



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA DA
BIOMASSA



BRUNO CÉSAR MORAIS CORREIA

ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE
RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS E EFLUENTES GERADOS NO CAMPUS A.
C. SIMÕES.

Rio Largo - AL

2019

BRUNO CÉSAR MORAIS CORREIA

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE
RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS E EFLUENTES GERADOS NO CAMPUS A.C
SIMÕES.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação, em Energia da Biomassa da Universidade Federal de Alagoas, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Energia da Biomassa.

Orientadora: Prof^a. Karina Ribeiro Salomon, D.Sc.

Rio Largo - AL

2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Agrárias
Bibliotecário: Erisson Rodrigues de Santana

C824a Correia, Bruno César Moraes

Análise do potencial energético da codigestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e efluentes gerados no campus A. C. Simões. / Bruno César Moraes Correia. Rio Largo - AL – 2019.
59 f.; il; 33 cm

Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) - Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2019.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Karina Ribeiro Salomon

1. Resíduo Orgânico. 2. Efluente. 3. Codigestão. 4. Metano I.
Título.

CDU: 662.7

BRUNO CESAR MORAIS CORREIA

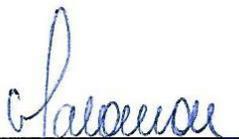
TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA CODIGESTÃO DE RESÍDUOS
ORGÂNICO E EFLUENTES NO CAMPUS A.C. SIMÕES.**

Esta dissertação foi submetida a julgamento como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre Profissional em Energia da Biomassa, outorgado pela Universidade Federal de Alagoas.

A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

Aprovado em 11/07/2019



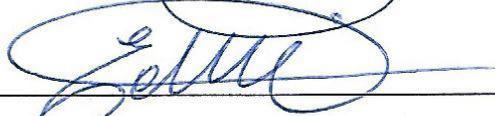
Prof.^a. Dr.^a. Karina Ribeiro Salomon

Orientadora (CTEC/UFAL)



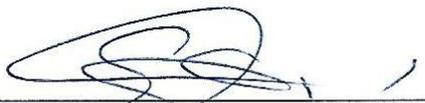
Prof. Dr. José Edmundo Accioly de Souza

Membro Externo (UFAL)



Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim

Membro Externo (UFAL)



Prof. Dr. Elton Lima Santos

Membro Interno (CECA/UFAL)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Alagoas por incentivar e apoiar a qualificação do seu quadro técnico.

Agradeço a minha esposa, Sybelle Aguiar, por estar ao meu lado em todos os momentos, sempre me apoiando.

Aos meus pais pelas palavras de apoio.

Aos meus amigos da Sinfra, Diogo Henrique, Diogo Ferraz e em especial ao André Mota, que me incentivou em todos os momentos do mestrado, me dando bastante apoio e alguns sermões para que eu concluísse.

A minha orientadora Prof^a. Karina Salomon, pela orientação, por estar sempre disposta a me ajudar e pela paciência comigo.

Ao meu coorientador Prof. Eduardo Lucena, pela disposição em me orientar e pela ajuda no laboratório.

Aos amigos que fiz no LCA, Israel e Diego, que muito me ajudaram nas práticas laboratoriais

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho, o meu muito obrigado!

RESUMO

A Universidade Federal de Alagoas (UFAL) possui mais de 30.000 usuários, entre professores, alunos e técnicos, número comparado a uma cidade de pequeno porte. Uma grande quantidade de resíduos orgânicos é gerada e não é realizado nenhum tipo de aproveitamento. Apenas o Restaurante Universitário gera semanalmente mais de duas toneladas de resíduos orgânicos. Em se tratando de lançamento de esgoto, a rede coletora da UFAL é responsável por atender todo *Campus A.C. Simões* além do Hospital Universitário (HUPAA). O presente trabalho tem como objetivo caracterizar o resíduo orgânico gerado no R.U. e o efluente captado pela UFAL, além de analisar o potencial de geração de metano (CH_4) a partir da codigestão entre esses dois substratos. Para isso, foram montados inicialmente 5 reatores anaeróbios, em duplicata e em batelada, com diferentes proporções de substratos. Foram realizadas caracterizações físico-químicas iniciais e finais dos substratos. E através de cromatografia gasosa foi realizada a análise dos gases gerados nos reatores. Após 35 dias de coleta, apenas os reatores que não continham resíduo orgânico geraram metano. Nos demais houve uma inibição da produção de metano. O alto valor da DQO do resíduo orgânico foi fator relevante para colapsar a produção metanogênica. Utilizando o mesmo resíduo orgânico, efluente e lodo que haviam sido congelados, foi montando o reator VI com quantidades iguais entre os 3 substratos. Diferente dos demais reatores que continha resíduo orgânico, os reatores VI produziram metano, mas em pequena quantidade, assim como os demais, houve acidificação do meio. A partir dos dados obtidos da quantidade gerada de metano pelos reatores, fez-se um comparativo com os custos de consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP) pelo R.U. e de energia elétrica pela UFAL e verificou que seria possível substituir os botijões utilizados no R.U. pelo o metano oriundo da decomposição anaeróbia da lagoa, como fonte de combustão. E caso utilizasse todo o metano produzido nas lagoas como fonte de energia elétrica, geraria uma economia de 0,91%, em relação ao consumo atual, no *Campus A.C. Simões*. De forma geral, apesar da baixa produção metano, os reatores que continham resíduos orgânicos se mostraram como uma ótima alternativa para redução da DQO e dos teores de sólidos.

Palavras-chave: Resíduo orgânico, efluente, codigestão, metano.

ABSTRACT

The Federal University of Alagoas (UFAL) has more than 30,000 users, including teachers, students and technicians. A large amount of organic waste is generated and no type of recovery is carried out. Only the University Restaurant (R.U.) generates more than two tons of organic waste weekly. In the case of sewage disposal, the UFAL collection network is responsible for attending the A.C. Simões Campus in addition to the University Hospital (HUPAA). The present work aims to characterize the organic residue generated in the R.U. and the effluent captured by UFAL, besides analyzing the potential of methane (CH_4) generation from the co-digestion between these two substrates. For this, 5 anaerobic reactors were initially assembled, in duplicate and in batch, with different proportions of substrates. Initial and final physical-chemical characterizations of the substrates were performed. The gases generated in the reactors were analyzed by gas chromatography. After 35 days of collection, only reactors that did not contain organic residue generated methane. In the others there was an inhibition of the methane production. The high COD value of the organic residue was a relevant factor to collapse the methanogenic production. Using the same organic residue, effluent and sludge that had been frozen, the reactor was assembled with equal amounts of the three substrates. Unlike the other reactors that contained organic residue, the VI reactors produced methane, but in a small amount, as well as the others, there was acidification of the reactors. From the data obtained from the generated quantity of methane by the reactors, a comparison was made with the costs of consumption of liquefied petroleum gas (LPG) by the R.U. and of electric energy by UFAL and verified that it would be possible to replace the cylinders used in the R.U. by the methane originating from the anaerobic decomposition of the lagoon, as a source of combustion. And if it used all the methane produced in the lagoons as a source of electricity, it would generate an economy of 0.91%, in relation to the current consumption, in Campus A.C. Simões. In general, in spite of the low methane production, the reactors containing organic residues proved to be a good alternative for reducing COD and solids contents.

Key words: Organic waste, effluent, co-digestion, methane.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas da degradação anaeróbia	17
Figura 2 - Etapas dos procedimentos de pesquisa.	25
Figura 3 - Separação dos resíduos orgânicos no RU.....	27
Figura 4 - Pesagem dos resíduos orgânicos no RU.....	29
Figura 5 - Coleta da amostra de resíduo orgânico.	30
Figura 6 - Homogeneização manual da amostra.....	30
Figura 7 - Quarteamento da amostra.	31
Figura 8 - Engarrafamento das amostras de resíduos orgânicos.....	31
Figura 9 - Poço de visita de efluentes do <i>Campus</i> A.C. Simões, próximo ao <i>Arboretum</i>	32
Figura 10 - Coleta e engarrafamento do efluente.....	32
Figura 11 – Lodo de ETE devidamente identificados e engarrafados.	33
Figura 12 - Armazenamento dos reatores dentro do isopor.	35
Figura 13 - Reatores, em duplicata, de I a V, no início do experimento.	39
Figura 14 - Reatores, em duplicata, de I a VI, no final do experimento.....	40
Figura 15 - Deformação da tampa do reator II.	40
Figura 16 - Resultados do pH inicial e final dos reatores.	42
Figura 17 - Resultados da DQO inicial e final dos reatores.....	43
Figura 18 - Resultados dos sólidos totais, iniciais e finais dos reatores.....	44
Figura 19 - Resultados dos sólidos totais voláteis, iniciais e finais dos reatores.....	44
Figura 20 - Período de coleta de gás para cada reator.	45
Figura 21 - Média acumulada de produção de CH ₄ nos reatores V.	46
Figura 22 - Média acumulada de produção de CH ₄ nos reatores VI.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os principais biodigestores e reatores anaeróbios.	22
Tabela 2 - Principais leis e resoluções para os resíduos sólidos urbanos e efluentes.	24
Tabela 3 - Pesagem dos resíduos orgânicos gerados no RU.	29
Tabela 4 - Amostras utilizadas no experimento.....	34
Tabela 5 - Resultados físico-químicos dos substratos.	38
Tabela 6 - Resultados físico-químicos iniciais dos reatores.	41
Tabela 7 - Resultados físico-químicos finais dos reatores.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Agricultura de Baixo Carbono
AGV	Ácido Graxo Volátil
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CECA	Centro de Ciências Agrárias
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IC	Reator Anaeróbico de Circulação Interna
LCA	Laboratório de Controle Ambiental
LSA	Laboratório de Saneamento Ambiental
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
MME	Ministério de Minas e Energia
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVC	Policloreto de Vinila

PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
R.O.	Resíduo Orgânico
R.U.	Restaurante Universitário
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Voláteis Totais
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. JUSTIFICATIVA.....	14
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
4.1 Estado da arte.....	15
4.2 Digestão Anaeróbia.....	17
4.2.1 Etapas do processo de digestão anaeróbia	17
4.3 Codigestão	18
4.4 Parâmetros de operação.....	19
4.5 Biogás e biofertilizante	20
4.6 Biodigestores	21
4.7 Conversão e geração de energia através do biogás	23
4.8 Legislação	23
5. METODOLOGIA	25
5.1 Caracterização da área de estudos	25
5.2 Levantamento de dados.....	26
5.2.1 Resíduo Orgânico	26
5.2.2 Efluente	27
5.2.3 Inóculo.....	28
5.3 Coleta das amostras	28
5.4 Montagem dos reatores	33
5.5 Coleta do biogás	35
5.6 Caracterização físico-química	36
5.7 Sólidos totais, totais voláteis e totais fixos	36
5.8 Potencial hidrogeniônico (pH)	36
5.9 Demanda química de oxigênio.....	37
5.10 Estimativa de geração de energia	37
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
6.1 Análises físico-químicas.....	38
6.2 Substratos e inóculo.....	38
6.3 Reatores.....	39

6.3.1	Potencial hidrogeniônico	42
6.3.2	Demanda química de oxigênio	42
6.3.3	Teor de sólidos.....	44
6.3.4	Produção de biogás	45
6.4	Proposta de utilização do gás produzido.....	47
6.4.1	Combustão direta	47
6.4.2	Conversão em eletricidade.....	48
7.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	50
8.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	52

1. INTRODUÇÃO

O sistema consumista estabelecido nas últimas décadas vem caracterizando a vida moderna. A praticidade proporcionada pelos sistemas industrializados e descartáveis ocasiona certa melhora na qualidade de vida em um primeiro momento. E assim poderia funcionar, não fosse o descaso com as etapas posteriores à utilização dos produtos. Um dos efeitos colaterais desta rotina de consumo são as grandiosas quantidades de resíduos sólidos urbanos produzidos pela população (DIAS E MORAES FILHO, 2006).

No Brasil, atualmente, são coletados 91,2% dos resíduos gerados. O restante, que representa 6,9 milhões de toneladas, tem destino impróprio. (ABRELPE, 2017). Apesar de ter sido instituída em 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que tem como objetivo acabar com todos os lixões do país, apenas 59,1% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados, 42,3 milhões de toneladas, são destinados para aterros sanitários. O Restante, mais de 29 milhões de toneladas, são dispostos por 3.352 municípios de forma inadequada em lixões ou aterros controlados, que não possuem conjuntos de medidas necessárias para proteção ao meio ambiente. (ABRELPE, 2017).

Outra problemática atual se diz respeito aos efluentes, segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada pelo IBGE em 2008, apenas 55% dos municípios brasileiros possuíam coleta de esgoto e destes apenas 28% tinham algum tipo de tratamento. (IBGE, 2010)

O desafio da destinação dos resíduos não consiste apenas em coletar e remover para um local distante, mas, principalmente, em tratar adequadamente os resíduos coletados (GOLDMEIER & JABLONSKI, 2005).

Nesse sentido, a digestão anaeróbia pode ser uma solução para tratar resíduos orgânicos, uma vez que permite a recuperação de energia através da produção de biogás, além de ter o biofertilizante como produto final que pode ser utilizado no melhoramento do solo. (ROMERO-GÜIZA et al., 2014)

Diante do exposto, no presente trabalho foi analisado o processo de codigestão anaeróbia envolvendo a fração orgânica dos resíduos do Restaurante

Universitário e o efluente, ambos coletados na Universidade Federal de Alagoas e inoculados com lodo de estação de tratamento de esgoto. Com finalidade de buscar uma alternativa energética a partir de obtenção do metano proveniente da codigestão.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de geração de energia a partir da codigestão anaeróbia dos resíduos orgânicos e efluentes domésticos produzidos no *Campus A.C. Simões*, UFAL.

2.2 Objetivos específicos

- Levantar a quantidade e caracterização de resíduos orgânicos e efluentes gerados no Restaurante Universitário e no *Campus A.C. Simões*, respectivamente;
- Analisar a geração de biogás a partir da codigestão;
- Quantificar o potencial energético da codigestão dos resíduos orgânicos e efluentes em diferentes proporções;
- Avaliar a economia gerada, caso utilize o metano como fonte de energia.

3. JUSTIFICATIVA

Com a lei 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), ficou definido o fim da disposição de resíduos sólidos em lixões a partir de 2014 e uma das soluções encontradas para auxiliar na disposição final é o aproveitamento energético dos resíduos orgânicos pela digestão anaeróbia.

Além disso, o Plano Nacional de Saneamento Básico, Lei 14.445/07, fomenta o desenvolvimento científico e tecnológico e a difusão dos conhecimentos gerados de interesse para o saneamento básico.

Por isso a importância do tema diante desta nova sociedade, pois a utilização da energia gerada através da codigestão representa uma destinação mais sustentável, além de despertar, possivelmente, uma consciência e educação ambiental para a comunidade acadêmica.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Estado da arte

Existem registros que tratam da utilização do biogás por volta do ano 3000 a.C. pelos povos Sumérios, que aplicavam o método de tratamento anaeróbio de resíduos. (VERMA, 2002).

Em 1667, observou que a decomposição da matéria orgânica nos pântanos gerava um gás, porém não sabia exatamente como ocorria essa formação e não sabia de que gás se tratava. Só em 1776, após dois anos de pesquisas, o físico italiano Alessandro Volta conseguiu identificar a composição química do gás inflamável e o denominou de metano. (CLASSEM; LIER; STAMPS, 1999).

No ano de 1857, foi construída a primeira instalação destinada a produzir gás combustível em grande escala a partir da decomposição anaeróbia. A produção era destinada a alimentar um hospital para portadores de hanseníase em Bombaim, na Índia. (SOARES; SILVA, 2010).

Inicialmente nos Estados Unidos, a temática ambiental passou a ser introduzida nos planos de gestão das instituições de ensino superior, na década de 1960. (JULIATTO et al., 2011)

No Brasil, o interesse pelos biodigestores aconteceu na década de 70 com a crise do petróleo. Foram implantados vários programas de difusão dos biodigestores no Nordeste, porém os resultados colhidos na época não foram satisfatórios. (BOLETIM ENFOQUE, 1999).

Com o surgimento do mercado de crédito de carbono, teve início no Brasil, o segundo ciclo dos biodigestores em meados dos anos 2000. Propriedades rurais de médio e grande porte, com destaque para a criação de suínos, construíram biodigestores visando a coleta e combustão de biogás. Estima-se que entre 2005 e 2013 foram instalados cerca de 1.000 biodigestores com os incentivos financeiros dos créditos de carbono. (BGF EQUIPAMENTOS, 2019).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos desde a década de 1960 até o presente momento para o manejo adequado de resíduos em instituições de ensino

superior. Lucena (2016) avaliou a geração de biogás sob diferentes condições anaeróbias de biodegradação, utilizando resíduos orgânicos coletados no Restaurante Universitário da Universidade Federal de Pernambuco do *campus* Recife. O qual houve uma baixa produção de metano, devida à acidificação dos experimentos que continham resíduo orgânico. Martins (2017) apresentou em seu trabalho a atividade metanogênica da fração orgânica de RSU coletados no Restaurante Universitário da Universidade Federal de Alagoas. Nesse trabalho foram utilizados como inóculos dejetos suínos e lodo anaeróbio de estação de tratamento. No experimento foram utilizados reatores de 2 L, em batelada, e foram obtidos resultados satisfatórios na produção de metano. A pesquisa de Frias (2016), realizada, também, na Universidade Federal de Alagoas, apresentou uma proposta para instalação de um biodigestor para geração de energia a partir dos resíduos orgânicos coletados no Restaurante Universitário da UFAL. Nesse trabalho foram mostrados os custos e a viabilidade de implantação, o qual a recuperação do investimento inicial se daria em até 11 anos.

Atualmente os biodigestores e o uso do biogás contam com uma tecnologia bastante avançada e com grande potencial de aplicação. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), órgão vinculado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), vem desenvolvendo, desde 2011, diversos projetos para produção de biogás e biofertilizante, principalmente para o tratamento de dejetos de suínos e de aves. Um dos principais projetos é o Programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC), que tem o apoio do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) para financiamento em até 100% para projetos de energias e tecnologias sustentáveis, dentre elas, o biogás. (EMBRAPA, 2019).

Segundo a Empresa Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energias (MME), estima-se que até 2030, com a participação do setor agrícola, o biogás poderá representar o mesmo volume de energia distribuída que a fotovoltaica. (EPE, 2018).

4.2 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico que ocorre na ausência de oxigênio no qual converte, através de microrganismo, a matéria orgânica complexa em uma mistura gasosa contendo metano, dióxido de carbono, nitrogênio, gás sulfídrico e outros gases de baixo peso molecular. Os microrganismos envolvidos possuem um alto grau de especificidade e cada grupo atua em reações específicas. (FORESTI et al, 1999)

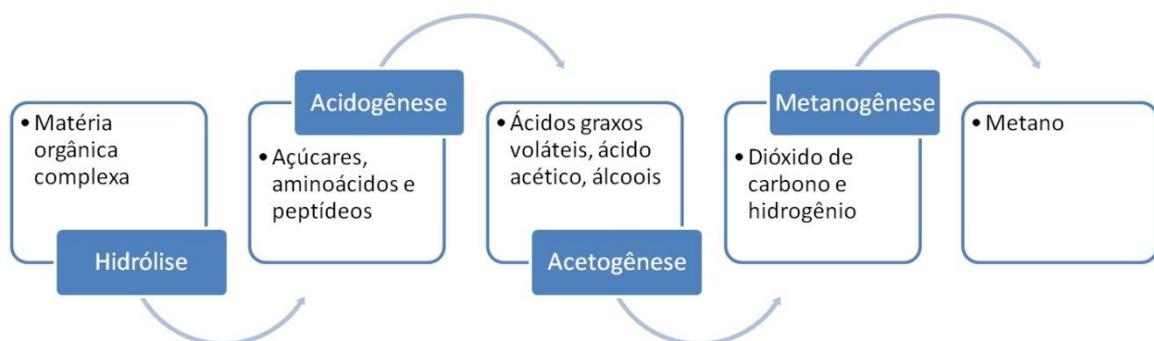
Côté et al. (2006) define a digestão anaeróbia como uma interação complexa entre diversos microrganismo e a matéria orgânica presente no resíduo, no qual obtém-se, principalmente, o metano e o dióxido de carbono.

O gás resultante da decomposição anaeróbia é, em média, composto por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis. (PECORA, 2006).

4.2.1 Etapas do processo de digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia pode ser dividido em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, figura 1. Nesse processo a matéria orgânica complexa é quebrada por grupo de bactérias e tem o metano como um dos produtos finais. (BITTON, 2005).

Figura 1 - Etapas da degradação anaeróbia



Fonte: Adaptado de BITTON, 2005

- Hidrólise: É a primeira etapa da digestão anaeróbia, onde a matéria orgânica complexa, em contato com a água, é convertida em moléculas de menor peso molecular. Através de enzimas hidrolíticas, as bactérias fermentativas transformam os carboidratos, proteínas e lipídios em monômeros solúveis (açúcares, aminoácidos e peptídeos). (CHERNICHARO, 2007);
- Acidogênese: Na segunda etapa, os compostos produzidos durante a hidrólise são degradados por bactérias acidogênicas através da fermentação. A fermentação desses compostos resulta em substâncias orgânicas mais simples como ácido graxo voláteis (AGV), ácido acético, láctico, fórmico e alcoóis. Há também uma pequena produção de gás carbônico e hidrogênio, provenientes de uma decomposição intermediária. Nesta etapa estão presentes bactérias anaeróbias obrigatórias, podendo também existir espécies facultativas. (GERARDI, 2003; BENGTSSON, 2008; OLIVEIRA, 2004);
- Acetogênese: Nesta etapa ocorre a oxidação dos produtos gerados na fase anterior pelas bactérias acetogênicas, gerando substratos adequados para as bactérias metanogênicas. Durante essa fase, uma grande quantidade de hidrogênio é formada, fazendo com que o pH do meio fique ácido. (CHERNICHARO, 2007);
- Metanogênese: É a última etapa da digestão anaeróbia, onde o metano é formado, principalmente, através da conversão de acetato, dióxido de carbono e hidrogênio. (LEITE, 2009). Segundo Miranda (2009), dois grupos de bactérias se destacam na produção do metano, o primeiro grupo utiliza o acetato (*Methanosarcina* spp. E *Methanotrix* spp.), enquanto o segundo grupo utiliza o hidrogênio (*Methanobacterium* spp. E *Methanococcus* spp.).

4.3 Codigestão

A codigestão anaeróbia é a junção de dois ou mais substratos orgânicos visando otimizar a digestão anaeróbia.

Segundo Alvarez e Lidén (2008), a codigestão anaeróbia é a decomposição simultânea de dois ou mais substratos orgânicos e geralmente melhora o rendimento do biogás produzido no biodigestor, devido a coesão positiva, fornecendo nutrientes em falta na biodigestão.

Comparado a digestão de substratos isoladamente, a codigestão anaeróbia, pode apresentar diversos benefícios, tais como: maior eficiência de degradação do substrato; melhor custo-benefício das unidades de tratamento; diluição de compostos inibitórios, como amônia e AGV, e aumento da produção de biogás (MATA-ALVAREZ et al., 2000).

4.4 Parâmetros de operação

Alguns fatores descritos abaixo influenciam na digestão anaeróbia para formação do biogás, são eles:

- Impermeabilidade ao ar: As bactérias metanogênicas são essencialmente anaeróbias. A decomposição de matéria orgânica na presença de ar (oxigênio) irá produzir apenas dióxido de carbono (CO₂) (JUNIOR, 2000);
- Composição do resíduo – quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior será o potencial de produção de biogás no aterro. Resíduos de alimentos são exemplos de matéria orgânica facilmente decomposta, o que acelera a taxa de produção do gás. Materiais que se decompõe lentamente, como grandes pedaços de madeira, não contribuem significativamente com a geração de gás (FILHO, 2005). A produção de biogás não é bem sucedida, se apenas uma fonte de material for utilizada (JUNIOR, 2000);
- Umidade – Depende da umidade inicial do resíduo, da infiltração da água da superfície e do solo, e da água produzida na decomposição. Quanto maior o teor de umidade, maior será a taxa de produção do biogás (FILHO, 2005);
- Tamanho das partículas – quanto menor a unidade da partícula, maior será a área da superfície específica e, portanto, a decomposição será mais

rápida se comparada a uma partícula de menor área. Por exemplo, a decomposição de um tronco de madeira ocorrerá mais rápida se este for cortado em pedaços menores ao invés de ser disposto inteiro (FILHO, 2005);

- pH – Dentro da faixa ótima de pH a produção do metano é maximizada e fora dessa faixa – um pH abaixo de 6 ou acima de 8 – a produção de metano fica estritamente limitada (FILHO, 2005). Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), valores de pH abaixo de 6,3 poderão ocasionar a fermentação ácida em relação a metanogênese, aumentando a concentração dos AGV e causando instabilidade do sistema.
- Temperatura – A atividade enzimática das bactérias depende estritamente da temperatura, visto que é conhecido que alterações bruscas de temperatura causam desequilíbrio nas culturas envolvidas, principalmente nas bactérias formadoras de metano. Em torno de 10 °C essa atividade é muito reduzida e acima de 65 °C as enzimas são destruídas pelo calor. Portanto, a faixa ideal para a produção de biogás é de 32 °C a 37 °C (bactérias mesofílicas) e de 50 °C a 60 °C (bactérias termofílicas) (JUNIOR, 2000).

4.5 Biogás e biofertilizante

O biogás é uma mistura gasosa, composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Sua geração é proveniente tanto da volatilização de compostos químicos como da biodegradação principalmente anaeróbia da matéria orgânica devido à ação de bactérias. A presença de outros gases e sua distribuição percentual varia segundo o tipo e a quantidade dos resíduos degradados.

Este gás é composto tipicamente por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis. (PECORA, 2006).

Outro produto resultante da decomposição anaeróbia da matéria orgânica é o biofertilizante, que contém células vivas ou latentes de microrganismos como

bactérias, leveduras e fungos (ALVES et al., 2001). Este material possui um grande poder fertilizante, fornecendo elementos essenciais para o crescimento das plantas, como nitrogênio, fósforo e potássio (UBALUA, 2007).

4.6 Biodigestores

São equipamentos relativamente simples de serem fabricados, que são usados para realizar a decomposição de matéria orgânica.

O biodigestor constitui-se de uma câmara fechada, onde o material orgânico, juntamente com uma solução aquosa, é colocado, onde sofre o processo de digestão anaeróbia e tem como resultado o biogás. (DEGANUTTI et al, 2002)

Devido ao interesse na biodigestão, muitos biodigestores foram desenvolvidos e a tecnologia avançou bastante, tanto na agricultura como no tratamento sanitário. (SARAVANAN & SREEKRISHNAN, 2006)

Apesar de existir vários tipos de biodigestores, todos são compostos, basicamente, de duas partes, um recipiente (tanque), que abriga e permite a digestão do substrato e a campânula (gasômetro), que armazena o biogás resultante da decomposição.

Segundo Deganutti et al (2002), atualmente, existe uma grande diversidade de biodigestores, cada um adaptado a uma realidade e necessidade de biogás.

A Tabela 1 apresenta um comparativo contendo informações dos principais biodigestores e reatores anaeróbios:

Tabela 1 - Comparativo entre os principais biodigestores e reatores anaeróbios.

Modelo	Características	Vantagens	Desvantagens	Referências
Indiano	-Alimentação contínua; -Paredes feitas em alvenaria; -Campânula móvel e normalmente moldada em ferro	-Fácil construção; -Pressão interna do gás constante; -Ocupa pouco espaço do terreno em relação ao da marinha	- Alto custo de produção, devido a campânula de ferro -Pode ocorrer entupimentos nos tubos entre a caixa de carga e o biodigestor -Limitado em áreas de lençol freático alto	SGANZERLA (1983), DEGANUTTI et al (2002).
Chinês	-Alimentação contínua -Feito em alvenaria -Campânula fixa -Funciona com o princípio de uma prensa hidráulica	- Dispensa o uso de campânula de ferro - Custo inferior, comparado ao modelo indiano -Ocupa pouco espaço do terreno em relação ao da marinha	-Pressão interna variável; -Pode ocorrer entupimentos nas tubulações entre a caixa de carga e o biodigestor	JORGE e OMENA (2012).
Marinha	- <i>Headspace</i> de lona de pvc impermeável; -Modelo raso e longo	-Fácil construção -Escavação rasa -Fácil limpeza -Maior produção de gás nos dias quentes	-Curta vida útil, aproximadamente cinco anos; -Lona sujeita a cortes	BARRERA (1993), MOURA (2012).
Batelada	-Alimentação descontínua; -Pode ser feito em um tanque anaeróbio ou vários em série	-Sistema simples; -Pequena exigência operacional	-Longos períodos para disponibilidade do biogás	TURDERA; YURA (2006), DEGANUTTI et al (2002).
UASB	- Utilizado para tratamento de água residuais	-Eficiente na remoção de DBO e de sólidos em suspensão -Curto tempo de detenção hidráulica	-Baixa eficiência na remoção de oliformes; -Geralmente necessita de pós-tratamento	VAN HAANDEL E CATUNDA (1995), QUARMBY E FORSTER, (1995).
IC	-Utilizado no tratamento de águas residuais; -Consiste em dois reatores UASB sobrepostos;	-Baixo consumo de energia; -Pequena área de ocupação	-Necessita de cuidados para o tratamento de esgoto doméstico	PINTO (1999), KATO et al (1999).

Fonte: Autor, 2019

4.7 Conversão e geração de energia através do biogás

Devido ao potencial calorífico do metano contido no biogás, existem diversas alternativas que viabilizam o aproveitamento energético em biodigestores. Pecora (2006) diz que a conversão energética do biogás é o processo de transformação da energia química das moléculas do biogás, por meio de uma combustão controlada, em energia mecânica, que por sua vez será convertida em energia elétrica.

Várias tecnologias são utilizadas para converter o biogás em energia, as mais utilizadas são os motores de combustão interna de ciclo Otto e as microturbinas a gás. Segundo Souza; *et. al.* (2004), as microturbinas apresentam custos elevados e o tempo de vida útil operando com o biogás é baixo.

Já os motores de combustão interna de ciclo Otto, segundo Pereira (2005), apesar de não serem os mais indicados para a geração de eletricidade, necessitam de pequenas modificações para utilizar o biogás como combustível.

Hoje, já existem vários tipos de motores movidos a biogás, como o de irrigação de pastos, motobombas e grupos geradores capazes de transformar o biogás em energia elétrica.

4.8 Legislação

A Constituição Federal, promulgada em 1988, estabelece em seu artigo 23, inciso VI, que “compete à União, aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer uma das suas formas”. As principais leis e resoluções que podemos destacar para esta pesquisa estão descritas na Tabela 2:

Tabela 2 - Principais leis e resoluções para os resíduos sólidos urbanos e efluentes.

Legislação	Descrição
Lei Federal 12.305/10	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e tem, como um dos principais pontos, a eliminação de todos os lixões, além de metas para reciclagem e reaproveitamento energético.
Lei Federal 11.445/07	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico
Resolução normativa 482 - ANEEL	Cria o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Nessa resolução é definida a diferença entre micro e minigeração.
Resolução 430/2011 – CONAMA	Estabelece padrões e condições de lançamento de efluentes
Resolução normativa nº 8/2015 – ANP	Estabelece as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinados ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais.

Fontes: BRASIL (2010); BRASIL (2007); BRASIL (2012); BRASIL (2011) e BRASIL (2015).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) foi importante, diferenciar resíduos de rejeitos. Considera-se resíduo aquele material que foi descartado e que ainda pode ser recuperado através do reuso, reciclagem, compostagem ou através da valorização energética, voltando ao ciclo econômico. Já o rejeito é o material que não há possibilidade de reuso, de recuperação energética, de reciclagem ou de compostagem e não possui outro destino senão os incineradores ou os aterros sanitários (POLZER, 2017).

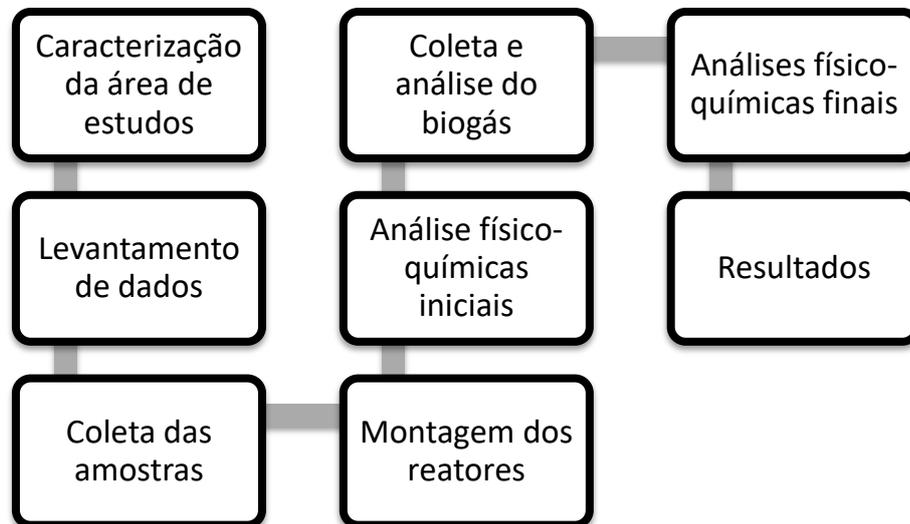
5. METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) e no Laboratório de Controle Ambiental (LCA), ambos localizado no *Campus A. C. Simões*, na Universidade Federal de Alagoas.

Foram realizadas 6 amostras em duplicata com reatores do tipo batelada, ou seja, receberam uma carga total de biomassa e somente foram esvaziados após o término da biodigestão.

Os experimentos obedeceram às etapas da figura 2:

Figura 2 - Etapas dos procedimentos de pesquisa.



Fonte: Autor, 2019

5.1 Caracterização da área de estudos

O *Campus A. C. Simões* na UFAL está situado na Av. Lourival Melo Mota, S/N, no bairro de Tabuleiro do Martins, na cidade de Maceió – AL. Possui aproximadamente 2,00km² (fonte: Google Maps).

Possui entre professores, alunos e técnicos mais de 18.000 usuários (comunicação pessoal)¹, número maior que muitas cidades. O *Campus* possui, além do Restaurante Universitário (RU), diversos outros restaurantes e cantinas particulares, onde apenas o Restaurante Universitário é responsável por aproximadamente 13.000 refeições semanais (comunicação pessoal)², o que o torna um grande gerador de resíduos orgânicos. Esse resíduo gerado é descartado e coletado pela empresa responsável pela limpeza urbana de Maceió sem que antes seja realizado algum tipo de tratamento prévio.

Outra consequência desse grande número de usuários é a geração de um volume expressivo de efluentes domésticos no *Campus* A.C. Simões. Em 2017, a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da universidade entrou em funcionamento. Este esgoto é bombeado para duas lagoas de estabilização em série e após o tratamento é lançado na rede pública coletora. Porém, nenhum aproveitamento é feito deste efluente.

O aproveitamento energético dos resíduos orgânicos e efluentes gerados no *Campus* A.C. Simões, além de minimizar os danos ao meio ambiente, poderá apresentar um retorno financeiro através da geração de energia, seja ela mecânica, térmica ou elétrica.

5.2 Levantamento de dados

5.2.1 Resíduo Orgânico

Inicialmente foram realizadas visitas no Restaurante Universitário, RU, para ter conhecimento do funcionamento do local. No próprio Restaurante é realizada a separação entre o resíduo orgânico, conforme figura 3, e o seco.

O resíduo orgânico é destinado à alimentação animal e esta coleta é feita duas vezes ao dia, a primeira acontece aproximadamente as 08h e os resíduos são

¹ Dados fornecidos via correio eletrônico por Rosemeire Lima e Adriana Lordaro, ambas servidoras da Procuradoria Educacional Institucional – PEI e Departamento de Administração de Pessoal – DAP, respectivamente, em janeiro de 2017.

² Dado fornecido via correio eletrônico pela servidora Amanda Araújo, nutricionista do Restaurante Universitário do *Campus* A.C. Simões, em janeiro de 2017.

oriundos do jantar do dia anterior e do café da manhã. A segunda coleta é realizada cerca das 14h e nela são recolhidos os resíduos do almoço.

O resíduo seco é coletado e destinado a Central de Tratamento de Resíduo de Maceió três vezes por semana.

Figura 3 - Separação dos resíduos orgânicos no RU.



Fonte: Autor, 2018

Nas primeiras coletas dos resíduos orgânicos, realizadas as 08h, os R.O. eram provenientes do jantar da noite anterior e do café da manhã e tinha como predominante a presença de sopa, inhame, cuscuz, pão e proteína de origem animal, geralmente o frango. Nas coletas dos resíduos gerados no almoço, realizadas as 14h, foram encontrados, todos os dias, feijão, geralmente caseiro, arroz e proteína de origem animal, bovina ou frango, foram encontrados também, mas em menor quantidade, verduras, legumes e frutas que foram servidas na sobremesa.

5.2.2 Efluente

O sistema de esgotamento sanitário existente no *Campus A. C. Simões*, atende a todas as unidades da UFAL e o Hospital Universitário, HU, e consiste em uma rede coletora, poços de visita, uma estação elevatória de esgoto com duas

bombas e uma unidade de tratamento biológico formado por duas lagoas de estabilização em série, sendo a primeira anaeróbia e a segunda facultativa.

A lagoa anaeróbia mede 50 m x 50 m e uma profundidade de 2,30 m, resultando no volume de 5.750 m³ e a facultativa tem 100 m x 100 m e profundidade igual a 2,30 m, resultando no volume de 23.000 m³.

A estimativa de vazão de esgotos da UFAL foi dimensionada para 780.000 L/dia, sendo 740.000 L/dia referentes a todas unidades do *Campus A.C. Simões* e 40.000 L/dia relativos ao Hospital Universitário.

5.2.3 Inóculo

Com o propósito de acelerar a degradação da matéria orgânica, foi utilizado no experimento o lodo anaeróbio oriundo da estação de tratamento de esgoto do Condomínio Residencial Cidade Jardim, que possui 504 unidades habitacionais e fica localizado no bairro do Tabuleiro, em Maceió-AL.

5.3 Coleta das amostras

A pesagem dos resíduos, assim como a coleta das amostras, foi realizada na área de abastecimento e descarga do Restaurante Universitário, durante uma semana, de segunda a sexta, duas vezes por dia. Cada dia era coletado duas amostras de 1 kg cada. Totalizando ao término da semana 10 kg de amostra de resíduo orgânico.

Todo o resíduo orgânico gerado ao longo do dia foi pesado e registrado. Para isto, foi utilizada uma balança digital com capacidade para 150 Kg (figura 04).

Figura 4 - Pesagem dos resíduos orgânicos no RU.



Fonte: Autor, 2018

A cada pesagem, os dados eram registrados e ao final foi gerada uma tabela com o desperdício semanal.

Tabela 3 - Pesagem dos resíduos orgânicos gerados no RU.

	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
Manhã (Jantar e Café da manhã)	550,50 kg	98,00 kg	147,00 kg	157,40 kg	122,50 kg
Tarde (almoço)	143,70 kg	264,20 kg	345,40 kg	238,70 kg	203,90 kg
Total do dia	694,20 kg	362,20 kg	492,40 kg	396,10 kg	326,40 kg

Fonte: Autor, 2018

Após a pesagem, uma amostra era recolhida e iniciava-se o processo de homogeneização e quarteamento.

Para a coleta da amostra foi utilizada uma pá e um balde de 20 litros (figura 5) e, para evitar contaminação da amostra com o solo, todo o trabalho foi realizado sobre uma folha de compensado resinado de 16mm. Em seguida era feito o processo de homogeneização manual (figura 6) e o quarteamento da amostra.

Figura 5 - Coleta da amostra de resíduo orgânico.



Fonte: Autor, 2018

Figura 6 - Homogeneização manual da amostra.



Fonte: Autor, 2018

Realizada a homogeneização, dava-se início ao processo de quarteamento, em que a amostra era dividida em quatro partes iguais (figura 7) e depois desprezada duas das quatro partes, restando então duas porções.

As duas partes restantes eram misturadas novamente e o processo de quarteamento era repetido mais duas vezes, quando se tinha um volume aproximadamente de 1/4 do volume inicial.

Figura 7 - Quarteamento da amostra.



Fonte: Autor, 2018

Finalizando o processo de quarteamento, as amostras eram engarrafadas em garrafas plásticas de 1 litro (figura 8) e, em seguida, elas eram lavadas externamente e armazenadas em um congelador.

Figura 8 - Engarrafamento das amostras de resíduos orgânicos.



Fonte: Autor, 2018

Assim como a coleta dos resíduos orgânicos, as amostras dos efluentes foram obtidas durante uma semana e foram recolhidas no último poço de visita a jusante do *Campus A.C. Simões*, próximo a casa de bombas. (Figura 9).

Figura 9 - Poço de visita de efluentes do *Campus A.C. Simões*, próximo ao *Arboretum*.



Fonte: Autor, 2018

A cada dia, durante segunda a sexta, eram coletadas 2 amostras, uma no início da manhã e outra no início da tarde, de 1 L cada, totalizando no 10 L. Para realizar a coleta foi utilizado uma corda e um balde de 10 L para alcançar a amostra no poço de visita, após a coleta, o efluente era engarrafado, figura 10, a garrafa era lavada externamente, identificada e armazenada no congelador.

Figura 10 - Coleta e engarrafamento do efluente.



Fonte: Autor, 2018

Diferentemente da coleta do resíduo orgânico e do efluente, o inóculo utilizado no experimento, lodo anaeróbio de estação de tratamento de esgoto, foi

coletado de uma só vez durante a descarga da ETE. Foram recolhidos e engarrafados aproximadamente 4 L do lodo (figura 11) e em seguida foram identificados e refrigerados.

Figura 11 – Lodo de ETE devidamente identificados e engarrafados.



Fonte: Autor, 2018

5.4 Montagem dos reatores

O experimento foi formado, inicialmente, por cinco amostras, em duplicata, utilizando reatores de vidro, em batelada, com capacidade de 2 L, sendo 1 L preenchido pelo substrato e o restante, o *headspace*. Durante o experimento observou-se a necessidade de analisar mais uma amostra, em duplicata, e, ao final, o experimento ficou composto por 12 reatores.

Inicialmente, foram definidas cinco proporções para a codigestão. Todas elas possuíam a quantidade de lodo constante, 10% do volume do substrato, e os 90% restantes variavam na relação entre resíduo orgânico e efluente.

Durante um mês de experimento surgiu a necessidade de montar mais um reator, com proporções iguais entre resíduo orgânico, efluente e inóculo. Para a montagem da sexta amostra, foram utilizados os substratos que sobraram da montagem anterior e que foram mantidos refrigerados. A tabela 4, abaixo, mostra a

nomenclatura utilizada para cada reator, em duplicata, e suas respectivas proporções de substrato e inóculo.

Tabela 4 - Amostras utilizadas no experimento.

Reator	Resíduo orgânico	Efluente	Inóculo
Reator I	90%	0%	10%
Reator II	67,5%	22,5%	10%
Reator III	45%	45%	10%
Reator IV	22,5%	67,5%	10%
Reator V	0%	90%	10%
Reator VI	33,33%	33,33%	33,33%

Fonte: Autor, 2019

Com a finalidade de facilitar a homogeneização e também de diminuir a granulometria, antes do preenchimento dos reatores, as amostras resultantes de cada dia de coleta do resíduo orgânico foram trituradas no liquidificador e misturadas em proporções iguais até obter uma pasta de resíduo homogênea.

Assim como o resíduo orgânico, o efluente resultante de cada dia de coleta também foi misturado em iguais proporções, porém, por não haver presença de grandes partículas sólidas, não houve necessidade de trituração.

O lodo da estação de tratamento de esgoto, por ter sido coletado de uma única vez e não ter presença de grandes partículas sólidas, não passou por nenhum processo prévio.

Após preparar as amostras para cada reator, de acordo com as proporções apresentadas na tabela 4, foram coletados 200 ml de cada para realização de análises físico-químicas.

Antes do fechamento dos reatores foi feita a correção do pH para mantê-lo próximo ao neutro, entre 6, 5 e 7, para isso foi utilizado solução de NaOH (hidróxido de sódio) nos reatores I, II, III, IV e VI e HCl (ácido clorídrico) no reator V.

Após o preenchimento dos reatores com os respectivos substratos, foi injetado N_2 (nitrogênio) no *headspace* para remover o O_2 (oxigênio) e permitir que ocorresse a digestão anaeróbia.

Para evitar variações de temperatura, todos os reatores ficaram armazenados no LCA, em um isopor de 120 L (figura 12) que somente era aberto durante a coleta do biogás e o restante do tempo permanecia fechado.

Figura 12 - Armazenamento dos reatores dentro do isopor.



Fonte: Autor, 2019

5.5 Coleta do biogás

A coleta do biogás ocorreu entre os meses de janeiro a março de 2019. As leituras eram realizadas no Laboratório de Controle Ambiental por meio do cromatógrafo gasoso modelo Shimadzu GC-2010-Plus.

Para o procedimento, utilizava-se uma seringa de 1 mL, a qual perfurava a tampa de borracha dos reatores, em seguida lavava três vezes a seringa com o próprio gás gerado no *headspace*, ou seja, extraía e descartava o gás no próprio reator. Em seguida coletava-se o gás gerado e o injetava no cromatógrafo para a leitura. O processo de coleta do biogás, variou entre os reatores e durou entre 35 e 58 dias.

5.6 Caracterização físico-química

Foram realizadas análises físico-químicas, teor de sólidos totais (ST), teor de sólidos voláteis totais (SVT), teor de sólidos totais fixos (STF), pH e demanda bioquímica de oxigênio (DQO), iniciais e finais de todas as amostras.

5.7 Sólidos totais, totais voláteis e totais fixos

Para a determinação da série de sólidos, foram utilizadas cápsulas de porcelanas que eram calcinadas a 550°C durante o período de 1 hora e após resfriamento era determinado o seu peso (Po). Em seguida, 50 mL da amostra eram colocados na cápsula e expostos a uma temperatura de 100°C na estufa durante 24 horas, e, ao final era pesado (P1). Por último, a porcelana contendo a amostra era colocada em uma mufla a 550°C durante 2 horas e, após resfriamento, pesava-se novamente (P2). Os valores dos sólidos totais, sólidos voláteis totais e sólidos totais fixos são determinados pelas equações 1, 2 e 3, respectivamente:

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(P_1 - P_0) \cdot 10^6}{V_{amostra}} \dots\dots\dots \text{equação 1}$$

$$STV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(P_1 - P_2) \cdot 10^6}{V_{amostra}} \dots\dots\dots \text{equação 2}$$

$$STF \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(P_2 - P_0) \cdot 10^6}{V_{amostra}} \dots\dots\dots \text{equação 3}$$

5.8 Potencial hidrogeniônico (pH)

A determinação do pH, foi realizada com peagâmetro, o qual era calibrado e eram colocados aproximadamente 150 mL da amostra em um béquer de 250 mL e com o medidor potenciométrico e eletrodos era determinado eletronicamente o pH da amostra.

5.9 Demanda química de oxigênio

Para a determinação da demanda química de oxigênio, eram adicionados ao tubo de DQO 1,5 mL de solução de digestão (dicromato de potássio e sulfato de mercúrio), 3,5 mL de solução de ácido sulfúrico e sulfato de prata e 2,0 mL da amostra pura ou diluída.

Os tubos eram levados ao digestor e permaneciam a 150°C por 2 horas, ao final, eram resfriados e feito a leitura das amostras no espectrofotômetro.

5.10 Estimativa de geração de energia

A partir dos dados obtidos do consumo médio mensal em kWh da UFAL e o consumo médio mensal de botijões de gás liquefeito de petróleo (GLP) no R.U. e seus respectivos custos. E com os dados da quantidade de metano gerado a partir da codigestão e a relação entre CH_4/GLP e CH_4/kWh foi definido o quanto seria economizado mensalmente caso seja realizada a troca da fonte energética.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análises físico-químicas

Com finalidade de determinar algumas características quantitativas e qualitativas, antes e depois do experimento, foram realizadas análises físico químicas iniciais e finais.

6.2 Substratos e inóculo

A tabela 5 apresenta o pH, DQO, ST, STV e STF do resíduo orgânico, efluente e lodo de estação de tratamento de esgoto.

Tabela 5 - Resultados físico-químicos dos substratos.

Substrato	pH	DQO (g/L)	ST (g/L)	STV (g/L)	STF (g/L)
Resíduo orgânico	4,44	708,92	229,09	215,88	13,21
Efluente	7,52	0,33	0,32	0,23	0,09
Lodo	6,85	11,63	23,94	19,19	4,75

Fonte: Autor, 2019

Foi encontrado um pH médio de 4,4 nas amostras de resíduos orgânicos. Níveis de acidez semelhantes em resíduos orgânicos também foram encontrados por diferentes autores, como Martins (2017) e Magalhães (2018).

O pH do efluente, 7,52, é semelhante ao pH do efluente bruto encontrado por Lima (2005), que foi 7,31.

Os resultados das amostras encontram-se na mesma faixa de Lima (2015) para lodo de tanque séptico, 6,8. E 6,86 para o pH de lodo anaeróbio encontrado por Martins (2017).

O valor de 708,92 g/L para a DQO do resíduo orgânico ficou bastante acima de resultados encontrados por Martins (2017) e Magalhães (2018), que obtiveram 221,85 g/L e 134,63 g/L, respectivamente.

Em relação à DQO do efluente, 0,33 g/L, ficou abaixo da faixa de 0,40 a 0,80 g/L citada por Metcalf e Eddy (1991). Entretanto, segundo Sperling (2015), a característica dos esgotos é em função dos usos às quais a água foi submetida. Esses usos, e a forma com que são exercidos, variam com o clima, situação social, econômica e hábitos da população.

Quanto ao lodo anaeróbico do experimento, os valores de DQO se encontram na mesma faixa citada por Elbeshbishy, Nakhla e Hafez (2012).

6.3 Reatores

Após aberto os reatores, foi coletada uma amostra de cada para realização da caracterização físico-química final. Nos reatores que continham o resíduo orgânico, houve uma alteração da coloração. No início do experimento, apresentavam uma coloração marrom, com tons avermelhados, em função da grande quantidade de beterraba que havia nos resíduos orgânicos (figura 13) e ao final do experimento, os reatores apresentavam uma coloração marrom claro (figura 14). Já os reatores V, que continham apenas o efluente e lodo, não apresentaram mudanças de perceptíveis de coloração.

Figura 13 - Reatores, em duplicata, de I a V, no início do experimento.



Fonte: Autor, 2019

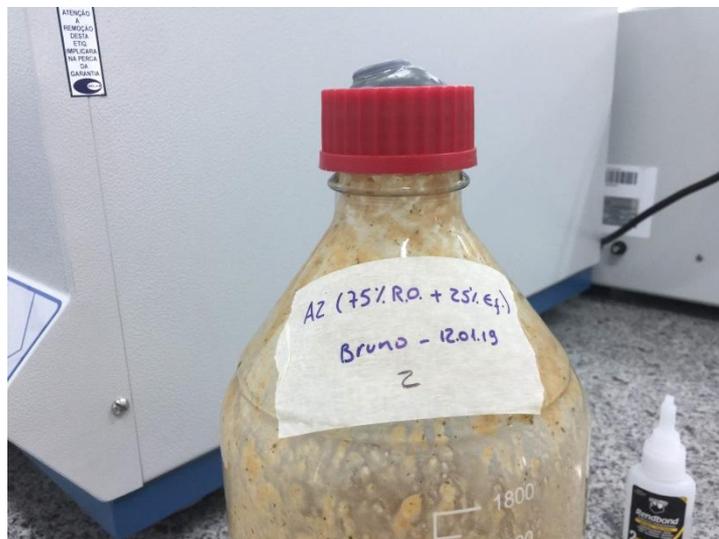
Figura 14 - Reatores, em duplicata, de I a VI, no final do experimento.



Fonte: Autor, 2019

Verificou-se também que pressão interna, gerada no *headspace*, causou deformação em todas as tampas, com exceção dos reatores V, conforme figura 15.

Figura 15 - Deformação da tampa do reator II.



Fonte: Autor, 2019

As tabelas 6 e 7, abaixo, apresentam os resultados das análises físico-químicas iniciais e finais dos reatores. Os dados foram obtidos a partir da média dos resultados coletados dos reatores em duplicata.

Tabela 6 - Resultados físico-químicos iniciais dos reatores.

Reator	pH	DQO (g/L)	ST (g/L)	STV (g/L)	STF (g/L)
Reator I (90% R.O. + 10% Lodo)	6,68	631,52	208,99	196,21	12,78
Reator II (67,5% R.O. + 22,5% Efluente + 10% Lodo)	6,57	494,15	157,10	147,69	9,41
Reator III (45% R.O. + 45% Efluente + 10% Lodo)	6,87	312,95	105,63	99,17	6,46
Reator IV (22,5% R.O. + 67,5% Efluente + 10% Lodo)	6,76	160,89	56,86	53,18	3,68
Reator V (90% Efluente + 10% Lodo)	6,89	3,01	2,71	2,14	0,57
Reator VI (33,3% R.O. + 33,3% Efluente + 33,3% Lodo)	6,75	240,05	84,37	78,35	6,01

Fonte: Autor, 2019

Tabela 7 - Resultados físico-químicos finais dos reatores.

Reator	pH	DQO (g/L)	ST (g/L)	STV (g/L)	STF (g/L)
Reator I (90% R.O. + 10% Lodo)	3,65	226,40	181,70	167,11	14,59
Reator II (67,5% R.O. + 22,5% Efluente + 10% Lodo)	3,57	198,20	137,62	127,35	10,27
Reator III (45% R.O. + 45% Efluente + 10% Lodo)	3,72	159,54	97,51	85,92	11,59
Reator IV (22,5% R.O. + 67,5% Efluente + 10% Lodo)	4,52	86,32	53,81	49,34	4,47
Reator V (90% Efluente + 10% Lodo)	6,84	2,58	2,60	2,13	0,47
Reator VI (33,3% R.O. + 33,3% Efluente + 33,3% Lodo)	4,74	76,74	39,64	34,10	5,54

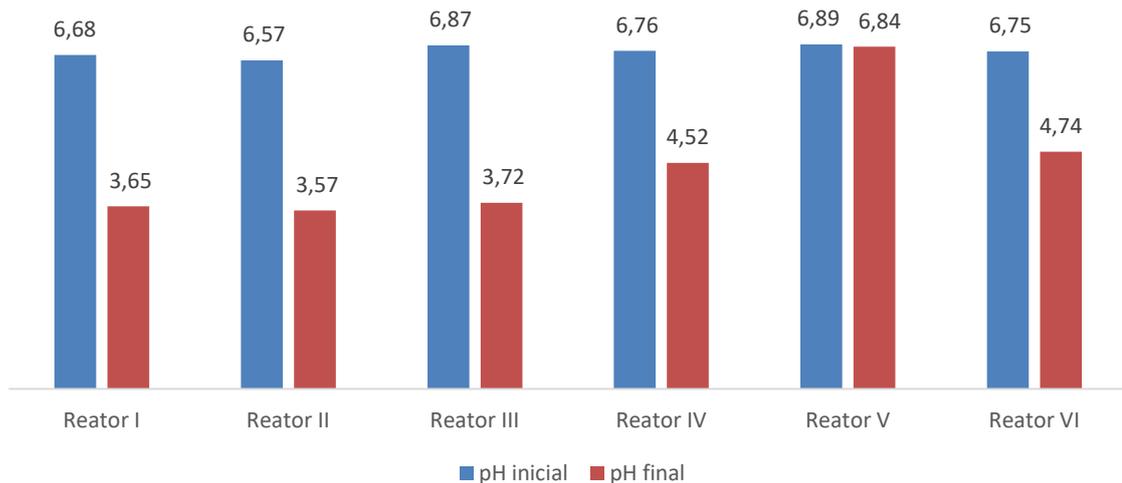
Fonte: Autor, 2019

Para uma melhor comparação e análise entre os reatores, foram elaborados gráficos para cada elemento da caracterização físico-química, inicial e final.

6.3.1 Potencial hidrogeniônico

Os valores apresentados abaixo para o pH inicial (figura 16) foram obtidos após a correção do pH, realizada com hidróxido de sódio ou ácido clorídrico.

Figura 16 - Resultados do pH inicial e final dos reatores.



Fonte: Autor, 2019

Percebe-se que ao final do experimento houve uma acidificação em todos os reatores que continham resíduo orgânico como substrato. Segundo Ruiz (1992), a sobrecarga do biodigestor pode fazer com que ocorra a acidificação do meio, ocasionada pelas bactérias responsáveis pela degradação dos polímeros, por possuírem uma atividade com maior formação de ácidos orgânicos.

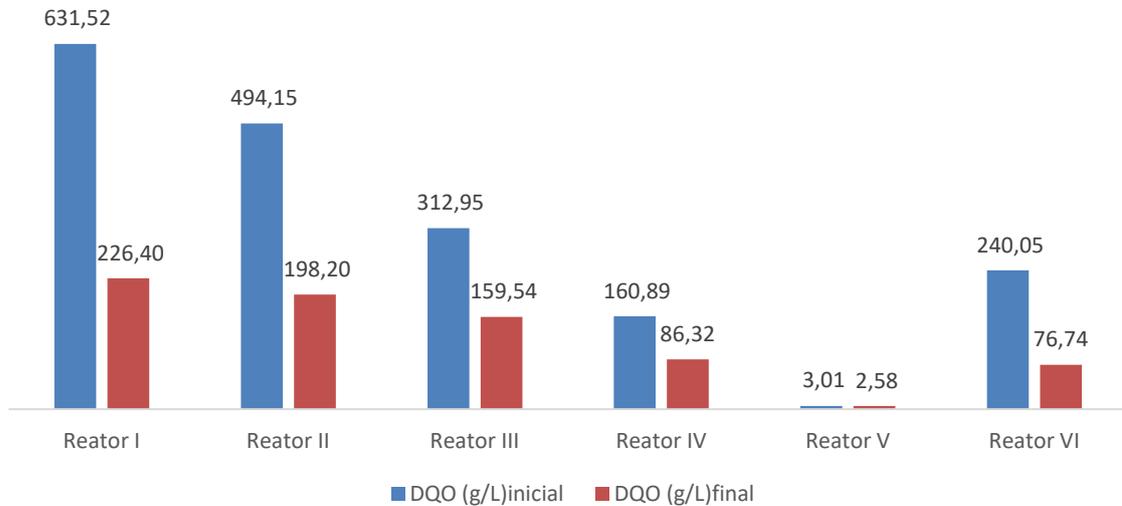
Entretanto, no reator V, que não possuía resíduos orgânicos, não houve processo de acidificação e manteve o pH próximo da faixa ideal para a atividade metanogênica.

6.3.2 Demanda química de oxigênio

Tendo em vista que dentre os substratos analisados o que contém a maior carga orgânica é o resíduo orgânico. Observa-se que o valor da DQO dos reatores está diretamente ligado com a quantidade de resíduo orgânico encubada.

Através dos dados apresentados na figura 17, observa-se uma redução significativa na DQO.

Figura 17 - Resultados da DQO inicial e final dos reatores.



Fonte: Autor, 2019

Entre os reatores I e V, que possuem a mesma quantidade de lodo, porém diferentes proporções de resíduo orgânico e efluente, é possível perceber que à medida que diminui a quantidade de resíduo orgânico em relação ao efluente, reduz também a eficiência da remoção de matéria orgânica.

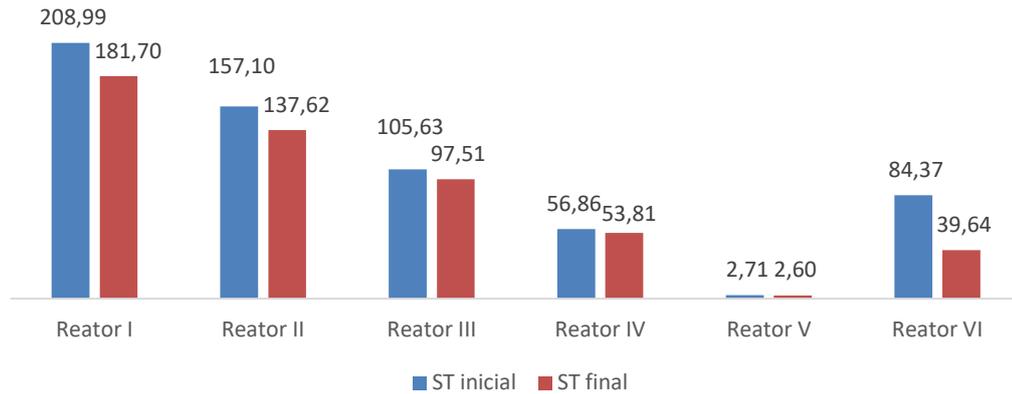
No primeiro reator, que possui apenas resíduo orgânico e lodo, houve uma redução de 64,15% da DQO. Uma redução um pouco menor, de 59,89%, ocorreu no reator II, que possuía resíduo orgânico e efluente, porém, este em menor quantidade. No reator III, que as quantidades de resíduos orgânicos e efluentes são iguais, a redução foi de 49,02%. No reator IV, a quantidade de efluente é superior a de resíduo orgânico, teve redução de 46,34%. No reator V, que não possui resíduo orgânico, a redução foi de apenas 14,28%.

Entretanto, o reator que teve a maior redução da DQO foi o reator VI, que possui a maior quantidade de lodo. A redução nesse reator foi de 68,03%.

6.3.3 Teor de sólidos

Devido a maior carga orgânica, à medida que diminui o resíduo orgânico no reator, diminui também a presença de sólidos totais (figura 18) e sólidos totais voláteis (figura 19).

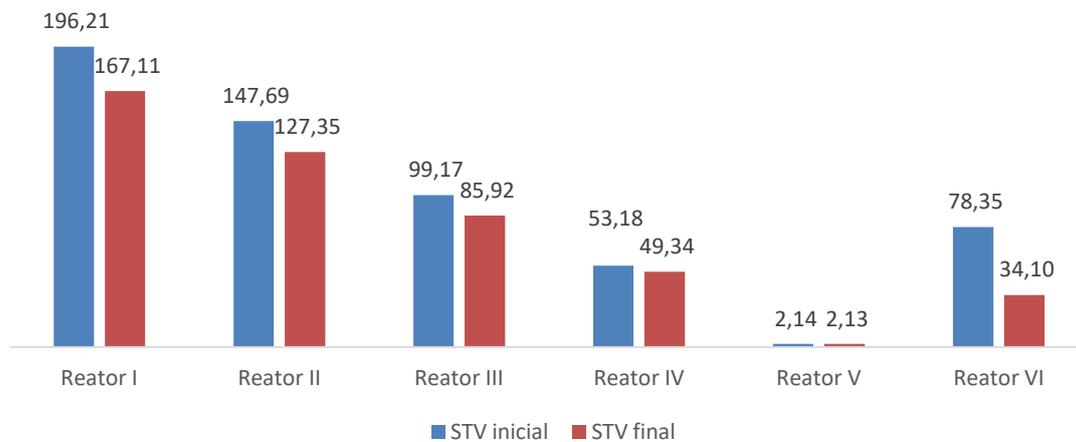
Figura 18 - Resultados dos sólidos totais, iniciais e finais dos reatores.



Fonte: Autor, 2019

Analisando a figura, é possível perceber que a eficiência na remoção de sólidos totais diminui à medida que aumenta a quantidade de efluente no reator. A mesma situação ocorre com os sólidos totais voláteis, conforme figura 19.

Figura 19 - Resultados dos sólidos totais voláteis, iniciais e finais dos reatores.



Fonte: Autor, 2019

O reator VI, que possui a maior quantidade de lodo e passou menos tempo encubado, foi o que teve a maior redução de sólidos totais e sólidos totais voláteis, 56,57% e 56,47%, respectivamente. Leite (1999) afirma que a eficiência da transformação de massa de sólidos totais voláteis tende a ser mais eficiente em função da quantidade de inóculo.

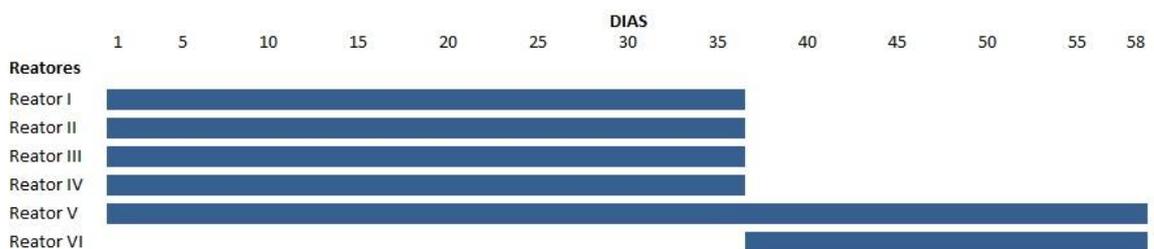
A parcela de sólidos totais fixos em relação aos sólidos totais ficou próxima nos reatores que contêm matéria orgânica. A quantidade de STF para os reatores I, II, III, IV e VI foi, em média, de 7,86% em relação aos ST. A maior quantidade de matéria inorgânica foi no reator V, com 19,49% em relação aos ST.

6.3.4 Produção de biogás

Durante 36 dias foi feita coleta e análise de gás nos reatores I, II, III, IV. No decorrer desse período, não houve produção ou era próximo a zero a quantidade de metano gerada nos reatores que continham resíduo orgânico, ou seja, nos reatores de I a IV.

A coleta nos reatores V continuou até que declinasse a produção de metano, totalizando 58 dias para estes reatores. E, nesse período, foi montado com o resíduo orgânico, efluente e lodo que estavam refrigerados, os reatores VI, o qual foi realizada a coleta de gás durante 22 dias. A figura 20 ilustra o início e final de coleta gasosa de cada reator.

Figura 20 - Período de coleta de gás para cada reator.



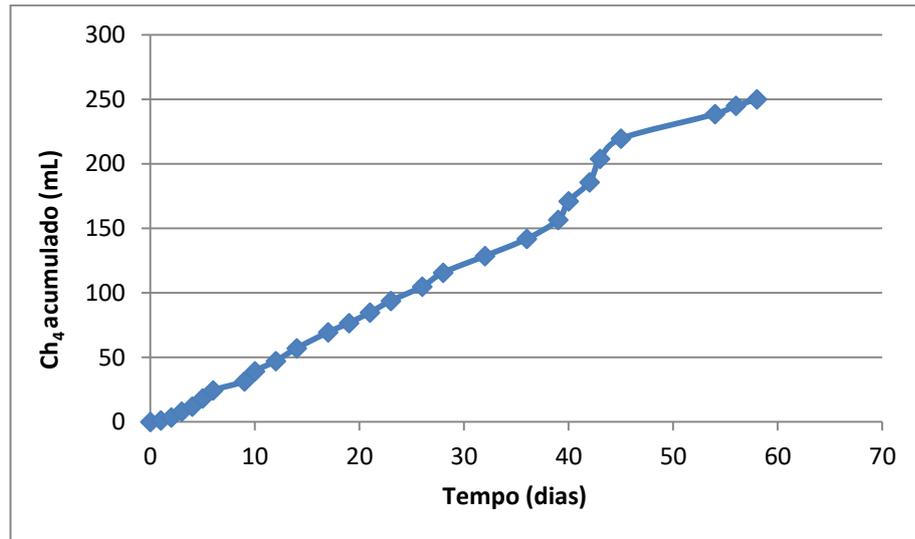
Fonte: Autor, 2019

O alto valor da DQO dos resíduos orgânicos sobrecarregou os reatores, levando a uma acidificação e inibindo a atividade metanogênica nos reatores I, II, III,

IV e VI. Valores significativos para metano só foi possível coletar nos reatores V e VI, os demais reatores produziram apenas dióxido de carbono.

Os dados apresentados nas figuras 21 e 22 são os resultados das médias dos reatores V e VI, em duplicata.

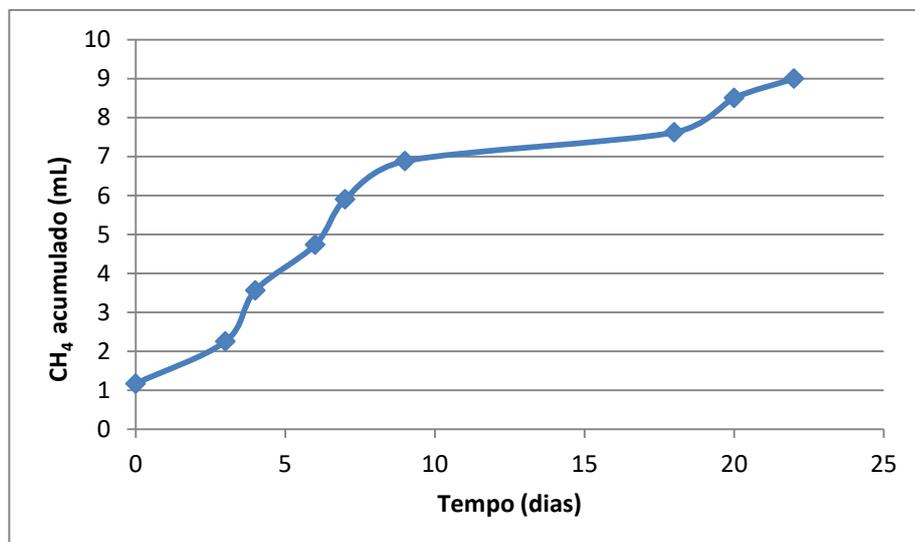
Figura 21 - Média acumulada de produção de CH₄ nos reatores V.



Fonte: Autor, 2019

Dentre os reatores que produziram metano, os reatores com a amostra V foram os que tiveram o melhor resultado, com geração acumulada de 276,38 mL de CH₄ no 58º dia e uma produção máxima diária de 18,98 mL no 54º dia.

Figura 22 - Média acumulada de produção de CH₄ nos reatores VI.



Fonte: Autor, 2019

Nos reatores que continham resíduo orgânico, apenas os reatores VI - que foi colocado 3,33 vezes mais lodo que os demais reatores - produziram metano, ainda assim, em pequena quantidade. Com uma produção máxima de 1,31 mL no 4º dia e um volume acumulado de 9,0 mL no 22º dia. Apesar da correção do pH antes do tamponamento, ocorreu a acidificação do meio, impedindo um melhor resultado na produção de metano.

De acordo com Siegert e Banks (2005), em resíduos com grande presença de carboidratos, lipídios e proteínas, a degradação anaeróbia é fortemente dependente da relação entre a taxa de processo de acidificação e a taxa de processo metanogênico, pois o processo de acidificação é mais rápido do que o processo metanogênico, provocando quedas progressivas no pH, que podem estressar ou inibir a produção de metano.

Segundo Vandevivere, De Baere e Verstraete (2002), o estresse da produção metanogênica pode ser minimizado ou evitado através da operação do reator, como alimentação crescente da matéria orgânica ou adoção de reatores com duas ou múltiplas fases.

A produção de metano, mesmo que pouca, nos reatores VI pode ter ocorrido devido a uma maior quantidade de lodo utilizada. Segundo Silva (2014), uma quantidade maior de inóculo durante a partida dos reatores previne o acúmulo de ácidos graxos no sistema. Porém, Alexis (2015) afirma que não existe um consenso na literatura de qual a melhor relação entre substrato/inóculo para a prevenção do acúmulo de ácidos graxos, pois há uma grande variação nas características dos substratos.

6.4 Proposta de utilização do gás produzido

6.4.1 Combustão direta

Considerando que nos reatores que possuíam resíduo orgânico não houve produção de metano ou que foi insignificante, a possibilidade de utilização de biogás

como fonte de energia, nesse contexto, só seria possível com a utilização do CH₄ gerado a partir da decomposição anaeróbia dos efluentes.

Considerando que para cada um litro de substrato dos reatores V foram gerados 276,38 mL de biogás e, de acordo com Martins (2017), são necessários 1.173,91m³ de biogás por mês para suprir a demanda dos 24 botijões GLP de 45 Kg utilizados no R.U., observa-se que seriam necessários 4.247,45 m³ de efluente por mês para gerar a demanda de biogás necessária.

$$\frac{1.173,91 \text{ m}^3 \text{ biogás/mês}}{0,27638 \text{ m}^3 \text{ biogás/m}^3 \text{ efluente}} = 4.247,45 \text{ m}^3 \text{ efluente/mês}$$

Levando em consideração que as lagoas de estabilização foram projetadas para uma demanda máxima de 780 m³/dia, ou seja, 23.400 m³/mês, o valor acima representa quase 20% da capacidade máxima de coleta das duas lagoas.

Considerando que um botijão de GLP de 45 Kg custa R\$ 307,00 (TRANSOLIVEIRAGAS, 2019), o uso de efluente como fonte de biogás para combustão, geraria uma economia mensal de R\$ 7.368,00.

6.4.2 Conversão em eletricidade

Considerando o consumo médio do *Campus* A.C. Simões e o Hospital universitário é de 947.399 kWh e que o custo médio é de R\$ 0,66 por kWh (Eletrobrás, fevereiro de 2019). E de acordo com Pompermayer apud Salomon (2007), 1 m³ de biogás equivale a 1,34 kWh. Sabendo que a as duas lagoas de estabilização tem uma capacidade máxima de 780 m³/dia e levando em consideração que a amostra do experimento teve uma taxa de conversão do substrato em biogás de 27,638%.

$$780 \frac{\text{m}^3 \text{ efluente}}{\text{dia}} \cdot 30 \frac{\text{dia}}{\text{mês}} \cdot 0,27638 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{m}^3 \text{ efluente}} = 6.467,29 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{mês}}$$

$$6.467,29 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{mês}} \cdot 1,34 \frac{kWh}{m^3 \text{ biogás}} = 8.666,17 \text{ kWh/mês}$$

Caso fosse utilizado a capacidade máxima das lagoas durante um mês para geração de energia elétrica através da coleta do biogás esse valor representaria apenas 0,91% ou R\$ 5.719,67 de economia em relação ao consumo atual.

7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Diante os resultados obtidos nos experimentos desta pesquisa, pode-se concluir que a produção de biogás foi prejudicada pela sobrecarga orgânica.

Os dados mostraram que houve uma redução satisfatória da DQO nos reatores, porém essa eficiência era prejudicada à medida que aumentava a quantidade de efluentes dos reatores.

A grande quantidade de matéria orgânica inicial dos resíduos alimentares do Restaurante Universitário levou uma sobrecarga dos reatores que o continham como substrato. E houve uma acidificação nos reatores I, II, III, IV e VI.

Nos reatores VI, apesar de conter resíduo orgânico, houve produção de metano, ainda que pouco. Tal geração ocorreu devido a adição de uma maior quantidade de lodo de estação de tratamento de esgoto nos reatores. Porém, a quantidade de lodo não foi suficiente para evitar a acidificação e o processo metanogênico foi prejudicado.

Uma quantidade maior de lodo nos reatores VI mostrou, também, uma melhor eficiência na redução dos sólidos totais e voláteis.

Os reatores que melhor apresentaram produção de biogás foram os da amostra V, foram também os únicos que não sofreram acidificação, mantendo-se numa faixa de pH próximo ao neutro.

Devido às características físico-químicas dos substratos analisados, a digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos utilizados não se mostrou eficiente para a produção de biogás. Porém, a partir das amostras V, que continham apenas efluentes e inóculo, os experimentos mostraram que é possível suprir a demanda de botijões de GLP utilizados no R.U. caso utilizasse o metano gerado nas lagoas de estabilização. Porém caso utilizasse esse metano como fonte energética, seria economizado menos de 1% em relação à demanda atual de energia elétrica.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se:

1. Utilizar ou desenvolver reatores com duas ou mais fases para otimizar cada etapa da decomposição anaeróbia;
2. Realizar o experimento alimentando o reator de forma gradual para tentar minimizar os efeitos da acidificação;
3. Utilizar diferentes quantidades de lodo e verificar qual a melhor proporção para geração de biogás;
4. Realizar o experimento de forma separada com os principais alimentos servidos no R.U. e verificar a influência na produção de metano.

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**, 2017. Disponível em < <http://abrelpe.org.br/panorama/> >. Acesso em 12 de Junho de 2019.

ALEXIS, P. B. et al. **Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresíduos de origen municipal**. Ingeniería Investigación y Tecnología, Delegación Covoacán, v. 15, n. 4, p. 515-526, 2015.

ALVAREZ, R.; LIDÉN, G. **Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste**. Renewable Energy, 33:726, 2008.

ALVES, M. V. et al. **Macrofauna do solo influenciada pelo uso de fertilizantes químicos e dejetos de suínos no Oeste do Estado de Santa Catarina**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 589 - 598, 2008.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19. ed. Washington: APHA, 1995

BARRERA, Paulo. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. São Paulo: Ícone, 1993, p. 11.

BENGTSSON, S. et al. **Acidogenic fermentation of industrial wastewaters: Effects of chemostat retention time and pH on volatile fatty acids production**. Biochemical Engineering Journal, 40:492, 2008.

BGS EQUIPAMENTOS PARA BIOGÁS. **História do biogás**. Disponível em < <https://www.bgsequipamentos.com.br/historia-do-biogas/> >. Acesso em 08 de Maio de 2019.

BITTON, G. **Wastewater microbiology**. Willey Liss Inc. 3 ed. New York, p.763, 2005.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 abr. 2012.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº 8, de 30 de janeiro de 2015. Estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015, parte integrante desta Resolução. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 de fev. 2015.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 05 de Janeiro de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 01 jan. 2007.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº430, de 13 de Maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011.

BOLETIM ENFOQUE. **Biodigestor “PE”, fonte alternativa energética e de biofertilizante.** 3. ed. Recife, 1999.

BOUALLAGUI, H; LAHDHEB, H; BEN, R. E; RACHDI, B; HAMDI, M. **Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition.** Journal of Environmental Management, Londres, v. 90, n. 5, p. 1844–1849, 2009.

C. Sawatdenarunat, K.C. Surendra, D. Takara, H. Oechsner, S.K. Khanal. **Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: challenges and opportunities,** Bioresour. Technol. 178 (2015) 178-186.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios.** 2.ed. Belo Horizonte: departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 5), 380 p., 2007.

CLASSEN, P.A.M; LIER, J.B.; STAMRS, A.J.M. **"Utilization of biomass for supply of energy carrier"**. Applied microbiology and biotechnology, v.52, p.741-755, 1999.

CÔTÉ, C; MASSE, D. I. QUESSY, S. **Reduction of indicator and pathogenic microorganisms by psychrophilic anaerobic digestion in swine slurries.** Bioresources Technology, v. 97, p 686-691, 2006.

DIAS, J. A.; MORAES FILHO, A. M. **Os resíduos sólidos e a responsabilidade ambiental pós-consumo.** 1ª ed. 93 p. Marília, 2006.

DEGANUTTI, Roberto, PALHACI, Maria do Carmo Jampaulo Plácido, ROSSI, Marco *et al.* **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100031&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 22 Set. 2016.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Pesquisa Comprova Eficiência Econômica de Biogás na Pecuária de Leite.** Mar. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/41719708/pesquisa-comprova-eficiencia-economica-de-biogas-na-pecuaria-de-leite> > Acesso em: 17 de Jun. 2019

ELSESHBISHY, E.; NAKHLA, G.; HAFEZ, H. **Biochemical methane potential (BMP) of food wast and primary sludge: influence os inoculum pré-incubation and inoculum source.** Bioresource Technology, v. 110p. 18, 2012. ISSN 0960-8524

EPE – Empresa Brasileira de Pesquisa Energética. **O Potencial do Biogás: Oportunidades e Desafios**. Fórum Brasileiro de Biogás e Biometano. Foz do Iguaçu, PR, Jun. 2018 disponível em < http://epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/EPE_Jos%C3%A9%20Mauro_Potencial%20do%20Biog%C3%A1s_06jun.pdf >. Acesso em: 17 Jun. 2019.

FILHO, L. F. B., **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 2005, Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A.C.; ZAIAT, M & CAVALCANTI, P.F.F. **Fundamentos do tratamento anaeróbio**. In Campos, J. R. (org). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: PROSAB, . p29-52. 1999.

FRIAS, J. F. **Proposta de um biodigestor para a geração de energia a partir de resíduos orgânicos do restaurante universitário – Campus A. C. Simões**. 2016. 66f. Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2016.

GASPAR, Rita Maria Bedran Leme. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor**, dissertação. Um estudo de caso na região de Toledo-PR, 2003.

GERARDI, M. H. **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. Nova Jersey: Wiley Interscience, 2003.

GOLDMEIER, Valtemir; JABLONSKI, André. **Gestão Pública Municipal**. Novo Hamburgo: [S.ed.], 2005.

GOMES, L. P. **Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários**, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010. 219 p. ISBN 978-85-240-4136-5

JORGE, L., H., A.; OMENA, E. Biodigestor. Dossiê Técnico. SENAI/ AM- Escola SENAI Antônio Simões. Março, 2012.

OLIVER, A. P. M. Manual de Treinamento em Biodigestão. Instituto de Estudos Del Hambre. 2008 Disponível em <http://www.ieham.org/html/docs/Manual_Biodigestao.pdf> Acesso em: 20 jun. 2015.

JUNIOR, A. B. C. – **Simulação do comportamento de um resíduo modelo em aterro sanitário e estudo da evolução bio-físico-química**, 2000.

JULIATTO D.L; CALVO, M.J; CARDOSO, T.E. **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos para Instituições Públicas de Ensino Superior**. Gestão Universitária na América Latina – GUAL, Florianópolis, v. 4, n. 3, p.170-193, 2011

LABIB, F. ET al. **Anaerobic butyrate degradation fluidized-bed reactor. Effects os increased concentrations of H₂ and acetate.** Environ. Sci. Technol., 26:369, 1992.

LEITE, V.D.; POVINELLI, J. **Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 3, n.2, p.229-232, 1999, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, 1999.

LEITE, V.D; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD. S.; Silva, S. A. **Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos.** Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 13:190, 2009.

LIMA, S. M. S; **Qualidade sanitária e produção de alface irrigada com esgoto doméstico tratado.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9 (Suplemento), p 21-25, 2005, Campina Grande, PB, DEAg, UFGC, 2005.

LIMA, N. C. **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.** Universidade Federal do Ceará Dissertação de mestrado.140 p, 2015.

LUCENA, T. V. **Avaliação da geração de biogás sob diferentes condições de biodegradação de resíduos alimentares.** 2016. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

MARTINS, K. A. **Atividade metanogênica da fração orgânica de resíduos sólidos gerados em um restaurante universitário.** 2017. 66f. Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2017.

MAGALHÃES, G. V. V. **Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real,** 2018, Tese (doutorado em Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: treatment, disposal, reuse.** 3 ed. New York: McGraw-Hill, p. 1335, 1991.

MOURA, J.P. **Fundamentos de implantação de biodigestores em áreas rurais.** Revista Educação Ambiental em Ação. Disponível em: <<http://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=1248>>. Acesso em 11 de fev. 2017.

KATO, M. T., NETO, C. O. A., CHERNICHARO C.A.L; FORESTI, E., CYBIS, L. F. **Configurações de reatores anaeróbios;** In: **Campos (Coord.) Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo;** Finep, CNPq & Caixa; PROSAB, ed. Rima-São Carlos-SP, 1999. cap. 3, p 155-198.

Mata-Alvarez, J., Mace, S. e Llabrés, P. (2000) **Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview** of research achievements and perspectives. Bioresource Technology, 74, (1), pp. 3-16.

OLIVEIRA, P.A.V. **Produção e aproveitamento do biogás**. In OLIVEIRA, P.A.V. ET al. Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: Manual de boas práticas. Concórdia: Gestão Integrada de Ativos Ambientais, 2004. Cap. 4, p. 42-55.

PECORA, V., **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Pereira, R. H., “Geração Distribuída de Energia Elétrica – Aplicação de Motores Bicomcombustível Diesel/Gás Natural”, In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador – BA, 2005.

PINTO, Cláudio Plaza. **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável**. Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, 147p. Campinas, 1999.

QUARMBY, J., Forster, C. F. **An examination of the structure of uasb granules**, Water Science Tech., 29, 2449-2454., 1995.

RUIZ, R. L.. **Microbiologia Zootécnica**. São Paulo: Roca, 314 p. 1992.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnica-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**, 2007. 249 f. Tese (Doutorado em Eng. Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2007.

SARAVANAN, V.; SREEKRISHNAN, T.R. **Modelling anaerobic biofilm reactors-A review**. Journal of Environmental Management, v. 81, p-1-18, 2006.

SGANZERLA, Edílio. **Biodigestores: uma solução**. Porto Alegre. Agropecuária, 1983.

SIEGERT, I; BANKS, C. **The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors**. Process Biochemistry v.40, p.3412-3418, 2005.

Souza, S. N. M.; Pereira, W. C.; Nogueira, C. E. C. - A. A. Pavan & A. Sordi, “**Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura**”, Acta Scientiarum, v.26, n. 2, p. 127-133, 2004.

SOARES, R. C.; DA SILVA, S. R. C. M. **Evolução Histórica do Uso de Biogás como Combustível**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFT: Cuiabá, 2010.

SPERLING, V. M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243p.

TURDERA, M. V., YURA, D. **Estudo da viabilidade econômica de um biodigestor no município de dourados.** UEMS. Evento: Agrener 2006.

TRANSOLIVEIRA. Disponível em <<http://www.transoliveira.com.br/gas/produtos/>>. Acesso em: 25 de Abril de 2019.

Van Haandel, A. C., Cavalcanti, P. F. F. **Melhoramento do desempenho e aumento da aplicabilidade de lagoas de estabilização através de pré-tratamento anaeróbio em um DAFA,** Dept. of Civil Engineering - UFPB, Campina Grande - Brazil, Rel. Int. n/Publicado, 1995.

Verma, S. **Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes.** Master's Thesis. Department of Earth & Environmental Engineering. Fu Foundation School of Engineering & Applied Science. Columbia University, 2002.

VANDEVIVERE, P; DE BAERE, L.; VERSTRAETE, W. **Types of anaerobic digesters for solid wastes. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes.** London, IWA Publishing, 2002.

UBALUA, A.O. Cassava wastes: **treatment options and value addition alternatives.** African Journal of Biotechnology, v. 6, n. 18, p. 2065 - 2073, Sept. 2007.