



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



ARTURO DIAS DA CRUZ

PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO MACRÓFITAS AQUÁTICAS

JOÃO PESSOA- PB

2020

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO

ARTURO DIAS DA CRUZ

PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO MACRÓFITAS AQUÁTICAS

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora

Prof.^a. Dr.^a Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes

Co - Orientadora

Prof.^a. Dr.^a Silvia Layara Floriani Andersen

JOÃO PESSOA - PB

2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C957p Cruz, Arturo Dias da.

PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO MACRÓFITAS AQUÁTICAS /
Arturo Dias da Cruz. - João Pessoa, 2020.

56 f. : il.

Orientação: Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes
Lopes.

Coorientação: Silvia Layara Floriani Andersen Andersen.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Metano. 2. Energia Renovável. 3. Digestão Anaeróbia.
I. Lopes, Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes. II.
Andersen, Silvia Layara Floriani Andersen. III. Título.

UFPB/BC

ARTURO DIAS DA CRUZ

PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO MACRÓFITAS AQUÁTICAS

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 27 de Fevereiro de 2020.



Prof. Dra. Marta Célia Dantas Silva
Examinador Interno



Prof. Dra. Sayonara Andrade Eliziário
Examinador Externo



Prof. Dra. Silvia Layara Floriani Andersen
Coorientadora



Prof. Dra. Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes
Orientadora

JOÃO PESSOA – PB
2020

“Dedico o trabalho à minha Mãe e Tia-Mãe.”

Agradecimentos

À minha Mãe e Tia-Mãe, porque sem vocês não conseguiria ter a força de batalhar sempre pelos meus sonhos.

Ao meu Amigo Everton Belo, por mais uma vez ser um tutor a respeito da vivência diária com macrófitas aquáticas.

À Diretoria de estudos e pesquisas DIEP/SEMAM pelos conselhos, conversas, e todo suporte dado a realização deste trabalho.

Ao Elson e ao Laboratório de Saneamento e Laboratório de análises químicas e ambientais da UFPB, que me ajudou em toda parte experimental par realização deste trabalho.

À minha orientadora e coorientadora, principalmente pela paciência e suporte dado para toda realização deste trabalho.

Às professoras Marta, Sayonara e Joelda, pelas conversas, conselhos, e todas as contribuições diretas e indiretas para realização deste trabalho.

Aos meus amigos de mestrado, Isaac, Ingrid, Maria Luiza, Nyara, Daniel, Alex, Laura, Renner, que não só acompanharam todo desenrolar desse estudo como aguentaram horas de conversas, ligações, mensagens súbitas com dúvidas.

Aos meus amigos de vida Mayara, Marielle, Arthur, Isis , Tainá, Niaranjan, Romulo, Klanderson, Alessandro, Adriano Yuri, Helida e a todos os outros que participaram direta ou indiretamente para realização dessa atividade, seja com incentivos, escutas entre todas as demais ferramentas de suportes dadas, e com todo carinho com o qual se dedicaram.

“O filhote nunca vira o homem, mas possuía um instinto a respeito do homem. De maneira vaga, reconhecia no homem o animal que conquistara pela luta a primazia sobre os outros animais da Floresta. Não era apenas com os seus próprios olhos, mas também com os olhos de seus antepassados que o filhote agora fitava o homem – com olhos que tinham circulado na escuridão ao redor de inumeráveis acampamentos perto do fogo no inverno, que tinham espiado de distâncias seguras e do centro de matagais o estranho animal de duas pernas que era senhor sobre as coisas vivas.”

Jack London – Caninos Brancos

RESUMO

O estudo das macrófitas aquáticas e sua utilização como substrato, traça um caminho entre uso múltiplo, constantemente estudado acerca desses vegetais, e a sua utilização como substrato para a produção de biogás. Dessa forma, como objetivo o presente trabalho faz uma investigação acerca do uso das macrófitas aquáticas, *Egeria densa*, *Spirodela intermedia*, *Salvinia auriculata*, *Ludwigia helminorrhiza* e *Salvinia mínima*, como substrato para produção de biogás. As espécies foram coletadas no município de Santa Rita /PB e cultivadas em tanques de 500 L para avaliar seu crescimento, e em seguida colocadas em biodigestores de batelada em escala laboratorial afim de avaliar sua produção em temperatura constante e controlada de 35 °C por um tempo de detenção hidráulica de 5 dias. Dos resultados obtidos acerca do crescimento foi possível constatar um ganho de biomassa em todas as espécies avaliadas tendo em média seu crescimento por dia: 3,51% para *Salvinia auriculata*, 2,46% para *Salvinia mínima*, 0,87% para *Ludwigia helminorrhiza*, 0,61% para *Spirodela intermedia* e 0,37% para *Egeria densa*, já a produção de biogás pela *Egeria densa* de 225 ml, *Spirodela intermedia* com 153 ml, *Salvinia auriculata* com 110 ml, *Ludwigia helminorrhiza* com 100 ml e *Salvinia mínima* com 71 ml. Também foi possível constatar um aumento significativo nas análises da demanda química de oxigênio, condutividade elétrica e pH, com os resultados coletados foi possível concluir que as espécies estudadas são viáveis à produção de biogás como substrato.

PALAVRAS CHAVE: Metano, Energia Renovável, Digestão Anaeróbia.

ABSTRACT

The study of aquatic macrophytes, and their use as a substrate, traces a path between multiple use constantly studied around these plants and their use as a substrate for the production of biogas, so as an objective the present work makes an investigation about the use of aquatic macrophytes, *Egeria densa*, *Spirodela intermedia*, *Salvinia auriculata*, *Ludwigia helminorrhiza* and *Salvinia minima*, as a substrate for biogas production, the species were collected in the municipality of Santa Rita / PB and grown in 500 L tanks to evaluate their growth and in then placed in batch biodigesters on a laboratory scale in order to evaluate their production at a constant and controlled temperature of 35 ° C for a hydraulic detention time of 5 days. From the results obtained about the growth it was possible to verify a biomass gain in all the evaluated species having on average their growth per day 3.51% for *Salvinia auriculata*, 2.46% for *Salvinia minima*, 0.87% for *Ludwigia helminorrhiza*, 0 , 61% for *Spirodela intermedia* and 0.37% for *Egeria densa*, whereas the production of biogas by *Egeria densa* of 225 ml, *Spirodela intermedia* with 153 ml, *Salvinia auriculata* with 110 ml, *Ludwigia helminorrhiza* with 100 ml and *Salvinia minimum* with 71 ml , it was also possible to verify a significant increase in the analysis of chemical oxygen demand, electrical conductivity and pH, with the collected results it was possible to conclude that the studied species are viable the production of biogas as substrate.

Keywords: Biomass, Methane, Renewable Energy, Anaerobic Digestion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Rotas tecnológicas de conversão da biomassa.....	17
Figura 2. Balanço Energético Nacional – 2019.....	20
Figura 3. Esquema de digestão anaeróbia, mostrando a ação de bactérias na degradação da matéria orgânica.....	22
Figura 4. Biodigestores A, indiano e B Chinês.....	24
Figura 5. Formas biológicas de Macrófitas Aquáticas.....	31
Figura 6. Exemplar de Spirodela intermedia W. KOCH.....	32
Figura 7. Exemplar de Salvinia mínima Bak.....	33
Figura 8. Exemplar de Salvinia auriculata.....	34
Figura 9. Exemplar de Egeria densa.....	35
Figura 10. Exemplar de Ludwigia helminthorrhiza Hara.....	36
Figura 11. Mapa temático, pontos de coleta das Macrófitas Aquáticas.....	37
Figura 12. Desenho em escala 1:1 da medição da produção biogás com filtro.....	38
Figura 13. Ganho de Biomassa das macrófitas aquáticas.....	40
Figura 14. Variação de pH do cultivo em 120 dias.....	42
Figura 15. Produção de biogás pelas macrófitas.....	43
Figura 16. Condutividade elétrica, período de 5 dias de biodigestão.....	46
Figura 17. pH, período de 5 dias de biodigestão.....	47
Figura 18. Demanda Química de oxigênio (DQO), período de 5 dias de biodigestão.....	48
Figura 19. Análise de DQO da SPI = Spirodela intermedia, após 5 e 30 dias de tempo de retenção hidráulica.....	49

Figura 20. Produção de Biogás da SPI = Spirodela intermedia, após 5 e 30 dias de tempo de digestão Anaeróbia.....49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Origem da Biomassa.....	16
Tabela 2- Conceito das principais rotas de conversão da biomassa.....	18
Tabela 3 – Composição media das substancias presentes no biogás.....	22
Tabela 4- Temperatura mínima e máxima relativa ao período de cultivo.....	38
Tabela 5 – Produção de Biogás com Macrófitas aquáticas.....	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MME	Ministério de Minas e energia
EPE	Empresa Pesquisas Energéticas
BEN	Balanco Energético Nacional
DQO	Demanda Química de oxigênio
pH	Potencial Hidrogeniônico
CE	Condutividade Elétrica
SPI	<i>Spirodela intermedia</i>
LUD	<i>Ludwigia helmintorrhiza</i>
SM	<i>Salvinia mínima</i>
SA	<i>Salvinia ariculata</i>
EG	<i>Egeria densa</i>
SDT	Sólidos Dissolvíveis Totais
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SVT	Sólidos suspensos totais
SSF	Sólidos suspensos fixos
SSV	Sólidos suspensos voláteis
SDF	Sólidos dissolvidos fixos
SVD	Sólidos dissolvidos Voláteis
SV	Sólidos Voláteis
COT	Carbono orgânico
ST	Sólidos Totais
LABSAM	Laboratório de Saneamento
LABMAQ	Laboratório de Materiais e Química Ambiental
NBR	Normas Técnicas Brasileiras

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO GERAL	16
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. REFERENCIAL TEÓRICO	16
4.1 Biomassa e Energia	16
4.1.1 Biomassa Lignocelulósica	20
4.2 Biogás	20
4.2.1 Biodigestores	24
4.2.2 Parâmetros físicos e químicos	25
4.3 Macrófitas Aquáticas	29
4.3.1 <i>Spirodela intermedia</i> W. KOCH	32
4.3.2 <i>Salvinia mínima</i> Bak.	33
4.3.3 <i>Salvinia auriculata</i>	34
4.3.4 <i>Egeria densa</i>	35
4.3.5 <i>Ludwigia helminthorrhiza</i> Hara.	35
5. METODOLOGIA	37
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
6.1 Aumento de biomassa das macrófitas aquáticas.	40
6.2 Produção de biogás	43
6.3 Parâmetros Avaliados	45
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	51
REFERENCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

Conforme a civilização se expande, modificam-se os hábitos, crescem as cidades e para sustentar esse crescimento, foram sendo descobertas novas formas de energia. Assim inventamos máquinas e equipamentos para utiliza-las, como o carvão, as caldeiras de vapor, a eletricidade e até as fontes químicas totalmente manipuladas pelo homem, como o caso da Pólvora. O combustível do qual o homem mais depende nos dias atuais é o petróleo, que fora descoberto há mais de 150 anos como fonte de energia poderosa e barata. Neste pouco mais de um século, o petróleo passou a tomar altas proporções sendo utilizado de variantes formas tais como de máquinas, automóveis, aviões, como também sua utilização para produção de plásticos, borracha, tintas, adubos, inseticida e até mesmo o asfalto. Ao lado dessa imensa utilidade, o petróleo é uma fonte de energia não-renovável, e suas jazidas existentes no subsolo demoraram milhares de anos para se formar, graças a esse fator o seu uso incontrolado passou a provocar sérios transtornos ambientais, como o aumento excessivo do gás carbônico lançado na atmosfera decorrente dos derivados do petróleo, um dos principais fatores responsáveis pelo “efeito estufa”, ou seja aumento da temperatura terrestre (BARREIRA, 2011).

Dessa forma fez-se necessário a busca de alternativas energéticas sustentáveis visando atender a demanda crescente de energia no âmbito mundial. Muitas alternativas surgiram como solução deste problema, dando-se destaque a energia solar, a energia eólica, a energia proveniente da biomassa. Das opções de energias renováveis a biomassa por sua vez é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis, da biomassa é possível obter energia elétrica e biocombustíveis (ANEEL, 2008).

Dos biocombustíveis derivados através dos processos de conversão da biomassa, o biogás vem ganhando bastante destaque no Brasil, fatores como extensão territorial, localização em região tropical e chuvosa o que confere uma grande produção de biomassa além de uma grande biodiversidade.

Outro fator relevante é que 57,41% dos resíduos são constituídos por materiais orgânicos, que estocando grande parte da energia produzida por processos fotossintéticos, tal

energia é liberada naturalmente através da sua decomposição, tendo em vista essa possibilidade, vários projetos têm sido desenvolvidos buscando viabilizar o uso dessa matéria orgânica na utilização do biogás, como fonte de energia (TEXEIRA JUNIOR, 2016),

Apesar desse potencial e dos sinais de crescimento do setor, ainda há barreiras para a expansão do uso biogás no Brasil, da mesma forma que ocorre com outras fontes renováveis de energia. Essas dificuldades são de diferentes naturezas, desde de regulatórias à falta de conhecimento, econômicas, financeiras e políticas. Dentre essas, a disponibilidade de tecnologias para produção e aproveitamento energético do biogás referem-se à pouca disponibilidade de tecnologias nacionais eficientes e adaptadas aos diversos tipos de projetos de biogás. (MARIANI, 2018).

O biogás não é apenas uma fonte de energia, mas um mobilizador de desenvolvimento regional, pois pode ser produzido com substratos provenientes de diversas atividades produtivas e locais, como a agropecuária, indústria, aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes (COIMBRA-ARAÚJO et al., 2014).

Dentre as viabilidades de substratos a serem utilizados na produção de biogás , as macrófitas aquáticas, vem sendo constantemente utilizadas principalmente pelo seu uso múltiplo. Dessa forma diversos estudos têm sido publicados sobre os diferentes papéis ecológicos que as macrófitas aquáticas exercem tais como, a importância na ciclagem de nutrientes, na manutenção da funcionalidade de ambientes alagados e rios, servindo como nicho para abrigo e fonte alimentar de peixes (LU *et al.*, 2018), no uso sustentável para o tratamento de águas residuais, que vem apresentando resultados satisfatórios na remoção de nutrientes, (SILVA, *et al.*, 2019), no uso como bioindicadores de qualidade de água, piscicultura ornamental e de produção de alimentos. Sendo assim, a cooperação desses usos e a produção de energia oferecem novas perspectivas acerca da produção de bioenergia, utilizando-se essas espécies para produção de biogás.

Portanto o estudo das macrófitas aquáticas, e sua utilização como substrato, traça um caminho entre uso múltiplo, constantemente estudado acerca desses vegetais e a sua utilização como substrato para a produção de biogás. Assim, de maneira sustentável é possível proporcionar a facilitação nas barreiras econômicas, visto que a disponibilidade dessa biomassa se encontra abundante por todo território nacional, dessa forma o presente estudo tem como importância social e acadêmica a investigação da viabilidade de utilização da

biomassa de macrófitas aquáticas livres, nativas como substrato para produção de biogás, investigando assim a sua viabilidade no uso como substrato.

2. OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho foi avaliar a viabilidade de produção de biogás utilizando macrófitas aquáticas livres como substrato em um biodigestor de bancada.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o aumento de biomassa das macrófitas aquáticas;
- Quantificar a produção de biogás
- Avaliar a demanda química de oxigênio, condutividade elétrica, Ph e Teor de sólidos, durante processo de biodigestão

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Biomassa e Energia

A Biomassa é matéria orgânica que pode ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. Quando destinada ao aproveitamento energético, é uma fonte primária de energia não fóssil, que consiste em matéria orgânica de origem animal ou vegetal, contendo energia armazenada sob a forma de energia química (EPE, 2018).

Na tabela 1, encontram-se descritos os seus conceitos básicos. Os derivados obtidos dependem tanto da matéria prima utilizada, cujo potencial energético varia de tipo para tipo, quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos.

Tabela 1 - Origem e conceito básico da biomassa.

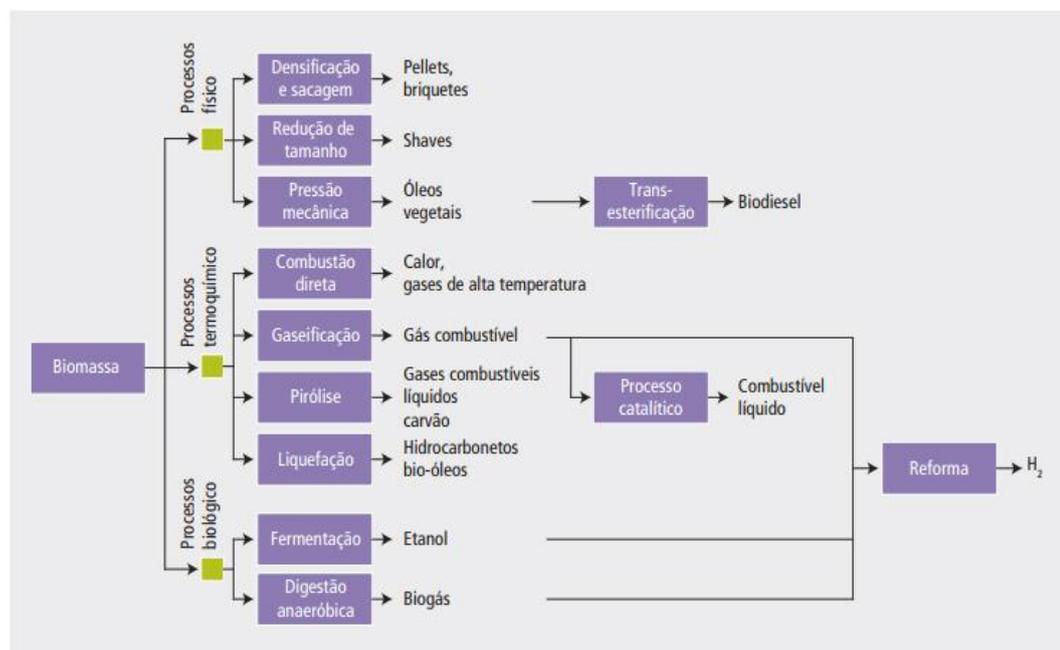
Origem	Conceito
Florestal	Constituídos por todo o material, resultante da coleta de madeira e pela serragem e asparas produzidas no processamento da madeira.
Agrícola	São produzidos no campo, resultantes das atividades de colheita dos produtos, são constituídos basicamente por palha, caule e folhas.
Urbanos	Obtidos através de resíduos domiciliares e comerciais, o teor de matéria orgânica do lixo brasileiro possui 60%.

Industriais	Obtido através dos rejeitos provenientes do beneficiamento dos produtos agrícolas e florestais, o uso do carvão vegetal no setor siderúrgico de ferro-gusa e aço e do gás de alto forno a carvão vegetal.
Animais	Determinados pela capacidade de produção de excrementos das criações mais importantes, essa produção varia de acordo com as práticas culturais.

Fonte: CORTEZ; LORA e GOMEZ, (2008).

As várias rotas de conversão empregadas na transformação da biomassa podem depender das suas características de origem e da finalidade para a qual será destinada, principalmente suas propriedades físico, químicas e energéticas, figura 1.

Figura 1. Rotas tecnológicas de conversão da biomassa.



Fonte: MME:EPE, 2007.

As tecnologias de conversão da biomassa, denominadas rotas tecnológicas, podem ser classificadas em três tipos: termoquímica, que compreende a combustão direta, carvoejamento, torrefação, pirólise e gaseificação; a físico-química, que compreende prensagem, extração e esterificação; e a bioquímica, que compreende a digestão anaeróbia, fermentação e a hidrólise. Tendo assim como produto final energético a geração de calor, eletricidade ou seu uso como combustível (ROCHA, 2011).

Apesar da variabilidade dos processos de conversão energética da biomassa, há também uma grande complexidade tecnológica envolvida na maioria dos processos de conversão, limitando seu uso. Tradicionalmente a obtenção de energia através da biomassa se dá pela combustão da matéria orgânica, porém esse processo apresenta o inconveniente de produzir grandes emissões gasosas que contribuem para o aumento do efeito estufa e de material particulado no ar, exigindo assim incentivos à tecnologia para mitigação desses impactos gerados pela queima (TEIXEIRA JUNIOR, 2016).

De acordo com Plano Nacional de Energia 2030(MME:EPE,2007), as principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa são descritas na tabela 2 a seguir:

Tabela 2, conceito das principais rotas tecnológicas de conversão da biomassa.

Conversão de biomassa	Conceito
Combustão direta	É a transformação da energia química dos combustíveis em calor, por meio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. Para fins energéticos, a combustão direta ocorre essencialmente em fogões (cocção de alimentos), fornos (metalurgia) e caldeiras (geração de vapor).
Gaseificação	É um processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica.
Pirólise ou Carbonização	É o mais simples e mais antigo processo de conversão de um combustível em outro de melhor qualidade e conteúdo energético. O processo consiste em aquecer o material original (normalmente entre 300°C e 500°C), na “quase-ausência” de ar, até que o material volátil seja retirado.
Digestão anaeróbia	Ocorre na ausência de ar, mas, nesse caso, o processo consiste na decomposição do material pela ação de bactérias (microrganismos acidogênicos e metanogênicos). Em termos energéticos, o produto final é o biogás.
Fermentação	É um processo biológico anaeróbio em que os açúcares de plantas como a batata, o milho, a beterraba e, principalmente, a cana de açúcar são convertidos em álcool, por meio da ação de microrganismos.

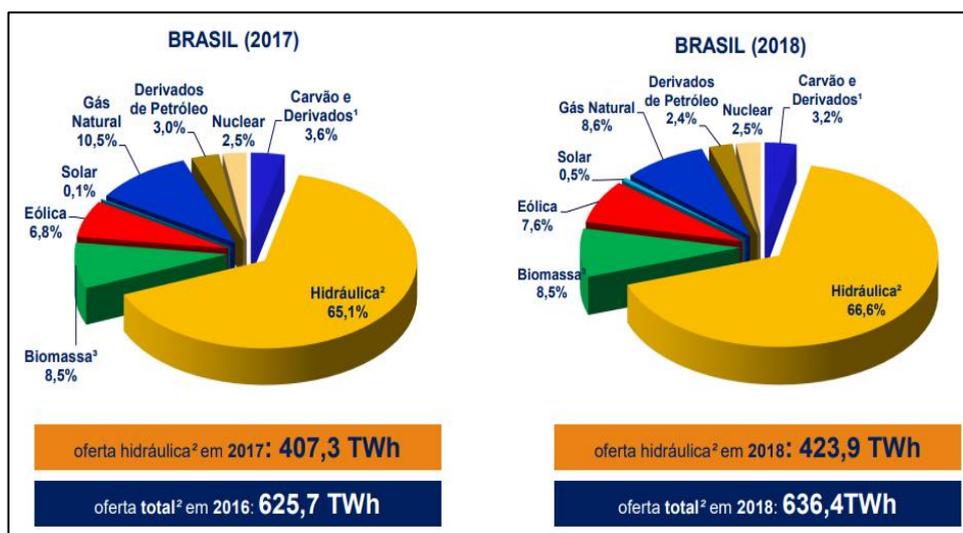
Transesterificação	É um processo químico que consiste na reação de óleos vegetais com um produto intermediário ativo (metóxido ou etóxido), oriundo da reação entre álcoois (metanol ou etanol) e uma base (hidróxido de sódio ou de potássio).
--------------------	--

Fonte: Adaptado de EPE, 2007.

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento para o mercado internacional e interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (BRASIL, 2008), além de ser uma matéria-prima de baixo custo e rápido acesso que armazena grande quantidade de energia, carbono, oxigênio e hidrogênio, é uma das poucas fontes que pode facilitar a produção de energia em grande escala e de forma sustentável para apoiar o desenvolvimento da sociedade. (MARAFON *et al.*, 2016).

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que corresponde a 65,1% da oferta interna. As fontes renováveis representam 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional e das importações, que são essencialmente de origem renovável. Na publicação do Balanço Energético Nacional de 2019 (BEN), figura 3, a biomassa surgiu representando 8,5% da Matriz Elétrica Brasileira, ficando atrás apenas da geração por hidrelétrica, no que diz respeito ao uso de energias alternativas (EPE, 2019).

Figura 2. Balanço Energético Nacional – 2019



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (Brasil), 2019.

Dentre as biomassas, as constituintes de material lignocelulósico são mais abundantes da biosfera, representando aproximadamente 60% da biomassa vegetal, e podem ser divididos em seis grupos principais: resíduos de colheitas (bagaço de cana, palha de milho etc.), madeira de lei (álamo alpino e álamo), madeira de conífera (pinheiro e abeto), resíduos celulósicos (lodo de papel e papel reciclado, jornais etc.), biomassas herbáceas e resíduos sólidos municipais (CARDONA E QUINTERO, 2010).

4.1.1 Biomassa Lignocelulósica

Esses materiais apresentam uma rede complexa e resistente composta principalmente por lignina (10% a 30%), hemicelulose (15% a 35%) e celulose (30% a 50%), sendo a concentração de cada um desses elementos variáveis de acordo com o tipo de matéria-prima em questão, idade e estágio vegetativo. O principal componente dos materiais lignocelulósicos é a celulose, que é um polissacarídeo formado por moléculas de glicose unidas através de ligações β -1,4-glicosídicas. Cadeias de celulose são estabilizadas e ligadas entre si por pontes de hidrogênio intra e intermoleculares, formando as fibrilas elementares, que contêm cerca de 36 cadeias justapostas e apresentam 3nm a 4nm de largura. Essas fibrilas são unidas umas às outras através da hemicelulose, que é o segundo mais abundante componente da lignocelulose, um polissacarídeo amorfo, composto por vários açúcares de cinco e seis carbonos, como arabinose, galactose, glicose, manose e xilose, além de desoxiaçúcares e ácidos urônicos. Essas estruturas são cobertas pela lignina, um polímero aromático formado por três estruturas básicas fenólicas, o álcool p-cumarílico, álcool coniferílico e o álcool sinapílico e seus derivados (RODRIGUES *et al.*, 2016).

Uma alternativa ambientalmente sustentável para uso destes resíduos é a geração de energia renovável via digestão anaeróbia para produção de metano. A produção a partir de material lignocelulósico é composta por três fases: pré-tratamento do material, digestão anaeróbia do hidrolisado e pós-tratamento da fração líquida. Alternativamente, as frações sólidas e líquidas são mantidas juntas e utilizadas como substrato para produção de Biogás. (COSTA *et al.*, 2014).

4.2 Biogás

O biogás é considerado um dos biocombustíveis mais promissores com potencial para mitigar, em certa medida, preocupações crescentes com combustíveis fósseis, referente à crise energética e às mudanças climáticas, e é uma mistura basicamente de metano (CH₄) e dióxido

de carbono (CO₂), que ao ser purificada, pode ser usada para geração de calor ou eletricidade.(AYALA-PARRA et al., 2017)

Atualmente, o principal método de produção de biogás é a decomposição biológica de material orgânico em ausência de oxigênio, conhecida como digestão anaeróbica (DA). As plantas de DA operam relativamente, permitindo que os microrganismos possam digerir a matéria orgânica em um reator controlado na ausência de oxigênio para produzir biogás que é de cerca de 50-85% de metano. Um processo semelhante acontece nos aterros quando o lixo orgânico se decompõe e produz o que é conhecido como gás de aterro, que é de cerca de 45% de metano (OIES - THE OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES, 2017).

A partir daí, o biogás pode ser melhorado por vários métodos (absorção, adsorção, filtração por membrana, separação criogênica), resultando em uma elevação da percentagem de metano e aproximando biogás ao gás natural fóssil, o que permite seu uso intercambiável (MILANEZ et al., 2018).

O biogás apresenta uma composição de gases que estão presentes em diferentes quantidades, dependendo principalmente da sua fonte de origem. De acordo com a Oies - *The Oxford Institute For Energy Studies*,(2017) a média de presença das substancias pode ser observado na tabela 3.

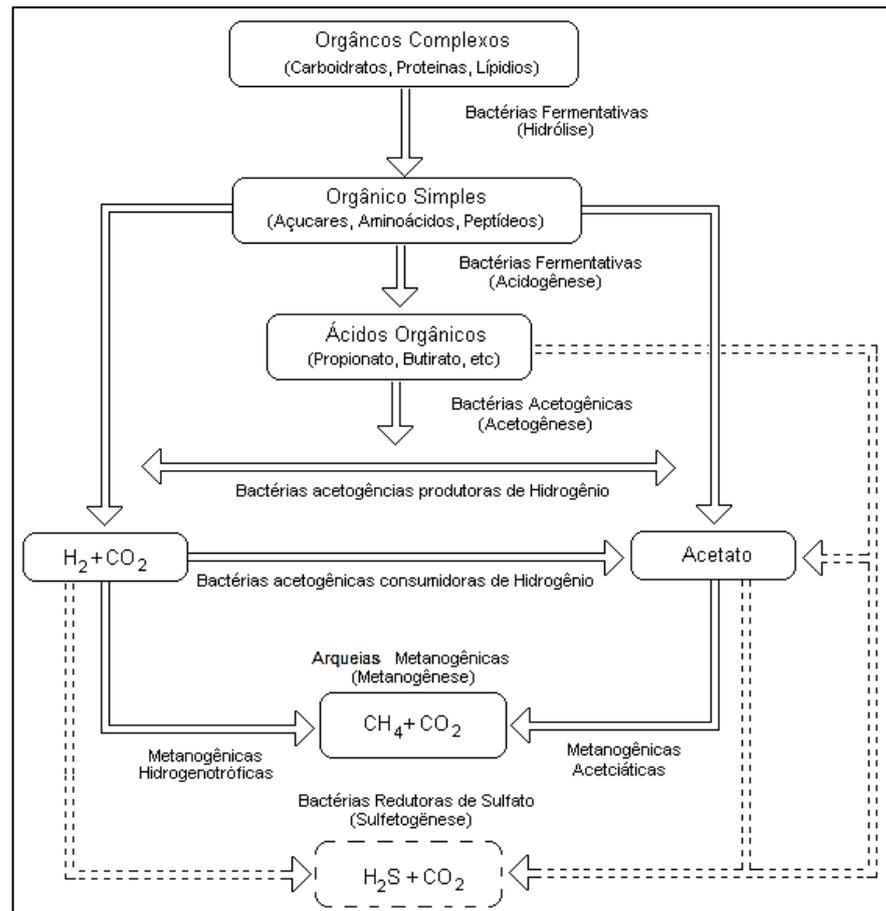
Tabela 3, composição média das substancias presente no biogás

Substância	% no biogás de fermentação anaeróbica
Metano	50%-85%
Dióxido de Carbono	15%-50%
Nitrogênio	0%-1%
Oxigênio	0,01%-1%
Hidrogênio	Traços
Amônia	Traços

Fonte: adaptado de OIES - *THE OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES*, 2017

De acordo com Chernicharo(2016), a digestão anaeróbia é composta de forma simplificada por quatro fases principais, podendo haver a inclusão de uma quinta fase, dependendo da composição química do substrato a ser tratado, figura 3, as fases são:

Figura 3. Esquema de digestão anaeróbia.



Fonte: Chernicharo, 2016.

1. **Hidrólise:** A hidrólise 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.
2. **Acidogênese:** os produtos solúveis oriundos da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, os quais são então excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. Como os ácidos graxos voláteis são os principais produtos dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas.
3. **Acetogênese:** as bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas.

Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato.

4. **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*
5. **Sulfetogênese:** a produção de sulfetos é um processo no qual o sulfato e outros compostos a base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Durante este processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de um grupo de microrganismos anaeróbios estritos, denominadas bactérias redutoras de sulfato (ou bactérias sulforedutoras).

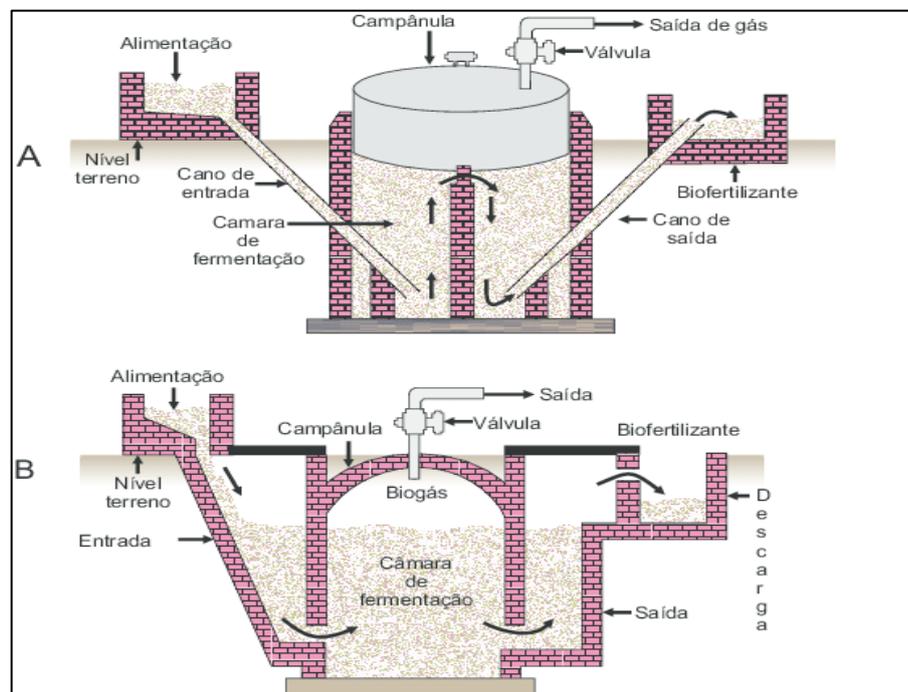
As principais fontes de produção de biogás em escala comercial no Brasil são: a parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU); rejeitos da produção de açúcar e etanol de cana, como vinhaça e torta de filtro; e dejetos da pecuária suína. Em menor escala, também são utilizados: resíduos da produção de alimentos em geral (amido de mandioca e suco de laranja, como exemplos mais comuns); descarte de restaurantes; dejetos da pecuária bovina e avícola; e efluentes sanitários (MILANEZ *et al.*, 2018).

Na prática, a produção de biogás é possível com a utilização de um equipamento denominado de biodigestor. O biodigestor constitui-se de uma câmara fechada onde é colocada a matéria orgânica que é fermentada anacronicamente, o biogás resultante é canalizado para ser empregado em vários usos. Existem vários modelos de biodigestores, os mais comumente usados no Brasil são os modelos Indiano e chinês (BARREIRA, 2011).

4.2.1 Biodigestores

Os biodigestores constituem uma tecnologia bem antiga, já conhecida e praticada pelos chineses e indianos, que conceberam os biodigestores para tratamento de esterco animal. Inicialmente esta tecnologia foi utilizada com a finalidade de geração do biofertilizante e somente mais tarde verificou-se a possibilidade de geração e aproveitamento do biogás como combustível. A concepção dos biodigestores modelos indiano e chinês está ilustrada na figura 4 (CASSINI, *et al.*, 2014).

Figura 4. Biodigestores A, indiano e B Chinês.



Fonte: Cassini, *et al.* (2014)

O biodigestor indiano caracteriza-se por possuir uma campânula como gasômetro, que pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação, ou em um selo d'água externo, e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. A função da parede divisória faz com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação, este modelo possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, aumentando o volume deste, portanto, mantendo a pressão no interior deste constante. O fato de o gasômetro estar disposto ou sobre o substrato ou sobre o selo d'água, reduz as perdas durante o processo de produção do gás (DEGANUTTI *et al.*, 2002).

O Modelo chinês é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria onde ocorre a fermentação, e apresenta um teto impermeável e abobado que é destinado ao armazenamento do biogás. O seu funcionamento é com base no princípio de prensa hidráulica, ocorrendo então aumentos de pressão em seu interior devido ao acúmulo de biogás resultando em deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída em sentido contrário quando ocorre descompressão. (JORGE & OMENA, 2012)

As maior diferença entre os dois modelos refere-se à cúpula do gasômetro, região onde fica armazenado o biogás gerado. O biodigestor indiano possui a cúpula móvel feita de metal, sua produtividade se dá por 150 a 300 l/m³ do volume do biodigestor ao dia, enquanto o biodigestor chinês possui a cúpula fixa de alvenaria e sua produtividade chega em torno de 400 a 600 l/m³ do seu volume por dia (BARREIRA, 2011).

Já o Biodigestor de batelada é composto por um sistema bastantes simples e de pequena exigência operacional, geralmente utilizado de forma caseira ou no uso para pesquisas, neste modelo o biodigestor a biomassa permanece nesse reservatório fechado até que o ciclo da digestão anaeróbio esteja completo ou seja, quando se tem o fim da produção de biogás indica que o ciclo está completo e o biodigestor está apto a receber uma nova carga de matéria orgânica. O biodigestor em batelada adapta-se melhor quando a disponibilidade de resíduo ocorre em períodos mais longos, como por exemplos em granjas avícolas de corte (JORGE E OMENA, 2012).

De maneira geral, a eficiência global do processo de digestão anaeróbia e os teores de metano no biogás dependem fundamentalmente das condições ambientais e operacionais nos reatores anaeróbios. Portanto, a qualidade do biogás está associada a diversos parâmetros (GUERI et al, 2017).

4.2.2 Parâmetros físicos e químicos

- **pH – Potencial Hidrogeniônico**

Na digestão anaeróbia cada grupo de bactérias possui seu ponto ideal de pH, nas fases da hidrólise e da acidogênese, o pH ideal fica em torno de 5,2 a 6,3. Já na acetogênese e metanogênese o pH ideal fica entre 6,5 a 8. Abaixo do pH crítico pode haver precipitação dos íons metálicos, bem como inibição da ação bacteriana, devido à produção de ácidos, visto que a parede celular bacteriana é mais permeável às moléculas não dissociadas em comparação

com suas formas ionizadas (Araújo, 2017). A mudança do pH do meio se manifesta de forma direta afetando a atividade das enzimas, como é o caso da alteração de suas estruturas proteicas. (SAKUMA, 2013).

A faixa de pH para o crescimento ideal das bactérias produtoras de metano está entre 6,6 e 7,4, muito embora seja possível conseguir-se uma estabilidade na formação de metano numa faixa mais ampla de pH, entre 6,0 e 8,0. Contudo, o pH ideal depende do tipo de microrganismo envolvido no processo de digestão, assim como do tipo de substrato a ser digerido (CHERNICHARO, 2007).

- **Temperatura**

A temperatura expressa à energia cinética das moléculas de um corpo, sendo seu gradiente o fenômeno responsável pela transferência de calor em um meio. A temperatura exerce influência importante na velocidade das reações químicas, nas atividades metabólicas dos organismos e na solubilidade de substâncias (FUNASA, 2014).

A temperatura tem uma grande influência na atividade enzimática dos microrganismos formadores de metano. A formação de metano pode ocorrer numa faixa bastante ampla, entre 0 °C e 97 °C, porém a porcentagem de metano na constituição do biogás é maior quando o processo de fermentação ocorre nas seguintes faixas de temperatura: 30 a 35 °C para mesófilas ou de 50 a 55 °C para termófilas. Embora sejam desejadas temperaturas mais elevadas para que se obtenha maior desenvolvimento da flora microbiana, o mais importante é a manutenção de uma temperatura uniforme dentro dos reatores, pois variações bruscas de temperatura podem provocar o desequilíbrio entre as populações microbianas envolvidas, com consequente falha no processo (CHERNICHARO, 2007).

Dessa forma, há uma grande influência da temperatura para digestão anaeróbia. A porcentagem de metano na constituição do biogás é maior quando o processo de fermentação ocorre em temperaturas mais elevadas, o que garante um maior poder calorífico à mistura. Assim, com o funcionamento na faixa de temperatura adequada, o biodigestor poderá ter seu volume diminuído pela metade ou menos, para o mesmo volume de gás produzido, representando economia de material na construção, ou caso seja desejável, apresentando uma maior produção de gás com um volume preestabelecido, a velocidade de digestão anaeróbica é maior a temperaturas termofílicas em relação às mesofílicas (ARAÚJO, 2017).

- **CE - Condutividade elétrica**

A condutividade elétrica (CE) da água indica a sua capacidade de transmitir a corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas, que se dissociam em ânions e cátions. A condutividade elétrica da água deve ser expressa em unidades de resistência (mho ou S) por unidade de comprimento (geralmente cm ou m). Em águas naturais apresentam teores de condutividade na faixa de 10 a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e em ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais os valores podem chegar a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (FUNASA, 2014).

Na digestão anaeróbia a importância na medição da condutividade elétrica, gera uma possibilidade de monitoramento à contínua solubilização de nutrientes para dentro do biodigestor, dessa forma resultados obtidos por Silva et al. (2012) no tratamento de biodigestão anaeróbia da vinhaça, apresentou maiores valores de condutividade elétrica no efluente em relação ao afluente. Segundo o autor, a condutividade elétrica está relacionada com a quantidade de íons dissolvidos durante a fase líquida, e o aumento da condutividade elétrica seria explicado pela digestão de uma matéria mais complexa em uma mais simples.

- **Teor de Sólidos**

O teor de sólidos define a quantidade de matéria orgânica presente no substrato com potencial para ser biometanizada pelos micro-organismos. O teor de sólidos é um parâmetro essencial para caracterização da matéria orgânica a ser biodigerida e está diretamente relacionado com a quantidade de água presente no substrato (excesso ou carência de água), sendo expressa em gramas por litro ou porcentagem (CHERNICHARO, 2007). Para Cortez; Lora e Gomez (2008), o teor de sólidos no processo de digestão anaeróbia afeta diretamente outros parâmetros físicos essenciais em um projeto de reator, como a densidade e a viscosidade do substrato. A variação desses parâmetros físicos tem reflexos diretos no comportamento fluidodinâmico e também na cinética do processo anaeróbio.

Segundo o “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*” (APHA, 2005), há nove frações diferentes de sólidos que podem ser quantificadas em uma amostra de substrato a ser biodigerido. Basicamente, diferem entre si pelas características de tamanho de partícula e volatilidade: sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV), sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos dissolvidos fixos (SDF) e sólidos dissolvidos voláteis (SDV).

É importante saber o teor de sólidos totais (ST) e de sólidos voláteis (SV) contidos no substrato, a fim de fornecer a carga orgânica ideal para o processo de biogás. Sólidos totais é o material que resta quando há a evaporação da água do substrato e sólidos voláteis especifica a parte orgânica da matéria seca (KARLSSON, 2014). Dessa forma, o anaeróbio decompõe somente a fração teoricamente orgânica do substrato, quanto maior a concentração de sólidos totais voláteis no substrato, que representa o teor de matéria orgânica biodegradável, maior será a taxa de bioconversão do resíduo (ROCHA, 2016).

As tecnologias comumente utilizadas para a digestão anaeróbia de resíduos sólidos diferenciam-se em digestão seca ($ST > 20\%$) e úmida ($ST < 15\%$) (PROBIOGÁS, 2015). Para Rocha (2016) como dito anteriormente, a porcentagem presente de sólidos totais no substrato que diferencia a digestão seca da digestão úmida, varia de acordo com a verificação de cada autor, mas sempre apresentando valores próximos.

A digestão úmida, em comparação à digestão seca, apresenta, em geral, maior taxa de produção de biogás e uma maior estabilidade do processo, além de um maior controle das emissões de metano e a possibilidade de se utilizar o material digerido na agricultura como fertilizante. Porém a digestão úmida requer que o substrato seja submetido a um pré-tratamento (umidificação) de modo que se atinja um teor de sólidos totais de 15%, além de uma homogeneização importante para a mistura e transporte pelo reator (PROBIOGÁS, 2015).

- **DQO – Demanda Química de oxigênio**

A demanda química de oxigênio (DQO) consiste em uma técnica utilizada para a avaliação do potencial de matéria redutora de uma amostra, por meio de um processo de oxidação da química em que se emprega o dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$). Nesse processo, o carbono orgânico de um carboidrato, por exemplo, é convertido em gás carbônico e em água, assim tornando um parâmetro indispensável nos estudos de caracterização de esgotos sanitários e efluentes industriais. (PIVELI E CAMPOS, 2013).

A DQO mede, indiretamente, os equivalentes redutores (elementos com baixo número de oxidação, ou seja, reduzidos) presentes na amostra em questão. Dessa forma, causará DQO a amostra que contiver substâncias orgânicas e/ou inorgânicas passíveis de oxidação pelo dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido. Se tratando de esgotos tipicamente domésticos, a fração orgânica, em geral, supera a fração inorgânica reduzida, e a DQO pode

ser utilizada, sem maiores problemas, para quantificar diretamente a matéria orgânica oxidável presente (Aquino *et al.*, 2006). Para Slorgon; Tavares e Bergamasco (2011) é monitorada como parâmetro de estabilização da matéria orgânica. Quanto maior sua eficiência de remoção, maior será a degradação do resíduo.

É importante ressaltar que a grandeza carbono orgânico (COT) muitas vezes na literatura é expressa como demanda química de oxigênio (DQO), que expressa a quantidade de matéria orgânica presente na amostra de forma indireta, contabilizando a necessidade de oxigênio para oxidação do carbono orgânico presente. Ainda, a relação entre as grandezas COT e DQO é função de fatores como a composição da matéria orgânica e a presença de compostos inorgânicos, que consomem oxigênio, na oxidação da matéria orgânica pelo método de DQO, o que pode não ocorrer em métodos de determinação de COT (KUNZ *et al.* 2019).

- **Substratos**

Por se tratar de um processo bioquímico realizado por milhares de bactérias, a eficiência da digestão anaeróbia pode ser seriamente afetada por fatores que estão relacionados com o meio ideal para sua atuação, considerando o tipo de substrato. (ARAÚJO, 2017).

Em relação aos diversos substratos utilizados na biodigestão anaeróbia, a biomassa aquática vem sendo amplamente estudada. Essas plantas oferecem certas vantagens, como não necessitar de fertilizantes e o uso de terras agrícolas, quando comparadas às plantas convencionalmente usadas para produção de energia, como milho, beterraba sacarina e grãos. Além disso, as plantas aquáticas não competem com as produzidas agrícolas alimentos para seres humanos ou alimentos para animais (MOELLER, 2018).

4.3 Macrófitas Aquáticas

Macrófitas aquáticas são todas as plantas cujas partes fotossinteticamente ativas estão o tempo todo, ou por alguns meses em cada ano, submersas em água ou flutuantes em sua superfície. As macrófitas, portanto, constituem uma importante comunidade de ecossistemas aquáticos; por sua abundância, alta produtividade e contribuição para a diversidade biológica, constantemente essas espécies de plantas proliferam-se de forma indesejada e prejudicam o uso múltiplo dos lagos, represas e rios, havendo necessidade de utilização de técnicas de controle. Mesmo com essa característica, algumas dessas plantas têm sido utilizadas em

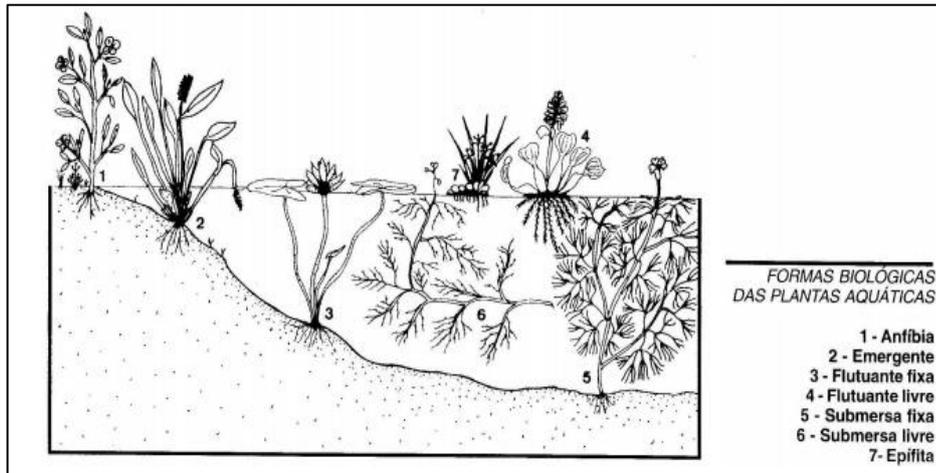
sistemas de tratamento de efluentes, na recuperação de ambientes degradados e também como plantas ornamentais (ANDRADE *et al.*, 2017).

As macrófitas aquáticas por constituírem uma das principais comunidades de ecossistemas aquáticos, por contribuírem para a diversidade biológica e por apresentarem elevada biomassa e alta produtividade, desempenhando importante papel no ciclo de nutrientes e fluxo de energia, capazes de estabelecer uma forte ligação entre o sistema aquático e o ambiente terrestre que o circunda. Entende-se que estes organismos assumam papel ainda mais importante em ecossistemas rasos, como as planícies de inundação, onde colonizam extensas áreas apresentando elevadas taxas de produção primária (TRINDADE *et al.* 2011).

Em rios e riachos influenciam na sedimentação e na retenção de nutrientes, nas características físicas e químicas da água e, em alguns casos, podem afetar a velocidade do fluxo da água, assim como também influenciam sobre o metabolismo dos ecossistemas límnicos continentais, pode ocorrer através da redução da turbulência da água pelas macrófitas, observando o chamado efeito de “filtro”, que compreende a sedimentação de grande parte do material de origem alóctone como também pelas raízes e rizomas que possui um papel no fluxo de energia do sedimento, conseqüentemente para a cadeia alimentar dos organismos bentônicos. Isto porque estas estruturas, além de apresentarem alta taxa de reciclagem, excretam grande quantidade de compostos orgânicos para o sedimento, que são utilizados principalmente pelas bactérias. (ESTEVES, 2011).

Segundo Irganget *al.* (1984) citado por Pott e Pott (2000), as macrófitas podem ser classificadas conforme a sua forma biológica (figura 5), quanto a sua relação com a superfície da água:

Figura 5. Formas biológicas de Macrófitas Aquáticas.



Fonte: Pott e Pott, 2000.

1. Anfíbia ou semiaquática: capaz de viver bem tanto em área alagada como fora da água, geralmente modificando a morfologia da fase aquática para a terrestre quando as águas baixam.
2. Emergentes: enraizada no fundo, parcialmente submersa e parcialmente fora d'água.
3. Flutuante fixa: enraizada no fundo, com caule e/ou ramos e/ou folhas flutuantes.
4. Flutuante livre: não enraizada no fundo, podendo ser levada pela correnteza, pelo vento ou até por animais.
5. Submersa fixa: enraizada no fundo, caule e folhas submersos, geralmente saindo somente a flor para fora d'água.
6. Submersa livre: não enraizada no fundo, totalmente submersa, geralmente emergindo somente as flores.
7. Epífita: que se instalam sobre outras plantas aquáticas.

O Aerênquima das macrófitas flutuantes forma um microambiente muito mais rico em oxigênio, que atrai peixes, e é substrato de alimento para alevinos, ainda pode-se dizer que as macrófitas são hospedeiras de perifitón, que é alimento de plâncton, ictioplâncton ou formas lavais de peixes, insetos aquáticos, moluscos e também fornecendo constantemente material orgânico para a cadeia de detritos, em que se reinicia a ciclagem de nutrientes, além da sua capacidade filtradora e despoluidora de águas (POTT E POTT, 2000). Outro importante fator sobre a aerênquima é que, em plantas aquáticas, o aerênquima desenvolve-se principalmente por desintegração de células, seguindo uma sequência de fatos: a deficiência de oxigênio promove a produção de etileno pelo estímulo anaeróbico, que causa um aumento na atividade

da celulase, que conduz a desintegração de células e o desenvolvimento de aerênquima. Neste caso, o aerênquima funciona como uma estratégia alternativa para a obtenção de O₂ (FAHN, 1982).

4.3.1 *Spirodela intermedia* W. KOCH

Spirodela intermedia, figura 6, em sua etimologia temos Spirodela pelo crescimento de forma espiralada e intermedia relativo ao número de raízes entre a *Spirodela polyrrhiza* e *Spirodela oligorrhiza*. Erva aquática flutuante livre, sua folha verde do lado superior repele água. Em sua utilização é ótimo filtro biológico para despoluição de água e para tratamento de esgotos. Forrageira para insetos caramujos, peixes e aves aquáticas, é considerada a planta de maior taxa de crescimento podendo duplicar sua biomassa a cada 3 dias, 1 hectare pode produzir proteína de alto valor equivalente a 60 ha de soja, contém 14% a 25% de proteína, potencial desperdiçado para alimentação humana. Fácil cultivo, podendo ser a meia sombra ou a sol pleno, propagação vegetativa e sensível a competição com outras flutuantes (POTT E POTT, 2000).

Figura 6. Exemplar de *Spirodela intermedia* W. KOCH.



Fonte: Autor

Encontrada geralmente em águas calmas sem muitos ventos, misturada a outras espécies de flutuantes, restrita a sub-região do Nabileque (solo férteis) e planície de inundação do Paraguai geralmente é referida como *S. polyrrhiza* no hemisfério norte e *S. punctata* no Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro. Sua distribuição é dada pela América do Sul, da Argentina à Venezuela, e no Brasil é de grande ocorrência no Acre e no Rio Grande do Sul (Pott e Pott, 2000).

Já seu aspecto morfológico, possui Frondes flutuantes, elíptico-circulares, aplanadas, assimétricas na base, com coloração verde, bordo liso, $4-7 \times 4-7\text{mm}$, 1-1,3 vezes mais longas que largas; até 7 frondes unidas entre si; papilas ausentes, 2 cavidades vegetativas laterais, cicatriz do estípite não vista; frondes senescentes com células de pigmentos castanhos; nervura ausente. Raiz 6-20 por fronde, 0,7-3,5cm comprimento película cilíndrica não vista, coifa pontiaguda, 0,8-1,3mm comprimento (Pereira, Pott e Temponi, 2016). Em mananciais e água parada possui a capacidade de cobrir toda superfície impedindo a passagem de luz (LORENZI, 2008).

4.3.2 *Salvinia mínima* Bak.

Salvinia mínima , figura 7, em sua etimologia Salvinia em homenagem ao professor italiano Salvini e mínima em relação a menor entre as Salvinias, erva aquática flutuante livre, com folha arredondada com aspecto de pé de galinha, pecíolo pequeno, raízes pinho-brilhosas castanho, saindo de um mesmo ponto, esporocarpos de 1mm ao longo do eixo, de abril a setembro. Sua diferença de pelos em relação a *Salvinia auriculata* se dá com pelos fechados na extremidade(POTT E POTT, 2000).

Figura 7. Exemplar de *Salvinia mínima* Bak.



Fonte: Autor

Ornamental, muito cultivada em ambientes naturais ou artificiais, conveniente para aquário, servindo de abrigo para alevinos, reprodução de peixes e construção de ninho de bolhas de peixes como *betta splendens*, suporta variação de pH e de fácil cultivo, pode ocorrer juntamente com *Salvinia auriculata* e a *Pistia stratiotes* L., frequente em lagoas e planícies de inundação.(POTT E POTT, 2000)

Sua distribuição é ampla nas Américas, nos Estados Unidos, do México ao Paraguai, Uruguai, Argentina e Brasil, em sua anatomia a epiderme de face abaxial da folha apresenta células com paredes anticlinais sinuosas presença de células suberosas, estômatos ausentes nesta face epidérmica, Tricomas tectores pluricelulares unisseriados (GUTERRES et al, 2008).

4.3.3 *Salvinia auriculata*

Salvinia auriculata, figura 8, em sua etimologia, Salvinia em homenagem ao professor italiano Salvinia e auriculata pela forma aurícula ou pequena orelha referente a folha, erva aquática flutuante livre, perene, com pelos unidos na extremidade em forma de pá de bateadeira que repelem a água, assim a superfície superior não se molha, suas raízes possuem formato de ancora ou U, e são folhas modificadas segurando a água como uma esponja, esporocarpos com pêndulos entre as raízes (POTT e POTT, 2000).

Figura 1. Exemplar de *Salvinia auriculata*.



Fonte: Autor

É uma samambaia e seus esporos maturam na seca de julho a outubro, em grande quantidade pode formar uma camada castanha na água, possui rápida proliferação. Ornamental, para aquário e jardins, útil na purificação e oxigenação da água, usada na desova de peixes e alevinos, e ninho de bolhas, além de servir de habitat para organismos aquáticos, inclusive na camuflagem de filhotes de jacaré, o cafezinho (*Jacana jacana*) faz seu delicado ninho sobre esta planta. Forrageira para capivara, insetos, caramujos, aves e peixes, contém 12% de proteína e serve como biofertilizante, cobertura horta em horta ou pomar (POTT E POTT, 2000). Nativa da América do Sul, pode formar grandes infestações que cobrem toda a

superfície da água, bloqueando a passagem de luz solar e inferindo no sistema aquático (LORENZI, 2008).

4.3.4 *Egeria densa*

A *Egeria densa*, figura 9, Planta aquática submersa, enraizada, livre e herbácea pouco ramificada, com flores solitárias brancas, de colmos foliosos de 30-90cm de comprimento, nativa da América do Sul, propaga-se através de fragmentação do caule e ocasionalmente por sementes. É considerada uma planta daninha aquática mediatamente frequentemente, infestando principalmente mananciais de água parada como lagoas, represas e pequenos tanques de criação de peixes, por ser uma planta muito usada em aquário, sua comercialização é a principal forma de disseminação e introdução em novas áreas, o aumento da eutrofização da água propicia grande desenvolvimento vegetativo dessa planta.(LORENZI, 2008).

Figura 9. Exemplar de *Egeria densa*.



Fonte: Autor

4.3.5 *Ludwigia helminthorrhiza* Hara.

Ludwigia helminthorrhiza, figura 10, em sua etimologia temos Ludwigia em homenagem a botânico alemão Ludwig e *Helminthorrhiza* que significa raiz com Helmintho, aspecto similar a lombrigas pelas raízes flutuantes.

Figura 10. Exemplar de *Ludwigia helminthorrhiza* Hara.



Fonte: Autor

Erva aquática flutuante livre, com flutuadores esponjosos, que são pneumatóforos, passando a fixa de porte ereto quando água estiver na borda, perene, floresce de fevereiro a outubro, durante e após a cheia, suas sementes são alimento para aves aquáticas, apícola, seus flutuadores são alimentos para diversos insetos e peixes; Ornamental e bem apreciada em aquários e considerada medicinal para diarreia, escarro de sangue e feridas. Seu cultivo propaga-se por divisão da planta, requer água ligeiramente acida, luz intensa e calor ou pleno sol (POTT E POTT, 2000).

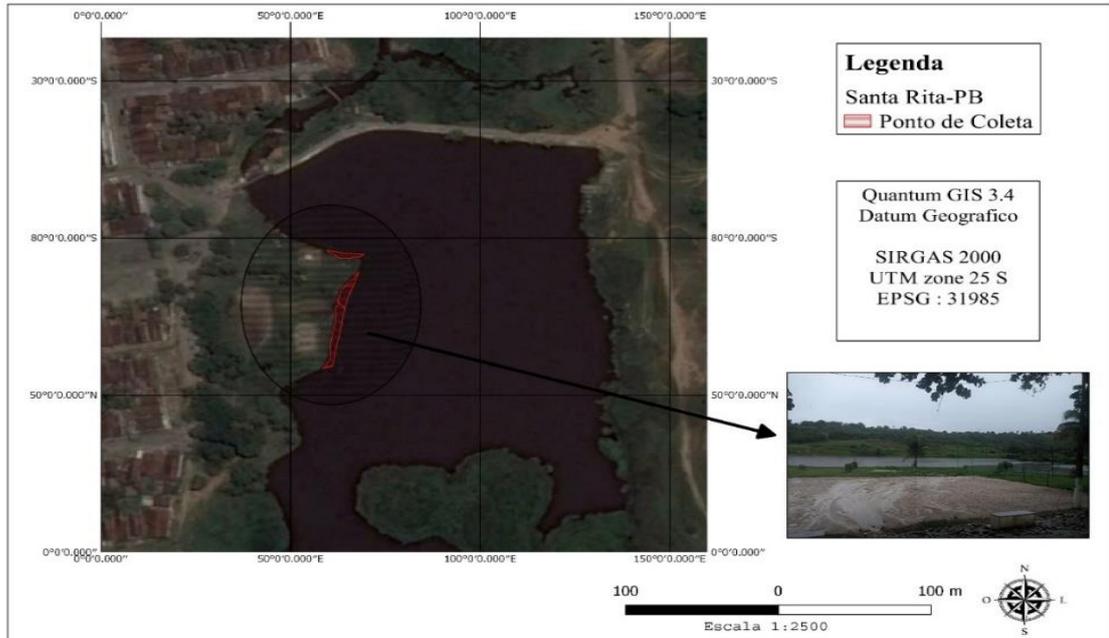
Possui um caule glabro, verde e herbáceo, folhas alternas obovadas, suculentas e sutilmente discolores, sua flor é pentâmera com cálice e coroa distintos, dialissépalo e dialipétala, respectivamente, pétalas brancas com androceu com estames e filetes curtos, ovário ínfero e sincárpico e fruto tipo capsula, deiscente. Sua anatomia consiste em uma epiderme da face abaxial da folha apresenta células com paredes sinuosas, com presença de estômatos anomocíticos. Tricomas unicelulares, idioblastos com ráfides. (GUTERRES *et al.*, 2008)

Em sua ocorrência é dada pela vegetação flutuante dos rios Miranda (Mato Grosso do sul), Cuiabá e Paraguai, em solos argilosos e em vazantes nas sub-regiões arenosas, sua distribuição é Pantropical, cosmopolita, do sul do Estados Unidos, e México ao peru e Brasil (POTT E POTT, 2000).

5. METODOLOGIA

A coleta das macrófitas aquáticas foi realizada em um lago no município de Santa Rita no Estado da Paraíba (Figura 11).

Figura 11. Mapa temático, pontos de coleta das Macrófitas Aquáticas.



Fonte: Autor.

Após a etapa de coleta, as macrófitas foram submetidas a um processo de limpeza manual a fim de retirar impurezas (qualquer material orgânico ou inorgânico) em seguida, foi realizada a poda das partes das plantas que possuíam danos ou má formação, principalmente de folhas e flutuadores danificados.

Após o processo de limpeza e condicionamento das macrófitas aquáticas coletadas uma alíquota de cerca de 30% da massa total de cada espécie coletada, foram colocadas em tanques de cultivo de 500L, com dimensões de comprimento 1,50m, Largura 1,50 m e altura de 56cm, que possuíam uma fauna de peixes ornamentais das espécies *Poecilia reticulata*, *Poecilia latipinna* e *Betta Splenders*.

A fauna introduzida nos tanques, tiveram um propósito de realizar manutenção das atividades metabólicas assim como evitar o desenvolvimento de insetos como *Aedes aegypti* entre outros, que de acordo com Calvalcanti (2006), espécies de peixes ornamentais como *Poecilia reticulata* e *Betta Splenders* podem ser usadas como controle biológico de larvas.

Os cultivos foram feitos na cidade de João Pessoa/PB, no período de janeiro de 2019 a abril de 2019, com temperaturas segundo o INMET(2020) mínima de 21 °C e máxima de 34 °C, Tabela 4, para analisar o crescimento, das macrófitas introduzidas nos tanques, foram realizadas a cada quinze dias por um período de quatro meses, as análises do peso da biomassa das plantas e a análise de pH da água.

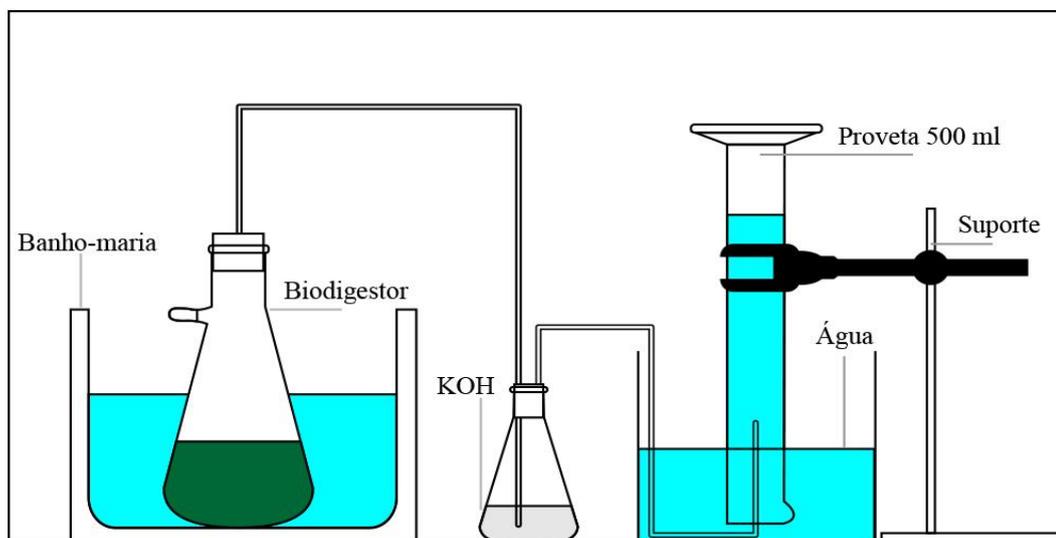
Tabela 4 Temperatura mínima e máxima relativa ao período de cultivo.

Mês	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima
Janeiro/2019	22 °C	33 °C
Fevereiro/2019	23 °C	33 °C
Março/2019	23 °C	34 °C
Abril/2019	21 °C	33 °C

Fonte: INMET, 2020

Para avaliar a produção de biogás foi montado um biodigestor de bancada (Figura 12) mantido em banho maria para manter a temperatura constante em 35 °C, os biodigestores constituíam de dois kitassatos de 1L vedados e conectados em mangueira de silicone que foi conectada a um Erlenmeyer de 250ml com uma solução de Hidróxido de potássio (KOH) a 30% com o objetivo de absorver o gás carbônico (CO₂), liberando assim em maior quantidade o metano. De acordo com Lombardia et al. (2011), uma solução aquosa de KOH reage com CO₂, contido no biogás, essa reação produz uma solução de Carbonato de potássio K₂CO₃.

Figura 12. Desenho em escala 1:1 da medição da produção biogás com filtro.



Fonte: Autor

Após a solução, o volume de gás produzido foi medido em uma proveta invertida suspensa em um recipiente com água. Essa metodologia também foi utilizada por Vattamparambil (2012), Budiyo, Syaichurrozi e Sumardiono (2013), Amano, Adom e Appiah-Danquah (2017), Fernandes *et al.*, (2018), (Figura 15).

O tempo de retenção adotado para todas as macrófitas, foi de período de 5 dias, que de acordo com Owen *et al.*, (1979) a degradação máxima do substrato ocorre durante esses primeiros cinco dias de incubação.

Os mesmos parâmetros foram avaliados com a espécie *Spirodela intermedia* com tempo de retenção hidráulica de 30 dias, afim de entender suas variações em um tempo maior de biodigestão. Por problemas técnicos não foi possível realizar o teste com as outras espécies de macrófitas aquáticas.

Para o processo de digestão anaeróbia, as macrófitas aquáticas foram levadas para o Laboratório de Materiais e Química Ambiental (*LabMaQ*), separadas por espécies e trituradas em um liquidificador industrial por um tempo de 15 segundos até a obtenção da biomassa de forma mais homogênea. Para cada teste de biodigestão anaeróbica foram utilizados 210g de biomassa úmida e adicionados 420ml de água (retirada da planta após trituração e misturada juntamente com água de cultivo, afim de conservar maior quantidade de biota existente, relacionada a macrófita e seu cultivo).

Com o substrato realizado na etapa acima descrita, o mesmo foi submetido a análise de demanda química de oxigênio (DQO), antes e após o processo de biodigestão, onde foi utilizada a metodologia guiada pelo *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Apha, 1995), com escolha do método titulométrico, todas as amostras foram analisadas em triplicata e diluídas 10 vezes.

Para medições de potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE), o substrato antes e após o processo de biodigestão foi filtrado em papel filtro afim de retirada dos sólidos existentes e foram levadas ao laboratório de Saneamento (LABSAN) da Universidade Federal da Paraíba, que por sua vez realizou os testes utilizando o condutivímetro AZ Meter 86505 e pHmetro Quimis modelo Q400AS. Para determinar a quantidade de sólidos fixos o substrato foi encaminhado ao Laboratório de Materiais e

Química Ambiental (*LabMaQ*), antes do processo de biodigestão onde o mesmo foi analisado de acordo com a Norma Brasileira NBR 10664.

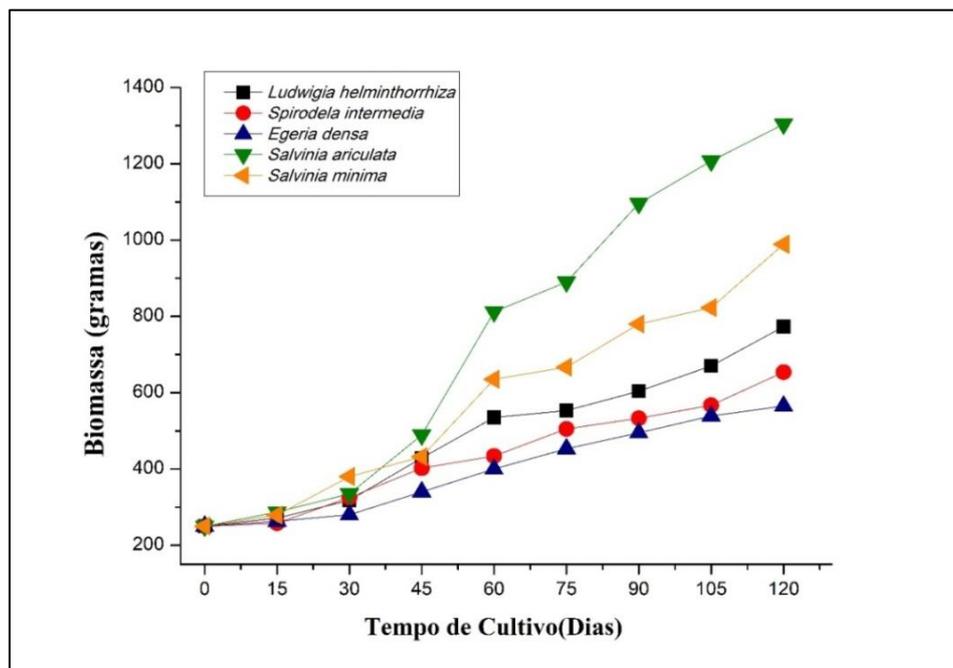
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Aumento de biomassa das macrófitas aquáticas.

De acordo com as avaliações realizadas no cultivo das espécies de macrófitas aquáticas, foi constatado que no período de 120 dias houve crescimento em todas as espécies. A espécie da *Salvinia auriculata* obteve um ganho percentual de biomassa de 421,6% (Média de 3,51% biomassa/dia), seguida pela *Salvinia mínima* com 295,6% (Média 2,46% biomassa/dia), a *Ludwigia helminthorrhiza* com 104,6% (Média 0,87% biomassa/dia), *Spirodela intermedia* com 73,45% (Média de 0,61% biomassa/dia) e a *Egeria densa* com 45% (Média de 0,37% biomassa/dia), como observados na Figura 13.

O resultado expresso no estudo do ganho de biomassa das macrófitas obteve valores variados de crescimento por espécie, destacando que, todas as espécies cresceram durante o período avaliado, há series de fatores associados que explicam o dado resultado.

Figura 13. Ganho de Biomassa das macrófitas aquáticas.



Fonte: Autor.

Para Esteves (2011), diferentes espécies e macrófitas aquáticas de lagos tropicais e subtropicais podem obter todo nitrogênio necessário para seu crescimento através de fixação de nitrogênio molecular, por bactérias semi-simbiontes via rizosfera. As espécies de macrófitas aquáticas especialmente as flutuantes livres possuem alta capacidade de produção primária (TUNDISI E TUNDISI, 2008).

Outro fator que explica o crescimento é a ausência de competição intraespecíficas, herbívoros e ações antrópicas de mudanças significativas nas condições da qualidade e características físicas, químicas e biológicas da água, portanto demonstrando uma boa capacidade de cultivos desses vegetais em ambientes controlados.

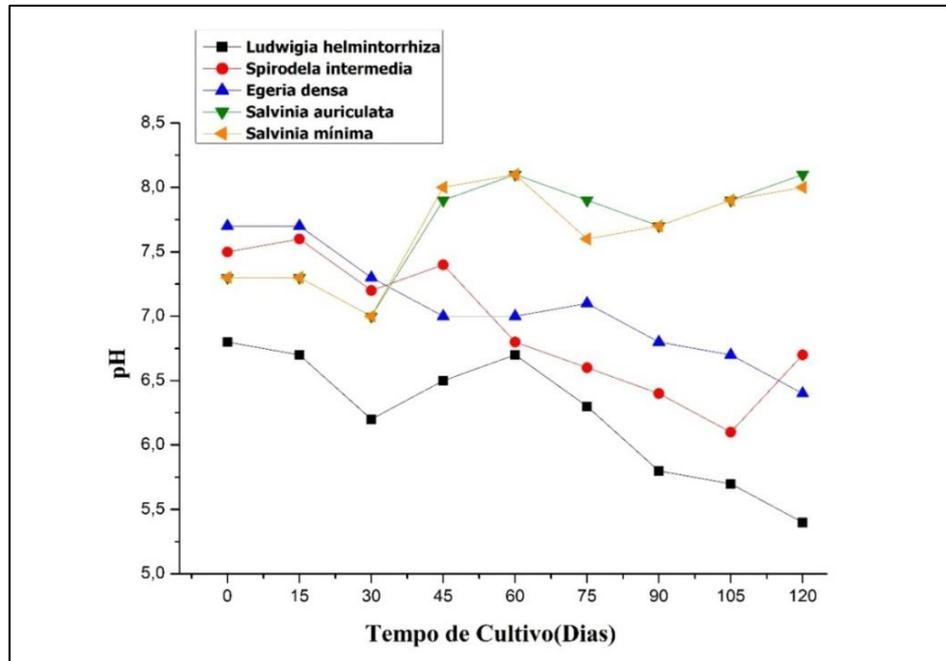
Em estudo realizado por Cruz, Souza e Alves, (2016) a fim de identificar a relação interespecífica de algumas espécies de macrófitas o autor introduziu dois indivíduos de *Eichornia crassipes*, *Egeria densa*, *Cabomba furcata*, em um tanque de 500L, onde foi observado suas relações em um período de 4 meses. O autor constatou o aumento dos indivíduos de *Eichornia crassipes* e a extinção da espécie *cabomba furcata*, com relação à *Egeria densa* os indivíduos foram estagnados, não havendo crescimento dos mesmos no tanque.

O entendimento da dinâmica de cultivo e crescimento da biomassa aquática para uso energético se dá na utilização contínua da biomassa desses vegetais, para composição de substratos para biodigestão, portanto, de acordo com Figueiredo, Barbosa e Lopes (2017) as vantagens da biomassa aquática como recurso energético, no entanto, vão além da não necessidade de grandes áreas de cultivo, tendo em vista que, em climas tropicais como o da maior parte do Brasil, não apresentam sazonalidade na sua produção e que a sua eficiência fotossintética é em torno de 30% mais elevada quando comparada à da biomassa terrestre, o que representa maior fixação de CO₂ e maior taxa de produtividade.

A temperatura é outro fator que correlaciona à capacidade de crescimento. Em João Pessoa/PB, segundo o (INMET, 2019) o clima é classificado como Am, e sua temperatura média anual é 24 - 26 °C. Para Biudes e Camargo (2008), cada espécie de macrófita aquática possui uma temperatura ideal para seu crescimento, as espécies de região tropical possuem uma temperatura ideal para crescimento em temperaturas entre os 25°C, entretanto temperaturas acima de 30 °C tendem a limitar seu crescimento.

Nas análises de pH da água dos tanques foram obtidos valores mínimos de 5,4 e máximo de 8,1, variando de espécie para espécie, como pode ser melhor observado na Figura 14.

Figura 14. Variação de pH do cultivo em 120 dias.



Fonte: Autor

As espécies *Ludwigia helmintorrhiza* e *Egeria densa* obtiveram um pH inicial maior que o pH final, a *Spirodela intermedia* apresentou um comportamento similar às espécies anteriormente mencionadas tendo como diferença, o aumento de pH na última quinzena de avaliação, em relação a *Salvinia mínima* e *Salvinia auriculata* obtiveram resultados de pH, onde foi possível observar um aumento em relação ao seu pH inicial.

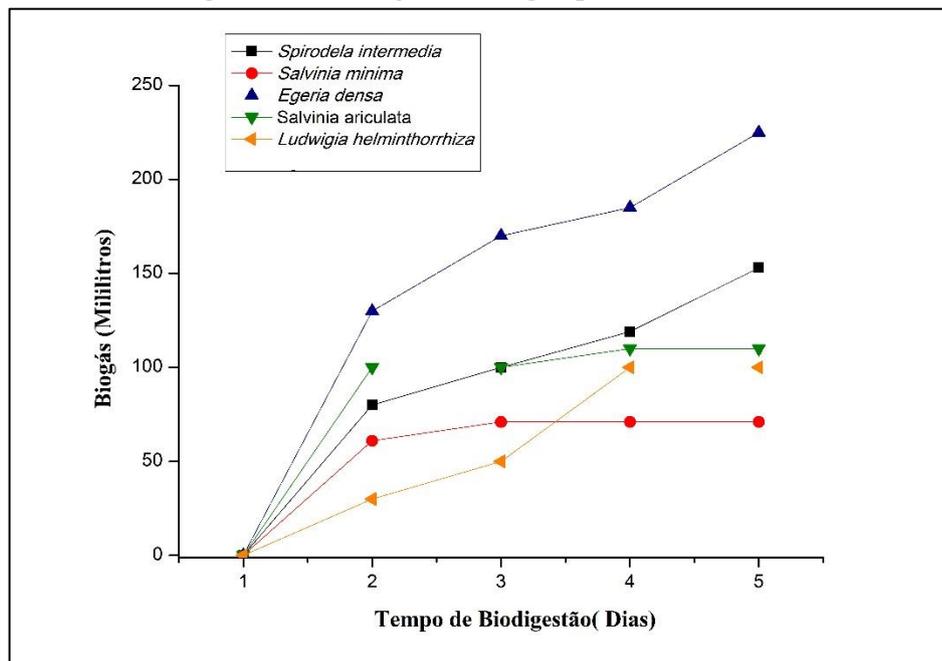
Em estudo realizado por Gentelini et al. (2008), ao analisar os efeitos de macrófitas aquáticas em efluentes de piscicultura, o mesmo constatou que em relação ao pH as espécies *Egeria densa* e *Eichornia crassipes* os valores de pH variaram entre 6,72 a 6,95. Este mesmo padrão de redução do pH após a passagem pelo sistema de tratamento, foi observado por Henry-Silva e Camargo (2006), em três macrófitas flutuantes, *Eichornia crassipes*, *Pistia stratiotes* e *Salvinia molesta*, no tratamento de efluente de piscicultura.

Portanto, existe uma intensa interdependência entre comunidades vegetais e os valores do pH do meio e as plantas podem interferir no pH do ambiente, assim como algumas espécies podem ter seu metabolismo alterado pela variação dele (ESTEVEZ,2011).

6.2 Produção de biogás

A produção de biogás relativa a 5 dias de digestão anaeróbia pode ser observada na Figura 15.

Figura 15. Produção de biogás pelas macrófitas



Fonte: Autor

É possível perceber maior produção da macrófita aquática *Egeria densa* com total produzido em 5 dias de 225ml de biogás seguida pela *Spirodela intermedia* com 153ml, *Salvinia auriculata* com 110ml, *Ludwigia helminthorrhiza* com 100ml e por último a *Salvinia minima* com 7ml.

Em estudos analisando a capacidade de produção de biogás através das macrófitas aquáticas, Singhal e Rai (2003) obtiveram um valor de 390 ml de biogás em seu quinto dia de digestão, a utilizar a *Eichhornia crassipes* em um reator contínuo, gradualmente abastecido por inóculo de 50ml(composto por esterco bovino coletado em um biodigestor ativo) e 100ml de substrato a 35°C. Para Verma; Sigh e Rai (2007), foram obtidos os valores de 98,3 ml para *Eichhornia crassipes* e 81,2ml pra a *Eleocharis dulcis*, do quarto ao oitavo dia de digestão, utilizando um biodigestor contínuo, onde foram inseridos gradualmente um inóculo

com razão 1:1 de substrato e esterco bovino a 35°C. Para Koyama et al(2014), no seu quinto dia de biodigestão foram obtidos aproximadamente os valores de 275ml da *Egeria densa*, 350ml *Elodea nuttallii*, 175ml da *Ceratophyllum demersum*, 75 ml *Potamogeton malaianus* e 17 ml *Potamogeton maackianus*, o autor utilizou um biodigestor de batelada, com 500ml de substrato composto pela razão de 1:2 do inóculo(composto por lodo anaeróbio de estação de tratamento de esgoto doméstico) e substrato. Para Pantawong et al (2015) foi obtido o valor de 100ml de biogás no quinto dia de biodigestão relativa a macrófita aquática *Pistia stratiotes* L. em um biodigestor de batelada com volume de 1L contendo 80ml de inóculo(proveniente do lodo anaeróbio de um biodigestor mesófilo em funcionamento), 400g da biomassa da *Pistia stratiotes* em pó e completado com água destilada, com temperatura 35°C.

Na Tabela 5 é possível observar os resultados descritos acima, e o obtidos no presente estudo.

Tabela 5. produção de biogás com macrófita aquáticas

Macrófita Aquática	Tipo	Biogás ao 5° Dia(ml)	Autores
<i>Eichhornia crassipes</i>	Flutuante	390	Singhal e Rai (2003)
<i>Eichhornia crassipes</i>	Flutuante	98,3	Verma;Sigh e Rai (2007)
<i>Eleocharis dulcis</i>	Anfíbia	81,2	Verma;Sigh e Rai (2007)
<i>Egeria densa</i>	Submersa	275	Koyama et al (2014)
<i>Elodea nuttallii</i>	Submersa	350	Koyama et al (2014)
<i>Ceratophyllum demersum</i>	submersa	175	Koyama et al (2014)
<i>Potamogeton malaianus</i>	Submersa	75	Koyama et al (2014)
<i>Potamogeton maackianus</i>	Submersa	175	Koyama et al (2014)
<i>Pistia Stratotes L.</i>	Flutuante	100	Pantawong et al (2015)
<i>Egeria densa</i>	submersa	225	Presente estudo
<i>Spirodela intermedia</i>	flutuante	153	Presente estudo
<i>Salvinia auriculata</i>	flutuante	110	Presente estudo

<i>Ludwigia helminorrhiza</i>	flutuante	100	Presente estudo
<i>Salvinia mínima</i>	flutuante	71	Presente estudo

Fonte: Autor

É possível dizer que os resultados apresentados das espécies estudadas são próximos em comparação os estudos correlacionados na utilização de macrófitas aquáticas apresentados, as variações dos resultados por sua vez pode ser explicado por variáveis condicionais tais como, tamanho do biodigestor e quantidade de substrato a ser biodegradada, utilização do inóculo e o tipo usado ou até mesmo composições biológicas das espécies tais como: composição bioquímica do indivíduo em relação a lignina, celulose e hemicelulose, meio em que foi coletado.

Em relação ao inóculo e acordo com Parawira (2012), a melhoria dos sistemas digestão anaeróbia pela inoculação de agentes biológicos aditivos foi alcançado por aumento da capacidade microbiana diversidade para uma melhor atividade hidrolítica ou metanogênica e adição de enzimas para facilitar a hidrólise dos compostos particulados.

As macrófitas aquáticas têm imenso potencial na produção de biogás devido à sua alta taxa de nitrogênio e alto teor de matéria fermentável, porém é recomendado a deslignificação das macrófitas antes da digestão anaeróbica (KOYAMA *et al.*, 2014), para Koyama *et al.* (2017) relatam que a presença de lignina pode impedir a hidrólise, que é uma das etapas da digestão anaeróbica, principalmente devido à barreira composta por lignina, celulose e hemicelulose.

Tal dificuldade se deve à natureza recalcitrante da lignina que reveste a celulose e a hemicelulose, sendo estes os principais carboidratos de interesse do processo. O teor de lignina, conteúdo de celulose e hemicelulose, volume de poros, tamanho das partículas, área superficial para reações enzimáticas e característica estrutural são os principais fatores que limitam a velocidade da taxa de hidrólise no processo de biodigestão de biomassa lignocelulósica (FRIGON e GUIOT, 2010). Processos de biodigestão de materiais lignocelulósicos são indicados em sistemas de fermentação em fase sólida, onde os reatores operam com mais de 20% de teor de sólidos (GUENDOUZ *et al.*, 2010; LI *et al.*, 2011).

6.3 Parâmetros Avaliados

Em relação as análises de sólidos totais relativo ao substrato das macrófitas aquáticas foram obtidos os seguintes resultados; *Ludwigia helminorrhiza* com 53,15%, *Egeria densa*

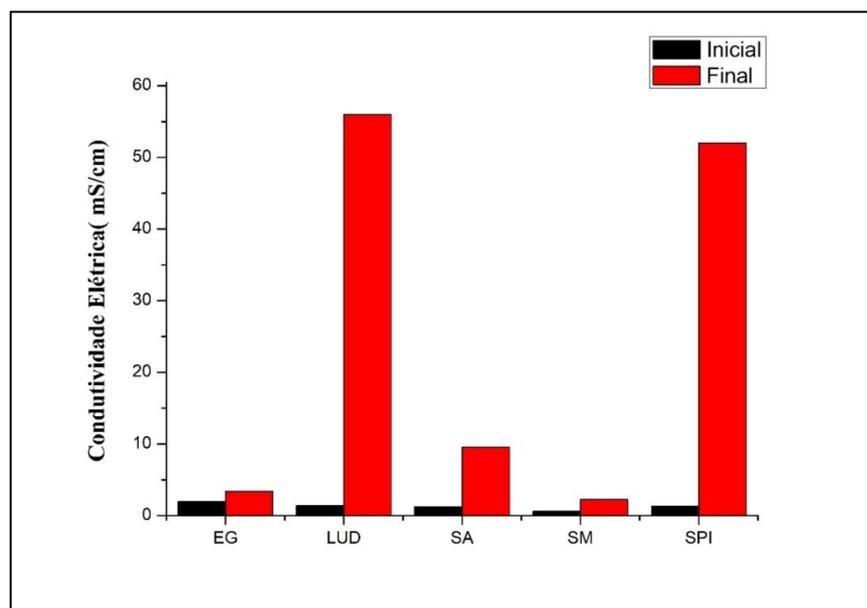
com 52,50%, *Salvinia auriculata* com 48,85%, *Salvinia mínima* com 55,75% e *Spirodela intermedia* com 50,60%.

Para Yi *et al.* (2014), em estudo realizado para avaliação da influência dos sólidos totais na digestão anaeróbica da biomassa em temperatura mesófila foi avaliado teor de sólidos totais na faixa de 5%, 15% e 20%, dessa forma o autor observou que as melhores performances, era encontrado em reatores com aumento do conteúdo de sólidos totais, assim aumentando o rendimento do metano, como aumento da populações de bactérias funcionais responsáveis pela digestão anaeróbia.

Já em relação a produção de biogás quanto maior concentração de sólidos totais também acarreta no maior volume produzido de biogás por um consórcio microbiano em condições anaeróbias (ALZATE *et al.*,2012). Para Cavaleiro (2000), os processos anaeróbios são efetuados por um consórcio microbiano complexo, pelo que os vários grupos bacterianos presentes podem exibir diferentes respostas face a uma determinada substância.

A condutividade elétrica avaliada antes e depois do processo de digestão anaeróbia, Figura 16, é possível perceber um aumento significativo em relação ao valor inicial da *Ludwigia helmintorrhiza* com aumento de 2700% seguida da *Spirodela intermedia* com aumento de 2500% e *Salvinia auriculata* com aumento de 400%.

Figura 2. Condutividade elétrica, período de 5 dias de biodigestão. EG= *Egeria densa*, LUD = *Ludwigia helmintorrhiza*, AS = *Salvinia auriculata*, SM= *Salvinia mínima* e SPI= *Spirodela intermedia*.



Fonte: Autor

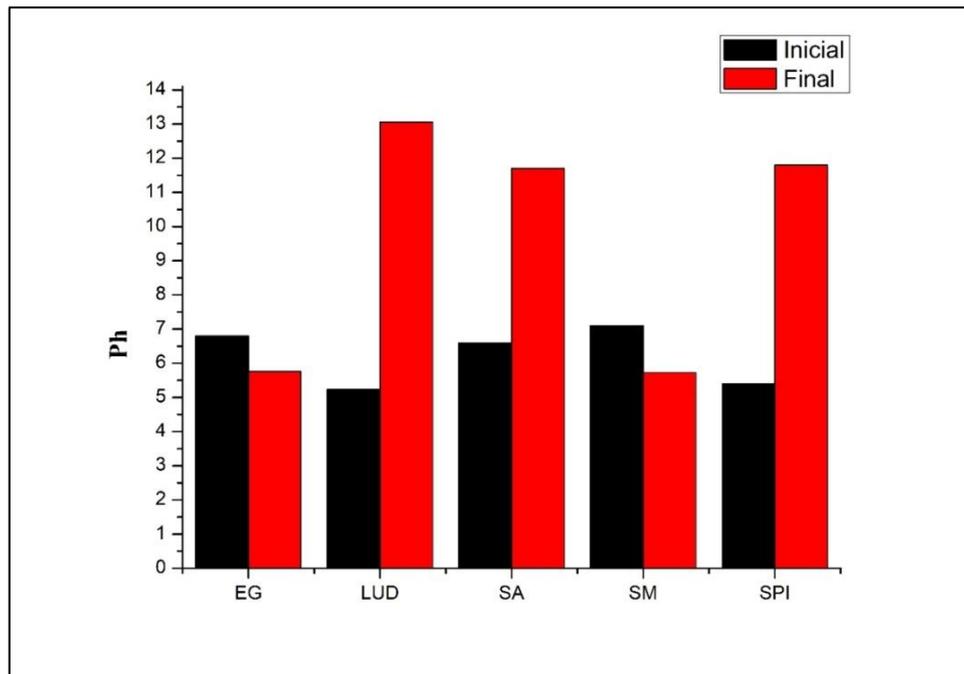
Este resultado pode estar associado à solubilização dos sais durante o processo e mineralização de matéria orgânica (MASSACCESIA *et al.*, 2013). Para Esteves (2011) os valores de condutividade elétrica possuem um grande aumento nos primeiros dias devido a liberação dos íons provenientes da matéria orgânica dissolvida.

Para Gentelini et al (2008) observou que a espécie *Egeria densa* causa um aumento na condutividade elétrica, provavelmente devido à disponibilização de sais para a água em função da perda de biomassa. Já Martins e Pitelli (2005) destacaram que o aumento da condutividade elétrica, decorre da liberação de nutrientes durante o processo de decomposição das plantas.

Resultados obtidos por Silva *et al.* (2012) no tratamento de biodigestão anaeróbia da vinhaça, apresentou maiores valores de condutividade elétrica no efluente em relação ao afluente. Segundo o autor, a condutividade elétrica está relacionada com a quantidade de íons dissolvidos durante a fase líquida, e o aumento da condutividade elétrica seria explicado pela digestão de uma matéria mais complexa em uma mais simples. De acordo com Nunes (2010), em estudo analisando a digestão anaeróbia de diversas espécies de macrófitas aquática foi possível identificar um aumento em relação ao pH inicial.

O resultado referente ao pH inicial e final como demonstrado na figura 17, onde foi possível observar o aumento do pH na avaliação final após o processo de digestão aeróbia das respectivas espécies já mencionadas anteriormente.

Figura 3. pH, período de 5 dias de biodigestão.

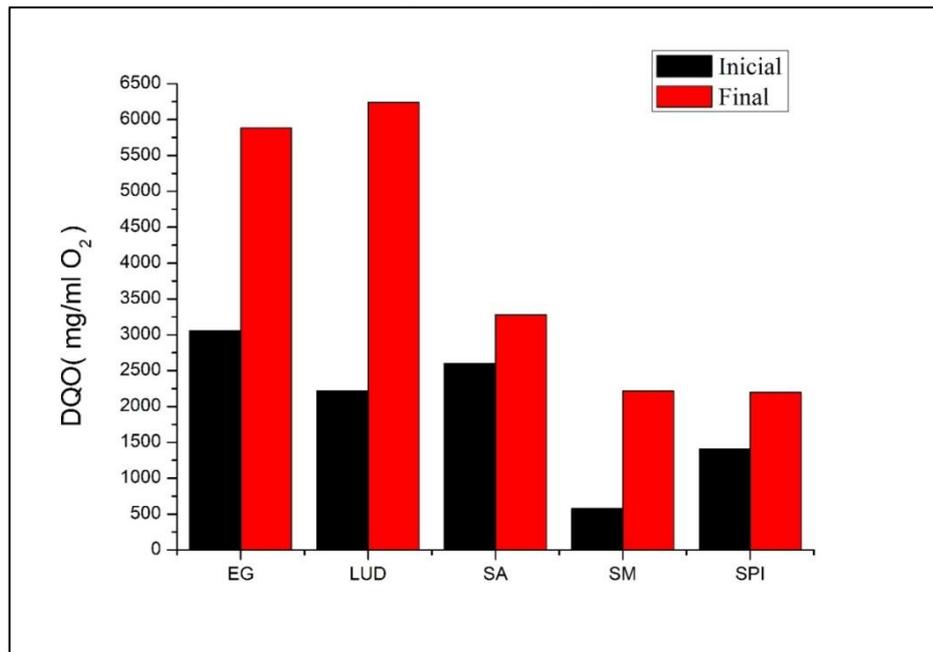


Fonte :Autor

De acordo com Bottino (2011), em estudo da decomposição das macrófitas aquáticas *Polygonum lapathifolium* e *Eichhornia azuera*, in situ foi observado um aumento de pH constante do início do experimento até um 15º dia, assim como aumento constante da condutividade elétrica. Cunha-Santino, Bianchini e Okawa, (2010) associa o fator do aumento da pH macrófitas aquáticas, pelo fator a liberação dos ânions e da hidratação da amônia, da mesma forma que o aumento da condutividade elétrica devido ao consumo de matéria orgânica e colonização de diferente comunidade de bactérias.

Tais resultados levantam a hipótese de uma digestão incompleta da biomassa das espécies estudadas, durante o período de 5 dias de digestão anaeróbia, essa hipótese pode ser reforçada através do valor de DQO obtidos, Figura 18, onde é possível observar o aumento dos valores finais.

Figura18. Demanda Química de oxigênio (DQO), período de 5 dias de biodigestão.

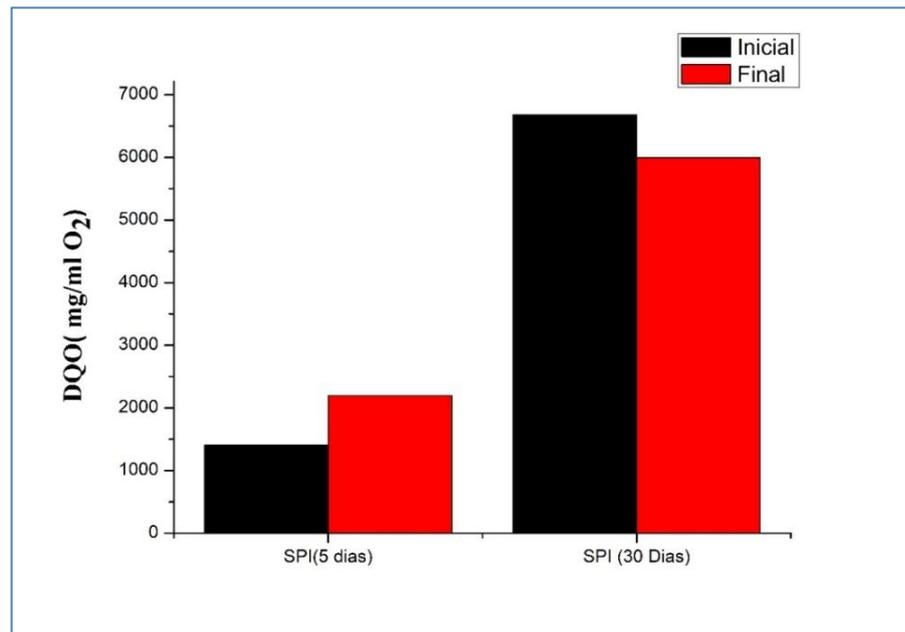


Fonte: Autor

Desta forma é possível correlacionar os dados obtidos de CE, pH e DQO, onde os mesmos demonstram que o substrato está sendo acrescido substâncias orgânicas menos complexas, possivelmente provenientes da decomposição da matéria orgânica, especialmente da lignina e hemicelulose e celulose presente nesses vegetais, como também o aumento da comunidade bacteriana responsável pela biodegradação dessas substâncias o que explica os valores elevados nos três parâmetros e reforça hipótese de digestão incompleta devido ao possível curto período de digestão anaeróbia adotado para realização das análises.

Essa hipótese também pode ser reforçada pela Figura 22, onde é demonstrado que na espécie *Spirodela intermedia*, o valor de DQO ao final da digestão anaeróbia em um período maior de tempo de detenção hidráulica do que o apresentado na figura 19, apresenta uma remoção de DQO em 10,17%. O que consiste em dizer que em um período de detenção hidráulica de 5 dias, a biomassa celulósica ainda encontra em decomposição de matéria orgânica em solubilização ao substrato.

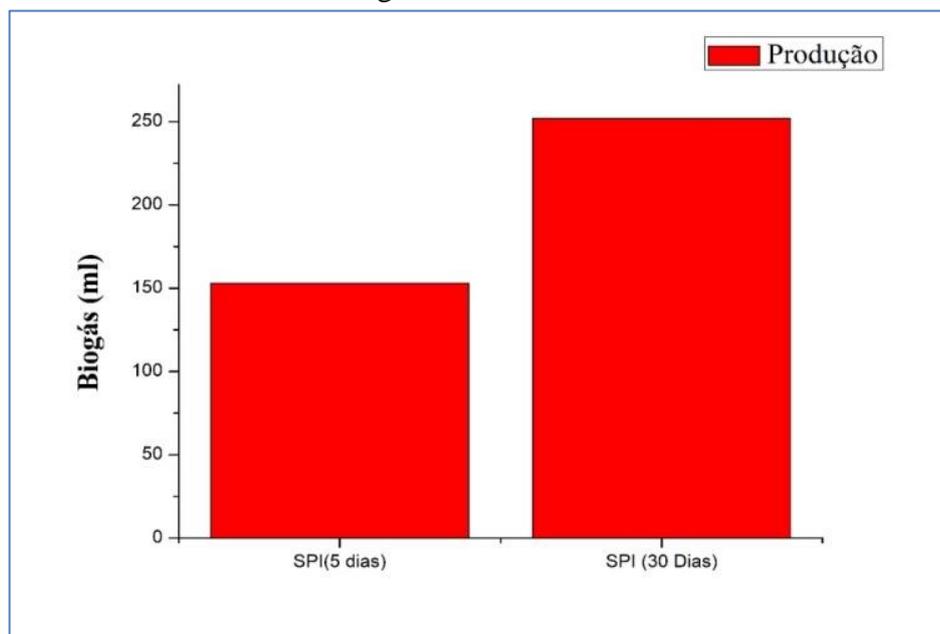
Figura 4. Análise de DQO da SPI = *Spirodela intermedia*, após 5 e 30 dias de tempo de retenção hidráulica.



Fonte: autor

Assim na Figura 20, é possível observar que no processo de produção, mesmo sobre aspectos de inibição da atividade de hidrólise ou de continuidade da decomposição da lignina e hemicelulose presente no substrato, há uma constante produção de biogás, relativo na espécie *Spirodela intermedia*.

Figura 20. Produção de Biogás da SPI = *Spirodela intermedia*, após 5 e 30 dias de tempo de digestão Anaeróbia.



Fonte: Auto

Outra explicação ao fator de aumento da DQO pode ser obtida por Koyama et al. (2017), que denota que o aumento da DQO não hidrolisada pode implicar a inibição do passo de hidrólise, isso pode ocorrer pela inibição da hidrólise anaeróbica devido à adsorção irreversível de enzimas hidrolíticas pela lignina dissolvida.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização do presente estudo é possível concluir que há um crescimento significativo em todas as macrófitas estudadas, com ganho médio percentual de biomassa/dia de 3,51% para *Salvinia auriculata*, 2,46% para *Salvinia mínima*, 0,87% para *Ludwigia helminorrhiza*, 0,61% para *Spirodela intermedia* e 0,37% para *Egeria densa*, em condições de temperatura *in natura* de 21°C(mínima) e 34°C(máxima).

Para produção de biogás foi constatado que há viabilidade de utilização das macrófitas aquáticas abordadas no estudo como substrato para biogás apenas com tratamento físico, constituído pela trituração da biomassa e sem adição de inóculo, apresentando os valores relativo a *Egeria densa* de 225ml, *Spirodela intermedia* com 153ml, *Salvinia auriculata* com 110ml, *Ludwigia helminorrhiza* com 100ml e *Salvinia mínima* com 71ml, de produção de biogás com tempo de 5 dias de biodigestão anaeróbia.

Na avaliação dos resultados apresentados dos parâmetros abordados no processo de digestão anaeróbia, foi possível perceber um aumento em relação ao pH, condutividade elétrica e DQO, possivelmente decorrente das atividades de transformação da biomassa ocorridas durante a digestão no período de 5 dias, levando a entender que durante tempo abordado no presente estudo a biomassa ainda encontra-se em processo de digestão.

Por fim os estudos envolvendo a biomassa das macrófitas aquáticas são importantes pela capacidade de uso múltiplo que esses vegetais apresentam, tornando possível a aplicação de seu uso como ferramenta tecnológica para diversas funções dentre elas a função ecossistêmica, mitigação de impactos ambientais antrópicos e geração de energia através do seu uso como substrato para geração de biogás, como foi possível demonstrar através das espécies estudadas, dessa forma a possibilidade de interação desses valores podem proporcionar uma sustentabilidade aos processos de obtenção energética através dessa biomassa.

8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a digestão anaeróbia com mais de uma espécie de macrófita aquática no mesmo substrato.
- Analisar a composição do biogás gerado.
- Monitorar de forma contínua a condutividade elétrica no reator durante todo processo de digestão anaeróbia.
- Realizar a Digestão Anaeróbia com pré-tratamento químico e biológico.

REFERENCIAS

Alzate, M. E.; Muñoz, R.; Rogalla, F.; Fdz-polanco, F.; Pérez-elvira, S. I. Biochemical methane potential of microalgae: Influence of substrate to inoculum ratio, biomass concentration and pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 123, 2012. p. 488–494,

Andrade, J.C.M; Tavares, S.R.L; Mahler, C.F. **Fitorremediação: uso de plantas para melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo – Oficina de Textos, 2007.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica.3. ed. – Brasília: Aneel, 2008, 236p.

APHA, AWW, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th. Edition. American Public Health Association, Washington, DC.1995

Aquino, S. F.; Silva, S. Q.; Chernicharo, C. A. L. Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (dco) aplicado a análise de efluentes anaeróbios. **Engenharia Sanitária ambiental**. Vol.11 - Nº 4 - out/dez 2006.

Araujo, A.P.C. **Produção De Biogás A Partir De Resíduos Orgânicos Utilizando Biodigestor Anaeróbico**. Monografia como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química. Universidade federal de uberlândia faculdade de engenharia química. Uberlândia, 2017.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 10664: Determinação de Resíduos sólidos- método gravimétrico**. Rio de Janeiro. 1988.

Ayala-Parra, P. et al. Nutrient recovery and biogás generation from the anaerobic digestion of waste biomass from algal biofuel production. **Renew Energy**, 2017.

Barreira, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para zona rural**. 3º edição, São Paulo. Editora ícone, 2011, 106p.

Biudes, J.F.V; Camargo, A.F.M. Estudos dos fatores limitantes a produção primária por macrófitas aquáticas no Brasil. **Oecologia Bras.V.12,nº1,p.7-19,2008**.

Bottino, F. **Diversidade, biomassa e decomposição de Macrófitas aquáticas no reservatório Itupiranga-SP**. Tese apresentada a escola de engenharia de São Carlos, para título de Doutor em engenharia hidráulica e saneamento, Universidade de São Paulo, 2011.

BRASIL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. – Brasília: Aneel, 2008, 236p.

Cardona, C.A, Quintero, J.A, Paz, I.C. Production of bioethanol from the sugar cane bagasse: Status and Perspectives. **Bioresource Technology**. 2010; 101:4754-60

Cassini, S. T. ; Coelho, S. T. ; Pecora, V. . Biogás- Biocombustíveis ANP. In: Carlos Augusto G. Perlingeiro. (Org.). **Biocombustíveis no Brasil - Fundamentos, Aplicações e Perspectivas**. C. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2014, v. 1, p. 136-167.

Cavalcanti, L. P. G. **Potencial De Cinco Espécies De Peixe Como Método De Controle Biológico De Larvas De Aedes Aegypti, Em Condições De Laboratório, No Ceará**. Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico do Departamento de Saúde Comunitária (Mestre Em Saúde Pública), Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – CE, 2006.

Cavaleiro, A.J **Efeito de sobrecargas de ácido oleico na actividade de consórcios microbianos anaeróbios desenvolvidos em processos de leite fixo**. Dissertação de mestrado em Tecnologia do Ambiente. Universidade Do Minho,2000.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: Politécnica, 2007. 379 p.

COIMBRA-ARAÚJO, C. H.; MARIANE, L.; JÚNIOR, C. B.; et al. Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 826–839, 2014. Elsevier.

CORTEZ, L. A. B.; SILVA, A.; LUCAS JUNIOR, J.; JORDAN, R. A.; CASTRO, L. R. Biodigestão de Efluentes. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. (Org.). Biomassa para energia. Campinas, São Paulo: Editora da UNICAMP, 2008.

Costa, A.G; Pinheiro, Francisca, G.C; Pinheiro, G.C; Santos,A.B; Santaella,S.T; Leitão, R.C. Geração de metano a partir de resíduos lignocelulósicos oriundos da produção do biocombustível: revisão. **Revista DAE**. Edição nº 194, 2014. DOI: 10.4322/dae.2014.003.

Cruz, A. D.; Souza, R. A.; Alves, G. S. **Competição interspecífica entre macrofitas aquáticas eichhornia crassipes, egeria densa e cabomba furcata**. In: x connepi, 2016, rio branco - acre. Anais / x congresso norte nordeste de pesquisa e inovação: artigos e resumos. Rio branco, ac: editora ifac, 2015. V. 1. P. 1737-1741.

Cunha-santino, M; Bianchini jr,I; Okawa, M.H. The fate Eichhornia azurea(sw,) kunth detritos whithin a tropical resevoir. **Acta Limnologia brasiliencia**, v22,p.109-121.2010

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

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2019**. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>> acesso em: 14/10/2019. Rio de Janeiro, RJ ,2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balço Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência; 3ª edição, 2011.

Fahn, A. **Plant Anatomy**. Oxford, Pergamon Press, 1982. 544p

Figueiredo, S.A; Barbosa, E.C.A; Lopes, R.M.B.P. **Rios Eutrofizados Como Fonte De Obtenção De Biomassa Para A Produção De Biocombustíveis**. Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade -Vol. 5: Congestas 2017ISSN 2318-7603.

Frigon, J.C.; Guiot, S.R. Biomethane production from starch and lignocellulosic crops: a comparative review. *Biofuel Bioprod. Biorefin Biofpr*, v.4, n.4, p.447-458. 2010.

Gentelini, A.L. et al. **Produção de biomassa das macrófitas aquáticas Eichhornia crassipes (aguapé) e Egeria densa (egeria) em sistema de tratamento de efluente de piscicultura orgânica**. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 29, n. 2, 2008 . p. 441-448

Guendouz, J.; Buffiere, P.; Cacho, J.; Carrere, M.; Delgenes, J.P. Dry anaerobic digestion in batch mode: design and operation of a laboratory-scale, completely mixed reactor. *Waste Manag.*, v.30, n.10, p.1768-71. 2010.

Gueri, M,V,D et al. Parâmetros operacionais do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares: uma revisão. *Biofix ScientificJournal*, 2017 v. 3 n. 1 p. 17-25.

Guterres, M.G. **Anatomia e morfologia de plantas aquáticas da Amazônia utilizadas como potencial alimento por peixe-boi amazônico**. Belém – IDSM,2008.

HENRY-SILVA, G. G.; CAMARGO, A. F. M. Efficiency of aquatic macrophytes to treat Nile tilapia pond effluents. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 63, n. 5, p.433-438, 2006

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Temperatura Média Anual. Disponível em:<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=anomaliaTempMediaAnual>> Acesso em : 26/11/2019.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Monitoramento climatico. disponivel em : <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos> , acesso em 07/03/2020.

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

Karlsson, et al. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Ed. da Univates, 2014. 69 p.

Koyama, M et al. Anaerobic digestion of submerged macrophytes: Chemical composition and anaerobic digestibility. *Ecological Engineering*. 2014. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.05.013

Koyama,M et al. Inhibitionof anaerobic digestion by dissolved lignin derived from alkaline pretreatment of an aquatic macrophyte. *Chemical Engineering Journal*, 311, 55-62, March 2017. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.076>

Kunz, A. et al. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato** . Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. 209 p. ISBN 978-85-93823-01-5

LI, Y.B.; PARK, S.Y.; ZHU, J.Y. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renew. Sustain. Energ. Rev.**, v.15, n.1, p.821-6. 2011.

Lombardia, L et al. Carbon dioxide removal and capture for landfill gas up-grading. **Energy Procedia**, Volume 4, 2011, Pag. 465-472

Lorenzi, H. **Plantas Daninhas do Brasil: Terrestres , aquáticas, parasitas e toxicas**. 4 ed. Nova odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008.

Lu, J. et al. Nutrient release and uptake by littoral macrophytes during water level fluctuations. **Science of The Total Environment**, 2018. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.199.

Marafon, A.C . *Uso da Biomassa para a Geração de Energia*. Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros,. 2016. 28 p.

MARIANI, L. **Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil**. Dissertação de doutorado em engenharia mecânica. Universidade estadual de campinas. Campinas -SP, 2018.

MARTINS, A. T; PITELLI, R. A. **Efeitos do manejo de Eichhornia crassipes sobre a qualidade da água em condições de mesocosmos**. Planta Daninha, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 233-242, 2005.

Massaccesi, L et al . Chemical characterisation of percolate and digestate during the hybrid solid anaerobic digestion batch process. **Process Biochemistry**, v.48, p.1361-1367, 2013.DOI :<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.06.026>.

Milanez, A.Y. et al. **Biogás de Resíduos Agroindustriais: Panorama E Perspectivas**. BNDES Setorial 47, 2018,p. 221-276.

MOELLER et al. Crop Characteristics of Aquatic Macrophytes for Use as a Substrate in Anaerobic Digestion Plants Study from Germany. **Energies** 2018, .doi:10.3390/en11113016

Nunes, M.F. **Atividade das enzimas celulase e xilanase durante a decomposição anaeróbia de macrófitas aquáticas**. Dissertação apresentada no programa de pós graduação em ecologia de recursos naturais para obtenção do título de Mestre. São Carlos Ufscar, 2010.

OIES - THE OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES. Biogas. A significant contribution to decarbonising gas markets? **Energy Insight**, n. 15, 2017. Disponível em: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2017/06/Biogas-A-significant-contribution-to-decarbonising-gas-markets.pdf>. Acesso em: 07/03/2020.

Owen, W.F.; Stuckey, D.C.; Healy Jr, J.B. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. **Water Research.**, v. 13, p. 485-492, 1979.

Pantawong, R. et al. Experimental Investigation of Biogas Production from Water Lettuce, *Pistia stratiotes* L. **Emerg Life Sci Res** 1:41–46, 2015.

Parawira, W. Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogas production. **Crit Rev Biotechnol** ,2012 doi.org/10.3109/07388551.2011.595384.

Piveli, R.P; Campos,F. Poluição das águas por efluentes urbanos, industriais e agrícolas in: **Ciclo ambiental da água: da Chuva a gestão**; TELLES.D.A. São Paulo: Blucher, 2013. 218p

POTT, V. L; POTT, A. **Plantas Aquáticas do Pantanal**. EMBRAPA. Brasília, 2000.
PROBIOGÁS, Projeto Brasil – **Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. Ministério das Cidades, Brasília, 2015.

ROCHA,C.M. **Proposta De Implantação De Um Biodigestor Anaeróbio De Resíduos Alimentares**. Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista. Juiz de Fora,2016.

Rocha, Q.N. **Gestão de resíduos de Biomassa: Otimização da Distribuição geográfica das unidades industriais de geração de energia**. Relatório submetido para obtenção do título de engenheiro mecânico. Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2011.

Rodrigues, et al. Materiais Lignocelulósicos Como Matéria-Prima Para A Obtenção De Biomoléculas De Valor Comercial in Saccal, C.R; França. R.L. **Biotecnologia aplicada à agro&indústria: fundamentos e aplicações**. volume 4, São Paulo: Blucher, 2016.

SAKUMA,A.C.Desenvolvimento E Análise Experimental De Biodigestores Modulares De Baixo Tempo De Residência. Dissertação apresentada ao Programa Interdisciplinar de Pós-graduação em Engenharia - PIPE, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia.Curitiba, 2013.

Silva, W.T.S. et al. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola, **Química Nova**, vol. 35, n. 1, pp. 35-40, 2012.

Silva, W.T.S.; Novaes, A.P.; Kuroki, V.; Martelli, L.F.A.; Magnoni Jr., L., 2012. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola, **Química Nova**, vol. 35, n. 1, pp. 35-40.

Singhal, V; Rai, J.P.N. Biogas production from water hyacinth and channel grass used for phytoremediation of industrial effluents. **Bioresource Technology**, 2003.

Slorgon, J.g; Tavares, C.R.G; Bergamasco,R. Avaliação da DQO e da relação C/N obtidas no tratamento anaeróbio de resíduos fruti-hortícolas. **Acta Scientiarum Technology** ,2011.DOI: 10.4025/actascitechnol.v33i4.8259

Texeira Junior, L.R. **Biogas: Alternativa para geração de energia**. 1º ed Curitiba.Appros, 2016.101p.

Tundisi, J.G. & Tundisi, T.M. **Limnologia**. Oficina de Textos, São Paulo, 2008. 632p.

Verma. V.K. , Singh. Y.P. ,Rai. J.P.N. Biogas production from plant biomass used for phytoremediation of industrial wastes. **Bioresource Technology**,2007.

Yi J, et al. Effect of Increasing Total Solids Contents on Anaerobic Digestion of Food Waste under Mesophilic Conditions: Performance and Microbial Characteristics Analysis. **PLoS ONE** , Volume 9, Issue 7, 2014. doi:10.1371/journal.pone.0102548.