódio.

Já a remoção de STV para ambos os reatores 56,8% (R1) e 53,38% (R2) e de COT% 55,75 (R1) e 49,87 (R2) se manteve próxima de 50%, mostrando que o biodigestor apresenta um sistema viável para a hidrólise. Em termos de DQO, os reatores apresentaram remoções de 60,19% (R1) e 67,24% (R2). Já a relação C/N apresentou valores muito variáveis em relação a literatura, mesmo assim, foi obtido significativa remoção de matéria orgânica.

A produção total de biogás no final da biodigestão foi 15,26 L e 13,45 L, com 62,9% e 53% de metano para R1 e R2, respectivamente. Como a partida dos reatores foi feito com carga de DQO inicial de 16gO₂/L (R1) e com 44gO₂/L (R2) conclui-se que a carga orgânica pode influenciar na quantidade de biogás produzido pois durante esses 100 dias de experimento o biodigestor que produziu mais biogás foi o que tinha uma menor carga orgânica.

Os reatores apresentaram produções de metano de 9,6 L (R1) e 8,07 L (R2), ambos por volta de 60% de porcentagem em relação ao biogás produzido, indicando boa qualidade do mesmo. Logo, a utilização de resíduos alimentares em biodigestores parece promissor, visto que houve degradação da matéria orgânica e consequente geração de biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia sustentável.

Portanto, apesar das flutuações dos valores de algumas análises, o biogás produzido apresentou boa qualidade para a possível utilização transformando-o em energia. Logo, conclui-se que é viável a produção de biogás com percentuais ótimos de metano para a geração de energia por meio da utilização de biodigestores. Entretanto deve-se avaliar melhor o tipo de inóculo e quanto o resíduo alimentar utilizado no reator influencia na produção de biogás, visto que no presente trabalho a carga orgânica influenciou na quantidade produzida, pois durante esses 100 dias de experimento o biodigestor que produziu mais biogás e maiores teores de metano foi o que tinha uma menor carga orgânica.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o emprego de diferentes tipos de reatores, com relação a configuração, tamanho e material utilizado, por exemplo.
- Avaliar a utilização de diferentes concentrações de cargas orgânicas na partida do biodigestor;
- Estudar a eficiência de diferentes tipos de inóculos na partida do biodigestor, como lodo de cervejaria, ou esterco bovino, visando melhor estabilidade do sistema.
- Avaliar a influência da utilização de cossustratos na produção de biogás via digestão anaeróbia

REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2016**. São Paulo, 2016.
- ACFOR. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Fortaleza**. Fortaleza: Sanetal, 2012.
- AMORIM, Natália Barbosa de. **Codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos utilizando a casca de coco como cossubstrato visando produção de biogás**. 2017. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- ALVES, I.R.F.S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. Recife. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2008.
- ALVES, Ingrid Roberta de França Soares. **Avaliação da Codigestão na Produção de Biogás**. 2016. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- ANDREOLI, C. V.; ANDREOLI F. de N.; TRINDADE, T. V.; HOPPEN, C. **Resíduos Sólidos: Origem, classificação e soluções para destinação final adequada**. 2012. Disponível em: . Acessado em: 12 de novembro de 2017.
- ANGONESE, André Ricardo, CAMPOS, Alessandro Torres, PALACIO, Soraya Moreno *et al.* **Avaliação da eficiência de um biodigestor tubular na redução da carga orgânica e produção de biogás a partir de dejetos de suíno**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6, 2006, Campinas. Available from: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100022&lng=en&nrm=abn>. Acessado em: 26 Nov. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro. 2004
- BARCELOS, Beatriz Rodrigues de. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. 2009. 89 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/df, 2009.
- BONFANTE, Talia Manceira. **Análise da viabilidade econômica de projetos que visam à instalação de biodigestores para o tratamento de resíduos de suinocultura sob as ópticas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e da geração de energia**. 2010. 176 f. Tese (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2010.
- BONTURI, Guilherme de Lucca; VAN DIJK, Michel. **Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise das vantagens socioambientais**. 2012. Disponível em: <http://www.ib.unicamp.br/dep_biologia_animal/BE310>. Acesso em: 26 nov. 2017.
- BOUALLAGUI, H.; CHEIKH, R. BEN; MAROUANI, L.; HAMDY, M. **Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester**. Tunis: Bioresource Technology. V. 86, p.85 – 89. 2003.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997.

CHYNOWETH, David Pohy. **Anaerobic Digestion of Biomass**. London: Elsevier Applied Science, 1987.

DHAR, H., KUMAR, P., KUMAR S., MUKHERJEE, S., VAIDYA, A. (2016) **Effect of organic loading rate during anaerobic digestion of municipal solid waste**. *Bioresource Technology*, v.216 pag. 56–61.

EMBRAPA, Embrapa Agroindústria Tropical. **Produção de Biogás a partir do Bagaço do Caju**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Fortaleza, 2011. 45p.

ENERGIA, Portal. **Energia do Biogás**. 2015. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/energia-do-biogas/>>. Acesso em: 10 dez. 2017

EPE, Empresa de Pesquisa e Energia. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Nota Técnica DEN 06/08. Rio de Janeiro, nov 2008.

FIGUEIRA, Ana Cecília Bulhões. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: Estácio, 2016.

FRIGO, Késia Damaris de Azevedo et al. **Biodigestores: seus modelos e aplicações**. Acta Iguazu, Cascavel, v. 4, n. 1, p.57-65, mar. 2015.

FNR, T Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Gülzow, 2010. 236p.

GASPAR, Rita Maria Bedran Leme. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso da região de Toledo-PR**. 2003. 119 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

GAO, X.; LIU, X.; WANG, W. (2016). **Biodegradation of particulate organics and its enhancement during anaerobic co-digestion of municipal biowaste and waste activated sludge**. *Renewable Energy*, v.96, pag. 1086–1092.

GIOVANINI, Adilson. Análise da quantidade produzida de CO₂ pela bovinocultura no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 10, p.1918-1923, out. 2013.

GONÇALVES, Manuel Souteiro. **Gestão de resíduos orgânicos**. Editora SPI – Sociedade Portuguesa de Inovação Consultadoria Empresarial e Fomento da Inovação, S.A. Porto • 2005 • 1.^a edição

GONÇALVES, Celso Duarte Correia. **Modelação do processo de digestão anaeróbia da FORSU à escala industrial**. 2012. 82 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2012.

GOUVEIA, Nelson. **Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de**

manejo sustentável com inclusão social. Ciênc. saúde coletiva, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, Junho de 2012. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141381232012000600014&lng=en&nrm=iso. Access on 27 Nov. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Plano Nacional de Resíduos Sólidos: diagnóstico dos resíduos urbanos, agrosilvopastoris e a questão dos catadores.** 2012. Comunicado n° 145. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/comunicado/120425_comunicadoipea0145.pdf>. Acesso em: 10 de dez. de 2017.

JORNAL DA GLOBO. São Paulo, 01 mar. 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2013/03/projetos-de-producao-de-biogas-no-brasil-comecam-funcionar.html>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

JORNAL DO BRASIL. São Paulo, 18 set. 2017. Disponível em: <<http://www.jb.com.br/pais/noticias/2017/09/18/italiana-asja-inaugura-usina-de-biogas-em-minas-gerais/>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

KARLSSON, Tommy. **Manual Básico de Biogás.** Lajeado: UNIVATES, 2014. 70p.

KHALID, A., ARSHAD, M., ANJUM, M., MAHMOOD, T., AND DAWSON, L. (2011). **The anaerobic digestion of solid organic waste.** *Waste Management*, v.31, pag. 1737–1744.

KRETZER, Stéfano Gomes et al. **Produção de biogás com diferentes resíduos orgânicos de restaurante universitário.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, [s.l.], v. 5, n. 4, 23 nov. 2016. Universidade Federal do Parana.

LEITE, V. D. et. al. **Bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos: Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás.** In CASSINI, S. T. Rio de Janeiro: PROSAB, 2003. 196p.

LEITE, Valderi D. **Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 12, n. 2, p.190-196, jul. 2008.

LEITE, Wanderli Rogério Moreira. **Digestão Anaeróbia em Temperaturas Mesofílica e Termofílica de Lodo de ETE Usando Reatores de Estágio Único e dos Estágios.** 2015. 193 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

LIMA, Naiane Costa. **Análise de tipos e concentrações de inóculos para potencializar a geração de biogás na digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares do bairro planalto Pici, Fortaleza – CE.** 2015. 140 f. Tese (Mestrado) - Curso de Eng. Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

LIN, J., ZUO, J., GAN, L., LI, P., LIU, F., WANG, K., CHEN, L., GAN, H. (2011). **Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China.** *Journal of Environmental Sciences*, v. 23, n. 8, p. 1403-140

LIU, X; Wang, W; SHI, Y.; ZHENG, L.; GAO, X.; QIOA, W.; ZHOU, Y. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste and waste activated sludge in China: Effect of organic loading rate. **Waste Management**, v. 32, n. 11, p. 2056-2060, 2012.

LOPES, W. S. **Influência da umidade na digestão anaeróbia de resíduos sólidos**. In: 28º Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Artigos Técnicos. AIDIS, 2002.

LOPES, Luciana. **Gestão e gerenciamento integrados dos resíduos sólidos urbanos**. 2006. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARCHI, Maria Eugênia Vial. **Digestão anaeróbia de resíduos orgânicos para cozinha industrial dos restaurantes latife**. 2013. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MATA-ALVAREZ, J; MACÉ, S; LLABRÉS, P. **Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives**. *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 74, n. 1, p.3-16, ago. 2000. Elsevier BV.

MORAIS, Ricardo Gonçalves de. **Estudo da adaptação do ióculo ao lixiviado de aterro sanitário visando o tratamento anaeróbio m reator de leito fluidilizado**. 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

NASCIMENTO, Rosilene Aparecida. **Desempenho de reator anaeróbio de manta de lodo utilizando efluentes líquidos de indústria alimentícia**. 1996. 139 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

NEVES, Grazielle Náthia. **Produção de hidrogênio e metano via codigestão anaeróbia em reatores de dois estágios a partir de resíduo alimentar e lodo de tratamento de vinhaça**. 2016. 122 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L. P. **Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits**. *Energy Police*, 31 (2003) 1481-1491.

OLIVEIRA, Rafael Déleo e. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono**. 2009. 98 f. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PARANÁ. Ministério Público do Paraná. **Unidades de triagem e compostagem de resíduos sólidos urbanos**. Apostila para a Gestão Municipal de Resíduos Sólidos Urbanos. 2ª ed. Curitiba, 2012.

PEREIRA-RAMIREZ, Orlando et al. **Influência da Recirculação e da alcalinidade no desempenho de um reator UASB no tratamento de efluente de suinocultura**. *Agrociência*, Pelotas, v. 10, n. 1, p.103-110, jan. 2004.

PEREIRA, Erlon Lopes; CAMPOS, Cláudio; MOTERANI, Fabricio. **Efeitos do pH, acidez e alcalinidade na microbiota de um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando efluentes de suinocultura.** Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science, [s.l.], v. 4, n. 3, p.157-168, 31 dez. 2009. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi).

PICANÇO, Aurélio Pessoa. **Influência da Recirculação de Percolado em Sistemas de Batelada de uma fase híbrido na digestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.** 2004. 151 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PRATI, Lisandro. **Geração de Energia Elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores.** 2010. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO. **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás.** 2012. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/apoio-e-financiamento-externa/historico-de-programa/prosab/produtos>. Acessado em 15 de novembro de 2017.

REIS, Alexsandro dos Santos. **TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS EM BIODIGESTOR ANAERÓBIO.** 2012. 79 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

REMPEL, Neuri. **Biodigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos consorciado com glicerina.** 2014. 107 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.

RIBEIRO, Cláudio Moisés. **Análise Energética econômica e ambiental da biodigestão de resíduos agropecuários gerados por pequenos e médios produtos rurais da região sul do espírito santo.** 2013. 224 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ROCHA, Camila Marçal da. **Proposta de Implantação de um biodigestor anaeróbio de resíduos alimentares.** 2016. 61 f. Trabalho Final de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

RODRIGUES, Ana Alice Lopes de Sousa. **Co-digestão anaeróbia de resíduos de natureza orgânica.** 2005. 164 f. Tese (Mestrado) - Curso de Gestão Ambiental, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2005.

SANTA CATARINA. Projeto Suinocultura de Santa Catarina. **Tecnologias para o Manejo de Resíduos na Produção de Suínos – Manual de Boas Práticas.** Concórdia: EMBRAPA, 2004. 109 p. 2004

SANTOS, Juliana Vieira dos. **Percentuais de metano obtidos em biodigestores utilizados para tratamento de resíduos sólidos orgânicos.** 2009. 271 f. Tese (Doutorado) - Curso de Direito, Percentuais de Metano Obtidos em Biodigestores Utilizados Para Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos., São Paulo, 2009.

SANTOS, Gemmelle Oliveira. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Fortaleza/CE Dispostos no Aterro Sanitário de Caucaia/CE**. Revista Tecnologia Fortaleza, Fortaleza, v. 31, n. 1, p.39-50, jun. 2010.

SILVA, Wellington Regis. **Kinetics study of the process of anaerobic digestion of vegetable residual solids**. 2009. 201 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

SGORLON, J. G., et al. **Avaliação da DQO e da relação C/N obtidas no tratamento anaeróbio de resíduos fruti-hortícolas**. Acta Scientiarum. Technology, Maringá, v. 33, n. 4, p.421-424, jan. 2011.

SOTTI, Gustavo de. **Biogás de Digestão Anaeróbia dos Resíduos Orgânicos de Restaurante Universitário com Efluentes Sanitário**. 2014. 60 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

SOUZA, Cecília F.; LUCAS JÚNIOR, Jorge de; FERREIRA, Williams P. M. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato: considerações sobre a partida**. Engenharia Agrícola, [s.l.], v. 25, n. 2, p.530-539, ago. 2005. FapUNIFESP (SciELO).

VEIGA, A. P. B., MERCEDES, S. S. **Biometano de gás de aterros no Brasil: Potencial e perspectivas**. In: 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. Artigos Técnicos. AGRENER, 2015.

VELOSO, Alessandro Vieira. **Análise ambiental e energética de sistema de produção de suínos com tratamento de dejetos de biodigestor**. 2014. 193 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.