



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

LEONARDO ARIEL BENAVIDEZ MAMANI

Desenvolvimento de um Reator para Geração de
Biogás a partir de Biomassa de Microalgas como
Alternativa Energética nas Áreas Rurais



SALVADOR
2015



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL**

LEONARDO ARIEL BENAVIDEZ MAMANI

**DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS A
PARTIR DE BIOMASSA DE MICROALGAS COMO ALTERNATIVA
ENERGÉTICA NAS ÁREAS RURAIS**

SALVADOR, BAHIA

2015

LEONARDO ARIEL BENAVIDEZ MAMANI

**DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR
DE BIOMASSA DE MICROALGAS COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA NAS
ÁREAS RURAIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA), como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial

Orientadores:

Prof. Dr. Emerson Andrade Sales

Prof^a. Dra. Louisa Wessels Perelo

SALVADOR

2015

M263 Mamani, Leonardo Ariel Benavidez.

Desenvolvimento de um reator para geração de biogás a partir de biomassa de microalgas como alternativa energética nas áreas rurais / Leonardo Ariel Benavidez Mamani. – Salvador, 2015.

119 f.: il. color.

Orientadores: Prof. Dr. Emerson Andrade Sales ;
Prof^a. Dra. Louisa Wessels Perelo.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
Escola Politécnica, 2015.

1. Biogás. 2. Energia da biomassa. 3. Microalga. 4.
Saneamento rural. I. Sales, Emerson Andrade. II Perelo, Louisa
Wessels. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 579.82

**DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR
DE BIOMASSA DE MICROALGAS COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA NAS
ÁREAS RURAIS**

LEONARDO ARIEL BENAVIDEZ MAMANI

Tese submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Dr. Emerson Andrade Sales Emerson Andrade Sales
Doutor em Ciências/Engenharia Química, França, 1996;

Profa. Dra. Louisa Wessels Perelo L. Wessels Perelo
Doutor em Ciências Naturais, Alemanha, 2003;

Prof. Dr. Luciano Matos Queiroz Luciano Matos Queiroz
Doutor em Engenharia Civil, Brasil, 2009;

Prof. André Bezerra dos Santos André Bezerra dos Santos
Doutor em Saneamento Ambiental, Holanda, 2005;

Salvador, BA - BRASIL
junho/2015

**Conforme resolução do Programa, o conjunto de orientadores teve a
representação de 1 (um) único voto no parecer final da banca examinadora.**

A:

Meus queridos pais Valentin e Lucy, e meu querido irmão Rodrigo, eu agradeço de todo coração a Deus por ser seu filho e irmão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente devo agradecer a Deus e a meus pais por terem me dado sempre sua benção, apoio incondicional, e sua companhia que mesmo estando longe, pude sentir sua presença junto a mim em cada etapa de minha vida, sua constância e perseverança em tudo sempre foram um exemplo a seguir, e lutar para alcançar os objetivos mesmo que pareçam impossíveis.

A meu irmão Rodrigo Benavidez por seu apoio em todo momento, e ao iniciar a fase de instalação num novo país com linguagem e costumes muito diferentes, agradeço também a sua esposa Lúcia e seus pais Luiz e Hilda do Nascimento, assim como a meus tios Yerco, Corina e suas famílias por terem oferecido, bons e gratos momentos, agradeço também a Lucia Cruz por sua contínua companhia e alegria que sem importar a distância sempre esteve ao meu lado. A Carmen Loayza e Rui Santana por todo seu apoio e sua agradável amizade.

Aos Professores: Dr. Emerson Andrade Sales, e Dr^a. Louisa Wessels Perelo, por ter dado a oportunidade de participar do processo seletivo do Programa em Pós-Graduação como meus professores orientadores, e pela dedicação nas correções e orientações neste período de aprendizado. Ao Prof. Dr. Cristiano Fontes por ter me orientado pacientemente na participação do processo seletivo do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial. Aos professores Dr. Luciano Queiroz e Dr. Orlando Jorquera pelas recomendações.

A todos meus amigos e colegas do LABEC, especialmente a Viviane Neves por toda sua colaboração, conselhos, e recomendações de informação, colegas, e professores. A Sonia Villamizar, por toda sua colaboração, ajuda, conselhos, e bons momentos dentro do laboratório falando em nossa língua materna. A Mariana Conceição dos Santos, Rodrigo Guimarães, Gerlane Santos e seu esposo, por todo seu desprendimento de colaboração e amizade.

Ao todo o pessoal do Laboratório de Resíduos e Efluentes, por toda sua colaboração, especialmente a Daniele Vich por seu contínuo apoio acadêmico.

Ao pessoal do TECLIM, e especialmente a Bárbara Lima por sua colaboração.

Agradeço ao pessoal administrativo do PEI, a Tatiane Woytysiak, e Robinson Carvalho por sua colaboração e orientação nos temas administrativos.

“De que é formada a riqueza? Não é de matéria, é fruto de amor, sabedoria e da vida, como todas as coisas é formada de negativo e positivo, quando se restabelece a ordem, a provisão infinita da Imagem Verdadeira projeta sua sombra e se manifesta como riqueza fenomênica.”

Masaharu Taniguchi.

BENAVIDEZ, M. Leonardo Ariel. Desenvolvimento de um reator para geração de biogás a partir de biomassa de microalgas como alternativa energética nas áreas rurais. 119f. il. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo gerar energia por biodigestão da biomassa de microalgas, visando aplicação em locais com difícil acesso a combustíveis convencionais como as áreas rurais. Para atingir este objetivo, considerou-se projetar, construir, testar, e validar um reator para geração de biogás utilizando biomassa de microalgas para uso e benefício nas comunidades rurais. O primeiro passo foi identificar a quantidade de biogás gerado pela biomassa, desse modo foi avaliada a quantidade de matéria-prima disponível, com a colaboração do Laboratório de Bioenergia e Catálise e sua planta piloto, sendo possível determinar a espécie disponível para os testes, biomassa mista com predominância da microalga *Chlorella sp.* Posteriormente, segundo as características da biomassa, foram desenhados três protótipos (reator UASB com estágio de pós-digestão, reator de dois estágios com recirculação de biogás, e reator de dois estágios com fluxo de carga semi-contínuo) com base em modelos utilizados para tratamento de esgoto, e outros empregados nas áreas rurais carregados com esterco de gado. Em função das vantagens e limitações que cada protótipo apresentou, foi escolhido o reator de dois estágios com fluxo de carga semi-contínuo, como o modelo mais adequado. O reator foi construído em escala de laboratório em função da quantidade de biomassa disponível, do número de testes, e o tempo de degradação da biomassa. Foram montados três reatores do mesmo modelo, variando apenas o tempo de alimentação, com a finalidade de avaliar o melhor período de tempo para alimentar o material orgânico no reator. Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que o protótipo do reator testado conseguiu gerar metano (332,62 e 196,56 mL CH₄/g ST) a partir de biomassa mista da microalga *Chlorella sp.*, com uma maior produção de gás nos reatores alimentados semanalmente. Estimou-se um dimensionamento em escala real do protótipo capaz de fornecer energia por cinco horas ao dia (1.250 litros de biogás por dia) a uma família composta de cinco pessoas que mora numa área rural, considerando para isso as instalações requeridas na fazenda, os materiais de construção, o custo de investimento, e os devidos cuidados de operação, manutenção e segurança do biorreator e dos operários.

Palavras-chave: Biogás, Meio Ambiente, Processos, Produção, Biorreator.

BENAVIDEZ, M. Leonardo Ariel. Development of a reactor for the generation of biogas from microalgae biomass as an energy alternative in rural areas. 119f. il. 2015. Master Dissertation – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

ABSTRACT

This work aims to produce energy from the digestion of microalgal biomass, aiming the application in places with difficult access to conventional fuels such as rural areas. To achieve this goal, a bioreactor prototype was designed, build, tested and validated using microalgal biomass. The first step was to identify the amount of biogas generated by microalgal biomass, based on the amount of raw material available, produced in the pilot plant of the Laboratory for Bioenergy and Catalysis, which consisted of a mixed biomass with predominance of microalgae *Chlorella sp.* In the next step, considering biomass characteristics, three prototype (UASB reactor with post-digestion stage, two-stage reactor with biogas recirculation, and two-stage reactor with semi-continuous load) were designed based on models used for sewage treatment and on models applied in rural areas loaded with cattle manure. After evaluation of the advantages and limitations of each prototype, the two-stage reactor with semi-continuous load was chosen as the most appropriate model. The reactor was built in laboratory scale according to the amount of biomass available, the number of tests, and the time of biomass degradation. Three reactors of the same model were assembled, varying only the feeding time, in order to evaluate the best time interval for the addition of the organic material to the reactor. Based on the results obtained, it was possible to conclude that the prototype reactor tested could generate methane (332,62 and 196,56 mL CH₄/g ST) from the mixed biomass of the microalgae *Chlorella sp.*, obtaining a higher production of gas with weekly loads. Real scale dimensions of the prototype were estimated with the objective to supply power for five hours a day (1.250 liters of biogas per day) to a family compound of five persons that lives in a rural area, considering the installation required for the farm, construction materials, the cost of investment, and proper care of operation, maintenance and safety of the bioreactor and of the operators.

Key-words: Biogas, Environment, Process, Production, Bioreactor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Benefícios da digestão anaeróbia.....	6
Figura 2: Processo de fermentação da matéria orgânica.....	8
Figura 3: Composição das microalgas.....	17
Figura 4: Aproveitamento da biomassa de microalgas para produção de biogás numa biorrefinaria.	24
Figura 5: Aproveitamento da biomassa de microalgas para produção de biodiesel e biogás.	27
Figura 6: Aproveitamento da biomassa de microalgas para produção de biogás.....	30
Figura 7: Protótipo 1 reator UASB com estágio de pós-digestão.	34
Figura 8: Protótipo 2 reator de dois estágios com recirculação de biogás.....	36
Figura 9: Protótipo 3 reator de dois estágios com fluxo de carga semi-contínuo.....	38
Figura 10: Simbologia das dimensões do protótipo a ser construído (a) vista frontal, (b) vista lateral.	44
Figura 11: Reactores construídos (a) sistema interno, (b) vista interna, (c) tampa do reator com as saídas para tomar as amostras para a medição de pH e DQO, (d) vista lateral do reator pronto, (e) reatores 1 e 2 dentro da caixa de isopor, (f) reatores 1 e 2 com suas saídas de efluente nos lados da caixa de isopor, (g) sistema fechado dos reatores 1 e 2, (h) reator 3, (i) reator 3 dentro de sua caixa de isopor.	45
Figura 12: Etapas de colheita da biomassa (a) biomassa floculada antes da remoção do sobrenadante restante, (b) biomassa após a centrifugação.	47
Figura 13: Purificação do biogás (a) por deslocamento do hidróxido de sódio [49], (b) por deslocamento do hidróxido de sódio empregando um frasco de Mariotte [91], (c) esquema do sistema utilizado, (d) vista real do sistema empregado (antes de colocar o reator dentro do isopor).	51
Figura 14: Produção de biometano acumulado (a) nos reatores R1, R2, e R3 nos primeiros 30 dias de operação, (b) gerado só pelas microalgas nos reatores R1 e R2 após 30 dias da primeira carga.	53
Figura 15: Produção líquida diária de biometano nos reatores R1 e R2 após 30 dias da primeira alimentação. .	55
Figura 16: Demanda química de oxigênio por semana para cada reator.....	60
Figura 17: Níveis de pH por semana para cada reator.	63
Figura 18: Reator projetado para seu uso em escala real.	72
Figura 19: Características de dimensionamento do reator projetado para seu uso em escala real.	73
Figura 20: Características de dimensionamento do reator com 1200 (mm) de diâmetro interno (DRI).	77
Figura 21: Válvula de segurança.....	81
Figura 22: Filtro do biogás.	81
Figura 23: Sistemas de drenagem entre o reator e a cozinha, (a) curta distância, (b) longa distância.....	83
Figura 24: Reservatório do biogás, (a) construção, (b) estrutura para proteção contra chuva.	85
Figura 25: Condução do biogás desde o reator até seu destino final.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reatores para gerar biogás a partir de biomassa vegetal e esterco de gado.	13
Tabela 2: Reatores para gerar biogás a partir do tratamento de esgoto.	14
Tabela 3: Componentes principais em porcentagem de matéria seca de alimentos convencionais e algumas espécies de microalgas.	17
Tabela 4: Produção de biometano por espécie de microalga.	19
Tabela 5: Comparação de diferentes matérias-primas para gerar biodiesel em função da quantidade produzida e da área de terra requerida.	25
Tabela 6: Dimensões dos protótipos construídos.	44
Tabela 7: Relação entre o volume de reatores, sua quantidade de biomassa e inóculo utilizado segundo diferentes publicações.	48
Tabela 8: Quantidade de biomassa, inóculo, e água, carregados a cada reator.	49
Tabela 9: Quantidade de biometano gerado por reator.	55
Tabela 10: Entrada e saída de material orgânico no reator R3.	56
Tabela 11: Entrada e saída de material orgânico no reator R1.	57
Tabela 12: Entrada e saída de material orgânico no reator R2.	59
Tabela 13: Quantidade de biometano gerado por reator a partir da degradação da demanda química de oxigênio.	61
Tabela 14: Quantidade em porcentagem de biomassa da espécie <i>chlorella s.p.</i> (Q1) para diferentes co-substratos obtendo relações C/N iguais a 15, 20 e 30.	65
Tabela 15: Requerimento de biogás para uma família que mora numa área rural segundo algumas publicações.	66
Tabela 16: Biomassa de esterco de gado bovino requerida para produzir 8.750 litros de biogás por semana segundo algumas publicações.	69
Tabela 17: Dimensões do reator em escala real.	74
Tabela 18: Dimensões de biorreatores em escala real em função às variações do diâmetro do reator interno considerando o mesmo volume útil de material orgânico de 3.937,9 litros.	75
Tabela 19: Estimação da quantidade de materiais de construção requeridos para os reatores, a câmara <i>headspace</i> , e as câmaras de carga e descarga.	88
Tabela 20: Custos de investimento em materiais e mão de obra para a construção do reator em (R\$).	88
Tabela 21: Custos de investimento para diferentes biodigestores empregados em áreas rurais.	90

SUMÁRIO

RESUMO	IV
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO GERAL	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	5
3.1 DEFINIÇÃO DE BIOGÁS	5
3.2 PROCESSO DE GERAÇÃO DO BIOGÁS	6
3.2.1 Fatores Que Influenciam a Digestão Anaeróbia	8
3.2.2 Subprodutos da Geração de Biogás	11
3.3 TIPOS DE REATORES	12
3.3.1 Reatores que Empregam Biomassa Vegetal e/ou Esterco de Animais	12
3.3.2 Reatores Para o Tratamento de Esgoto	13
3.4 MICROALGAS COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A GERAÇÃO DE BIOGÁS	15
3.4.1 Características das Microalgas	16
3.4.2 Aspectos Gerais das Microalgas Para a Produção de Biogás	19
3.5 FONTES FORNECEDORAS DA MATÉRIA-PRIMA	20
3.5.1 Biorrefinaria de Microalgas	20
3.5.2 Biodiesel a Partir de Microalgas	24
3.5.3 Biomassa de Microalgas Utilizada Exclusivamente para Geração de Biogás	27
4 MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1 DETERMINAÇÃO DO TIPO DE REATOR	32
4.1.1 Identificação dos Quatro Modelos de Reatores	32
4.1.2 Projeto do Protótipo de Reator para Microalgas	33
4.1.3 Eleição do Protótipo mais Adequado	39
4.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO PROTÓTIPO DE REATOR	40
4.3 TESTES REALIZADOS	41
4.3.1 Disponibilidade do Inóculo	41
4.3.2 Disponibilidade da Biomassa e Capacidade do Protótipo	42
4.3.3 Construção dos Reatores	43
4.3.4 Planejamento da Produção e Número de Experimentos	46
4.3.5 Colheita e Análise da Biomassa	46
4.3.6 Quantidades de Carga de Material Orgânico aos Reatores	48
4.3.7 Purificação e Quantificação do Biometano Gerado	50

4.3.8	Quantificação da Demanda Química de Oxigênio (DQO), e Níveis de pH no Afluente e Efluente.....	51
4.3.9	Estimativa do Conteúdo de Carbono e Nitrogênio na Biomassa da Microalga <i>Chlorella sp.</i> Empregada nos Testes	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES	52
5.1.1	Produção de Biometano nos Reatores.....	52
5.1.2	Balanco de Massa	55
5.1.3	Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	60
5.1.4	Níveis de pH Alcançados nos Testes.....	62
5.1.5	Relação Carbono Nitrogênio (C/N)	63
5.2	ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO DO REATOR	65
5.2.1	Escala de Produção.....	66
5.2.2	Matéria-Prima Necessária para a Produção em Escala Real.....	67
5.2.3	Instalações Requeridas.....	70
5.3	AVALIAÇÃO ECONÔMICA	86
5.3.1	Investimento dos Materiais e Mão de Obra na Construção do Reator.....	86
5.3.2	Custos em Operação e Manutenção.....	86
5.3.3	Comparação de Investimento Frente a Outros Reatores	87
5.4	OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO, SEGURANÇA E PLANOS DE CONTINGÊNCIA.....	91
5.4.1	Modo de Preparação, Carga e Descarga do Material Orgânico	91
5.4.2	Monitoramento da Válvula de Segurança	93
5.4.3	Troca da Palha de Aço	93
5.4.4	Monitoramento do Sistema de Dreno.....	94
5.4.5	Operação do Reservatório	94
5.4.6	Uso do Biogás	95
5.4.7	Precaução no Equilíbrio Hidrodinâmico nas Câmaras de Carga e Descarga.....	95
5.4.8	Risco de Fogo no Conduto que Conduz o Biogás.....	96
6	CONCLUSÕES	97
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a bibliografia [1–3], nas últimas décadas o mundo duplicou sua quantidade de habitantes, o que leva a um incremento na demanda de recursos tanto energéticos como alimentícios, motivando assim um maior consumo de produtos, que impactam os ecossistemas, principalmente porque a maioria deles emprega matérias-primas de fontes não-renováveis. Adicionalmente, estes produtos depois de um tempo relativamente curto são descartados, poluindo o meio ambiente, e causando as mudanças climáticas antropogênicas. Essa demanda de produtos, motiva às indústrias a produzirem em quantidades cada vez maiores, aumentando a emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, que na atualidade já ultrapassou os limites permitidos, chegando a 400 partes por milhão [4], sendo as indústrias responsáveis por 70% destas emissões [5].

Na atualidade, os habitantes que moram em regiões isoladas e áreas rurais, possuem um acesso escasso a combustíveis convencionais, pelo que para melhorar sua qualidade de vida, precisam de acesso a recursos energéticos, devido a que utilizam lenha e outros elementos para suas atividades domésticas, mesmos que na combustão geram fumaça que é prejudicial para seu organismo ocasionando doenças, e danos físicos. Segundo estudos realizados no Brasil [6], devido à falta de um sistema de coleta de lixo, 60% dos moradores em áreas rurais queimam ou enterram o lixo dentro de suas propriedades, o qual impacta no meio ambiente.

Os gases de efeito estufa contribuem ao aquecimento global, causando variações da temperatura em todo o mundo resultando em mudanças climáticas [7]. Como um desses gases é o CO₂, desenvolveram-se técnicas de captura de carbono [8], entre elas o cultivo de microalgas [9], as quais têm o potencial de capturar CO₂ da atmosfera, com uma capacidade dez vezes maior que as plantas terrestres [10], podendo ser utilizadas como alternativa no tratamento de efluentes industriais, minimizando impactos ao meio ambiente, e diminuindo a quantidade de gases de efeito estufa.

As microalgas podem crescer numa ampla variedade de ambientes aquáticos, desde água doce até extremamente salgada, podem suportar

temperaturas altas, diferentes luminosidades, e variações de pH. Sua biomassa pode ser usada para a geração de vários produtos como bicombustíveis (biodiesel, bioetanol, biohidrogênio, e biogás), pigmentos e outros subprodutos que podem ser utilizados como suplementos alimentares, cosméticos, e compostos para uso farmacêutico [11,12]. Por suas características de cultivo e crescimento, não requerem grandes extensões de terra, seus rendimentos são superiores em comparação com outras matérias-primas, e podem ser coletadas várias vezes ao ano. No entanto, também têm inconvenientes que ainda estão sujeitos a avaliação, como o custo de cultivo e a colheita, e o balanço energético [13].

Aproveitando as potencialidades das microalgas, atualmente têm-se pesquisas realizadas no Semi Árido Brasileiro [14], que devido às condições climáticas, essa região isolada possui grandes quantidades de terreno não apto para o cultivo tradicional, além de possuir quase um 10% da população Brasileira. Nesse estudo, foi comprovada a possibilidade de cultivar microalgas nessa região para diversos fins, permitindo a geração descentralizada de emprego com o consequente aumento na qualidade de vida da população. Para isso foi considerado o emprego de águas salobras como médio de cultivo, esgoto como fonte de nutrientes, e a alimentação de CO₂ produzido pelas usinas que geram etanol na região. É assim que a biomassa residual pode ser uma alternativa promissória para produzir biogás.

Outro exemplo da aplicação das microalgas na produção de biogás é a Ecovila Songhai, localizada em Porto Novo, na capital de Benin (África), em que eles cultivam as microalgas naturalmente em estanques, que eliminam os patógenos, e fixam o CO₂ do biogás gerado a partir de diferentes tipos de biomassa, obtendo assim, biometano que logo depois é comprimido e armazenado em tanques de gás, capazes de fornecer energia à Ecovila junto com outras fontes de bioenergia [15].

Com a finalidade de aproveitar a biomassa de microalgas como matéria-prima para a geração de biogás nas áreas rurais, no presente trabalho, tomou-se como ponto de partida a construção e operação de um protótipo de reator em escala piloto, para avaliar o nível de produção de metano empregando biomassa mista com predominância da microalga *Chlorella sp.* Posteriormente foi projetado um reator em escala real, considerando a demanda energética de uma família composta por cinco

pessoas, que empregam um fogão de duas bocas cinco horas cada dia. Dessa forma, foi estimada a quantidade de alimentação, e os materiais de construção. Adicionalmente, foram comparados os custos de construção com outros tipos de reatores empregados em áreas rurais.

Finalmente é apresentado um breve manual de operação, manutenção e segurança do protótipo de reator projetado, visando no fornecimento de energia e subprodutos naturais para os habitantes das áreas rurais, e na conservação do meio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Projetar, construir, testar, e validar um reator para geração de biogás utilizando biomassa microalgal para uso e benefício nas comunidades rurais.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar um reator considerando as variáveis incidentes para seu correto funcionamento em comunidades rurais.
- Avaliar a quantidade e qualidade do gás produzido.
- Identificar a relação carbono nitrogênio (C/N) para a digestão da biomassa microalgal empregada, e fazer uma prospecção na literatura identificando co-substratos que possam melhorar dita relação.

3 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

3.1 DEFINIÇÃO DE BIOGÁS

O biogás é um gás composto por metano (55% a 75% em volume) e dióxido de carbono (25% a 45% em volume), e contém também mínimas quantidades de outros gases, entre eles cerca de 1% de sulfeto de hidrogênio (H_2S). Ele é um gás um pouco mais leve que o ar, possui uma temperatura de ignição de $700^{\circ}C$, e sua chama pode alcançar temperaturas até cerca de $870^{\circ}C$. Cabe mencionar que com um conteúdo de metano inferior a 50% o biogás deixa de ser inflamável. O poder calorífico médio de um metro cúbico de biogás é de cinco mil quilocalorias (este valor pode variar a depender de sua composição), aproximadamente o equivalente à energia gerada por 500mL de petróleo [16,17].

O biogás é produzido a partir da degradação de matéria orgânica em ausência de ar, e geralmente ele pode ser utilizado diretamente em queimadores, fogões, estufas, para iluminação, assim como também pode ser adequado como combustível em máquinas de combustão interna, ou seja, motores, para gerar energia elétrica numa produção de média ou grande escala de biogás [18,19].

Dentre suas principais vantagens, o biogás pode proporcionar energia do tipo térmica ou elétrica, no seu processo de produção a biomassa empregada é quase completamente digerida ou degradada, e com isso fornece adubo ou fertilizantes orgânicos, que são utilizados na recuperação de solos por seu alto conteúdo de nutrientes (p. ex. nitrogênio). No caso de utilizarem-se resíduos domésticos ou outro tipo de resíduo orgânico como biomassa, a produção de biogás reduz a quantidade de materiais orgânicos descartados e destinados para serem queimados, enterrados ou jogados em aterros sanitários.

Na produção de biogás, deve-se levar em consideração os seguintes aspectos: utilizar todo o biogás gerado para evitar a emissão deste gás para o meio ambiente já que como ele contém metano e dióxido de carbono pode contribuir ao efeito estufa; como também é produzido sulfeto de hidrogênio o qual é tóxico e corrosivo, o biogás deve ser adequadamente tratado de modo que não danifique os condutos nem esteja em contato direto com pessoas e animais [20].

3.2 PROCESSO DE GERAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás é produzido por grupos de bactérias fermentativas hidrolíticas, bactérias fermentativas acidogênicas, bactérias acetogênicas e pelas *archaeas* metanogênicas que decompõem o material orgânico, ao que se denomina processo de fermentação anaeróbia, já que ele é produzido na ausência de oxigênio. De uma forma geral, pode-se obter biogás a partir de qualquer material orgânico composto principalmente de carbono e nitrogênio, e a relação entre ambos é um dos fatores mais importantes para a produção de biogás. Comumente se empregam resíduos sólidos ou líquidos como esterco de gado, dejetos de resíduos de matadouros, agrícolas ou de indústrias alimentícias, e lodo de plantas de tratamento de águas. Materiais não orgânicos como metais, celulose, vidro, e outros, não são digeridos ou modificados durante o processo de fermentação, de modo que eles se tornam inapropriados para a obtenção de biogás [16].

Na Figura 1 são apresentadas algumas das vantagens da digestão anaeróbia.

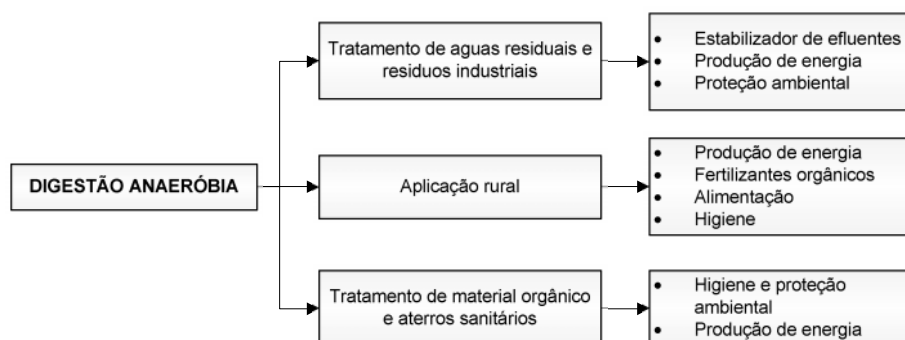


Figura 1: Benefícios da digestão anaeróbia.
Fonte: Adaptado de [21]

O processo de fermentação é levado a cabo por populações microbianas heterogêneas envolvidas nas interações biológicas no substrato, e esse processo é composto por quatro etapas (hidrólise, acidogênese, acetogênese, e metanogênese), em que se formam amoníacos, ácidos graxos e álcool a partir de proteínas e hidratos de carbono dissolvidos, passando por uma etapa em que são gerados acetatos, hidrogênio e dióxido de carbono, até finalmente obter os produtos principais, metano e dióxido de carbono [17,22].

As quatro etapas de produção de biogás, segundo [23–25] podem ser

detalhadas da seguinte forma:

- a) Hidrólise.** Essa primeira etapa do processo de degradação anaeróbia consiste em “quebrar” ou dissolver os materiais complexos particulados (proteínas, hidratos de carbono e lipídeos), obtendo assim elementos mais simples através da ação de exo-enzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Nesse caso as proteínas são degradadas até se converter em aminoácidos, os carboidratos são convertidos em açúcares solúveis como mono ou dissacarídeos, e por último os lipídeos são convertidos em ácidos graxos de cadeias longas e glicerol.
- b) Acidogênese.** Os produtos da etapa anterior são metabolizados e convertidos em compostos ainda mais simples como ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, entre outros. Esta etapa demanda energia e é possível devido a sua relação simbiótica com as etapas consequentes. As vias bioquímicas pelos quais o substrato é fermentado depende principalmente do tipo de substrato, e da pressão parcial de hidrogênio.
- c) Acetogênese.** As bactérias acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário que geram substrato para a etapa metanogênica, já que elas possibilitam a oxidação dos produtos gerados na fase anterior. De todos os produtos metabolizados nesta fase, somente o hidrogênio, dióxido de carbono, e o acetato podem ser aproveitados na fase metanogênica para a produção de metano.
- d) Metanogênese.** Os compostos orgânicos chegam a produzir metano e dióxido de carbono, mas a depender da rota química esta etapa pode ser dividida em dois grupos, o primeiro é aquele que produz entre 60% a 70% de metano a partir do acetato e ácido acético, e o segundo aproveita o hidrogênio e o dióxido de carbono para gerar o restante 40% ou 30% de metano. Esses grupos são também denominados como etapas metanogênicas, acetoclásticas e hidrogenotróficas.

Todas as etapas para a digestão anaeróbia são apresentadas na Figura 2.

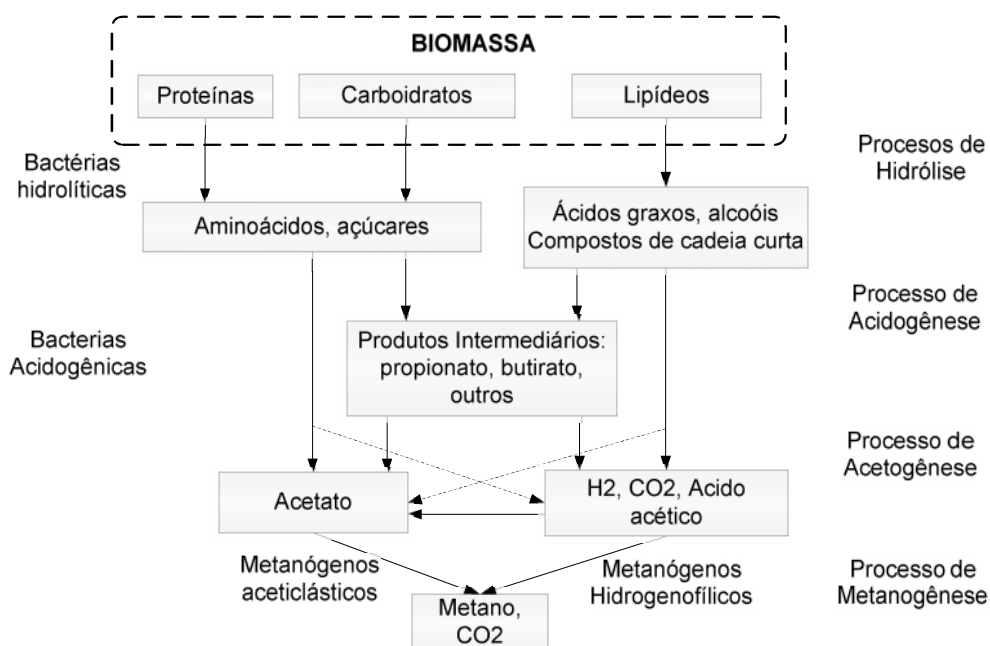


Figura 2: Processo de fermentação da matéria orgânica.
Fonte: Adaptado de [22]

3.2.1 Fatores Que Influenciam a Digestão Anaeróbia

Segundo as seguintes referências [16,19,23,26–28], todo processo biológico da digestão anaeróbia deve ser controlado, pois existem diversos fatores que influenciam consideravelmente no sucesso ou não da mesma. Um desequilíbrio em algum dos fatores pode provocar a ruptura do equilíbrio entre as comunidades microbianas e, por conseguinte o não funcionamento do reator, a baixa produção de biogás, e o inadequado tratamento da biomassa. Dentre esses fatores estão:

- ✍ **Temperatura.** Esse fator é muito importante para a velocidade de produção do biogás, pois a temperatura está relacionada com o metabolismo e reprodução das bactérias fermentativas, de modo que a temperatura influi na degradação do material orgânico. Recomenda-se mantê-la constante, para que as bactérias não diminuam sua atividade dentro do reator.

- ✍ **Pressão Parcial de Hidrogênio.** As reações bioquímicas nas bactérias metanogênicas, contribuem para a redução da pressão parcial de hidrogênio, viabilizando as etapas anteriores do processo de degradação anaeróbia. Por tal motivo, é importante que dita pressão deva ser igual ou menor a 10^{-3} atm.
- ✍ **Relação Carbono/Nitrogênio (C/N).** Para que o processo se realize eficientemente, o material orgânico introduzido deve ter uma relação carbono/nitrogênio aproximadamente de 30/1, devido ao fato de que as bactérias consomem trinta vezes mais carbono que nitrogênio.
- ✍ **Acidez.** O excesso de acidez no reator pode eliminar as bactérias, por isso deve-se controlar adequadamente a acidez nas misturas e a preparação da matéria-prima, medindo o pH do material dentro do reator. Geralmente aceita-se que os valores ótimos de pH estejam em torno de 7,0, não devendo ultrapassar um valor máximo de 8,5, e os valores ideais entre 6,8 a 7,2.
- ✍ **Ausência de Oxigênio.** O oxigênio possibilita o surgimento de microrganismos que dificultam o processo de fermentação, assim é importante evitar a entrada de ar ou de alguma outra fonte de oxigênio ao sistema para efetivar a geração de biogás de modo que o processo seja o mais anaeróbico possível.
- ✍ **Área Superficial Específica.** As bactérias requerem um contato máximo com o substrato para degradá-lo por completo. Esse critério deve ser levado em consideração no desenho do sistema reacional.
- ✍ **Substâncias Inibidoras.** Deve evitar-se a entrada no reator de substâncias que prejudiquem os mecanismos enzimáticos como: polissacarídeos, nitrogênio, enxofre junto com o hidrogênio, monóxido de carbono, cobre, metais pesados, antibióticos, e detergentes, que em determinadas concentrações podem inibir ou até interromper o processo de fermentação.

- ✍ **Concentração de Sólidos.** As condições recomendadas de operação sugerem baixos teores de sólidos, o que significa que a biomassa mais adequada deve ter altos conteúdos de umidade. A fluidez do material de fermentação é importante para obter um processo de fermentação mais eficiente, e uma maior produção de biogás. No meio líquido as bactérias chegam com maior facilidade ao material de fermentação fresco, acelerando o processo, mas cabe mencionar que o nível de fluidez depende do tipo de biomassa e do tipo de reator utilizado.

- ✍ **Tempo de Retenção.** Esse fator é o tempo que de mora a biomassa para ser completamente degradada dentro do reator anaeróbio, ele é determinado pela taxa de reprodução das bactérias. Está diretamente relacionado com o tipo de substrato, e é inversamente proporcional à temperatura do meio, ou seja, numa maior temperatura tem-se um menor tempo de retenção, devido a que o calor favorece a decomposição do material orgânico demorando menos tempo em ser degradado.

- ✍ **Agitação e Mistura.** A agitação é importante para a remoção dos metabólitos produzidos; além disso, misturando-se o substrato fresco com a população bacteriana se estabiliza sua densidade, evitando a formação de uma crosta dentro do reator, e espaços mortos sem atividade biológica.

A formação de gás, em geral depende fundamentalmente da atividade bacteriana, assim como também do tipo e características da matéria-prima utilizada, da operação e manutenção do reator.

Segundo as afirmações feitas por [19,29], os sólidos totais e voláteis podem ser definidos como:

- ✍ **Sólidos Totais.** Os sólidos totais representam a massa da biomassa seca (no presente trabalho, biomassa de microalgas) ou seja, é a carga real de matéria sólida que é alimentada ao biodigestor.

✍ **Sólidos Voláteis.** Representam uma parte dos sólidos totais que estão sujeitos são volatilizados num processo de calcinação. É importante considerar a quantidade de sólidos voláteis que são convertidos em biogás no processo de digestão anaeróbia.

3.2.2 Subprodutos da Geração de Biogás

Por meio do processo de obtenção do biogás, são gerados dois subprodutos, que são tão importantes quanto o biogás: um deles é um líquido chamado biol, o qual pode ser utilizado como fertilizante orgânico líquido por sua riqueza em nutrientes, e o outro subproduto é um fertilizante lodoso onde fica a maior quantidade da matéria sólida, esse efluente é chamado biosol, o qual pode ser utilizado diretamente nos cultivos, ou também pode ser seco para seu posterior uso, já que é um excelente estabilizador e muito útil para a recuperação de solos deteriorados. Os subprodutos ajudam no equilíbrio da natureza com elementos como o nitrogênio e prevenindo a erosão, além de melhorar o rendimento dos cultivos [19,20].

Segundo [27], o adubo orgânico que resulta da fermentação anaeróbica tem as seguintes vantagens:

- Dificulta a multiplicação de fungos e patógenos.
- Recupera as estruturas e textura do solo.
- Não fermenta mais, ou seja, não produz ácido oxálico, que é tóxico para as plantas.
- Não dá condições para a multiplicação de insetos, moscas e bactérias.
- O biol é diretamente irrigado aos cultivos.
- Aproveitam-se racionalmente, recursos que muitas vezes são rejeitados.
- Favorece o desenvolvimento de microrganismos.
- Facilita a absorção da água pelo terreno.
- Facilita a aeração do solo.
- Retém por mais tempo a umidade.
- Adiciona nitrogênio ao solo.

3.3 Tipos de Reatores

A instalação destinada à produção de biogás recebe o nome de biorreator ou biodigestor, no qual se realiza todo o processo de fermentação da biomassa. Existem vários tipos e formas dessas unidades, em função do tipo de biomassa, da quantidade de biogás requerido, e dos materiais de construção empregados.

Em relação ao presente trabalho, serão apresentados vários tipos de reatores que empregam biomassa, tais como: resíduos vegetais, esterco de animais de granja e águas residuais.

3.3.1 Reatores que Empregam Biomassa Vegetal e/ou Esterco de Animais

Segundo [16], dependendo do modo de carga da biomassa e dos períodos nos quais se realizam o carregamento, os reatores podem ser do tipo fluxo contínuo ou de batelada.

- a) **Reatores de fluxo contínuo.** Nesses tipos de reatores, o material orgânico é carregado e ao mesmo tempo o efluente digerido é descarregado parcialmente todos os dias, de forma periódica e permanente.
- b) **Reatores em batelada.** Estes reatores são carregados completamente, ocupando todo o volume disposto para biomassa, até que é descarregado de forma total ou parcial depois de certo tempo, sendo assim a entrada de matéria orgânica é intermitente.

Estes tipos de reatores (em batelada ou fluxo contínuo) na atualidade estão sendo aplicados em comunidades rurais e em países subdesenvolvidos, com a finalidade de se obter um benefício duplo, mitigando a problemática energética e ambiental, utilizando eficientemente os resíduos orgânicos [21]. Na Tabela 1 são apresentados os tipos de reatores mais comuns empregados atualmente.

Tabela 1: Reatores para gerar biogás a partir de biomassa vegetal e esterco de gado.

Reator	Desenho	Características
De cúpula flutuante (Batelada)		<ul style="list-style-type: none"> - Alimentação contínua. - Armazena o biogás numa cúpula flutuante metálica. - É de fácil construção mantendo a pressão do biogás uniforme. - Pode digerir esterco animal e resíduos vegetais. - Para evitar a oxidação da cúpula, essa deve ser pintada regularmente.
De balão (Fluxo contínuo)		<ul style="list-style-type: none"> - Alimentação contínua. - Armazena o biogás num balão de plástico. - É de fácil construção e controle da pressão do biogás. - Recomendável para digerir esterco de animal. - Produção em pequena e média escala.
De cúpula fixa (Batelada)		<ul style="list-style-type: none"> - Alimentação contínua, podendo armazenar o efluente. - Armazena o biogás numa cúpula de material fixo. - Sua construção é numa fossa escavada que apresenta um bom isolamento. - Pode digerir esterco animal e dejetos vegetais. - Produz quantidades de biogás, em média e grande escala. - A pressão do biogás é variável no tempo. - Não tem um sistema de mistura do material orgânico dentro do reator.

Fonte: Autoria própria com base em [16,19,30,31]

3.3.2 Reatores Para o Tratamento de Esgoto

Além dos reatores apresentados, existem outros tipos de reatores empregados comumente para o tratamento de águas residuais, segundo [23] estes sistemas podem ser divididos nos seguintes grupos:

- Sistemas convencionais.** Esses são aqueles reatores operados com baixas cargas orgânicas volumétricas, não dispõem de mecanismos de retenção de grandes quantidades de biomassa, o que implica em tempos de retenção elevados e, por conseguinte volumes maiores para os reatores.
- Sistemas de alta taxa.** Esses tipos de reatores têm tempos de retenção hidráulicos menores quando comparados aos sistemas convencionais,

devido aos mecanismos de retenção de biomassa, a depender do tipo de crescimento bacteriano. Esses sistemas podem ser divididos em dois grupos, um de crescimento disperso, e outro de crescimento aderido.

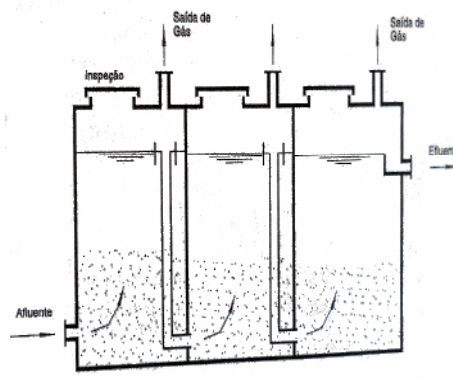
Os tipos de reatores mais representativos pertencentes a estes tipos de sistemas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Reatores para gerar biogás a partir do tratamento de esgoto.

Reator	Desenho	Características
Anaeróbio de lodo (Sistema convencional)		<ul style="list-style-type: none"> - São utilizados para a estabilização de lodos primários e secundários com elevada concentração de material particulado. - Podem ser aplicados no tratamento de efluentes industriais. - São construídos com concreto armado em forma de tanques circulares, seu diâmetro pode variar entre 6 a 38 metros e sua profundidade pode ser de 7 a 14 metros. - Nos países de clima temperado, precisa-se de um aquecedor para manter a temperatura na faixa de 25 a 35°C
Tanque séptico (Sistema convencional)		<ul style="list-style-type: none"> - É uma unidade moldada ou pré-moldada <i>in loco</i>. - São utilizados geralmente para o tratamento primário de esgotos de residências. - Tem as funções de sedimentação e remoção de materiais flutuantes. - Não tem sistema de mistura nem aquecimento. - O efluente deve ser conduzido a uma unidade de pós-tratamento ou disposição final.
De dois estágios (Sistema de alta taxa)		<ul style="list-style-type: none"> - É utilizado para o tratamento de despejos industriais concentrados. - É composto por um tanque de mistura completa (reator anaeróbio) seguido de um dispositivo de separação de retorno de sólidos. - Emprega um misturador mecânico que utiliza energia externa. - A função desse sistema é aproveitar ao máximo a biomassa e afluentes não digeridos no reator e retornados ao mesmo. - O principal problema é a flutuação da biomassa no dispositivo fazendo com que o lodo não retorne ao reator.

De chicanas

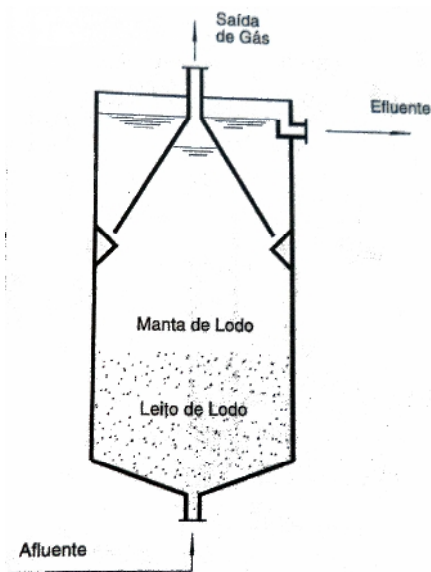
(Sistema de alta taxa)



- É similar a um tanque séptico dividido por várias câmaras.
- Tem condutos que impõem ao líquido um movimento sequencial entre as câmaras.
- Garante um maior contato do despejo com a biomassa no fundo de cada câmara.
- Tem vantagens similares em relação ao reator UASB, além de que este sistema não precisa de um separador de gases, o que representa menores profundidades requeridas na construção.
- A depender da variabilidade na vazão do aflente, pode ou não existir perdas de sólidos suspensos.
- Requer de uma grande área para sua instalação.

De fluxo ascendente e manta de lodo – UASB

(Sistema de alta taxa)



- O aflente é alimentado pela parte inferior do reator para que esse possa ascender através de um leito de lodo de elevada atividade.
- Os sólidos dentro do reator variam desde partículas granulares de elevada capacidade de sedimentação (leito do lodo) até um lodo mais leve (manta de lodo).
- A mistura do sistema ocorre pelo fluxo ascendente do esgoto e das bolhas de biogás.
- Na parte superior tem um dispositivo de separação de gases e sólidos.
- Não requer a implantação de equipamento sofisticado ou meios de suporte para a retenção da biomassa.
- Na parte da saída do efluente existe a possibilidade de emanação de odores.
- O efluente requer uma etapa de pós-tratamento.
- O principal problema é que rejeita dentre 10 a 30% do material orgânico não digerido como parte do efluente.

Fonte: Autoria própria com base em [23]

3.4 MICROALGAS COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A GERAÇÃO DE BIOGÁS

As microalgas são um conjunto heterogêneo de microrganismos fotossintéticos unicelulares procariontes (cianobactérias) e eucariontes. Elas podem crescer em diversos habitats tais como águas marinhas, doces, extremamente salinas, em efluentes residuais domésticos ou industriais, a sua área de cultivo é relativamente pequena em comparação com os cultivos convencionais, além de suportarem uma grande variação de temperatura, pH e disponibilidade de nutrientes.

As microalgas são consideradas responsáveis pela produção de 50% do oxigênio e da fixação de 50% do carbono no planeta, sendo assim, podem fixar entre 10 a 50 vezes mais CO₂ em comparação com as plantas terrestres. A diversidade das microalgas é enorme, foram identificadas aproximadamente 40.000 espécies, mas ainda se estima que existem 100.000, classificadas de acordo com vários parâmetros, tais como pigmentação, ciclo de vida, morfologia, e estrutura celular.

Desde a antiguidade, as microalgas são usadas como alimento humano, no entanto, apenas recentemente tem sido atraída a atenção para a pesquisa de seu potencial biotecnológico. Atualmente, as microalgas têm várias aplicações, tais como o cultivo de espécies aquáticas, vegetais e animais, em meios naturais e artificiais, o tratamento de águas residuais, geração de suplementos alimentares, obtenção de substâncias químicas, extração de pigmentos, antioxidantes, vitaminas, produção de suplementos farmacêuticos, e obtenção de vários tipos de biocombustíveis como biodiesel, bioetanol, biohidrogênio, e biogás [32–37].

Em termos gerais as vantagens das microalgas em relação à biomassa terrestre são: a alta produtividade por área, o não uso de cultivos aráveis, uma grande variedade de meios de cultivo, a não utilização de pesticidas, e a particularidade energética, pois o óleo produzido pode servir para gerar biocombustíveis e outros produtos. Sua única desvantagem importante é o custo do cultivo e colheita da biomassa, operações que na atualidade estão sendo estudadas e aperfeiçoadas em diversos centros de pesquisa [38].

3.4.1 Características das Microalgas

Segundo [34,36,39,40], a biomassa de microalgas é constituída por 20 a 30% de lipídeos, 40 a 50% de proteínas, ácidos graxos poliinsaturados e pigmentos, e o restante é composto por hidratos de carbono (algumas espécies têm a capacidade de armazenar até 50 % de seu peso seco em carboidratos). A Figura 3 apresenta um esquema geral contendo algumas características dos componentes das microalgas, importantes para se obter uma ampla visão das aplicações e da geração de diversos produtos. Por exemplo, o conteúdo de carboidratos nas microalgas é

considerado como uma carga de alimentação apropriada para o crescimento microbiano e a geração de produtos de fermentação, e por outro lado o conteúdo de lipídeos torna a biomassa de microalgas uma alternativa promissora para a produção de biodiesel [41].

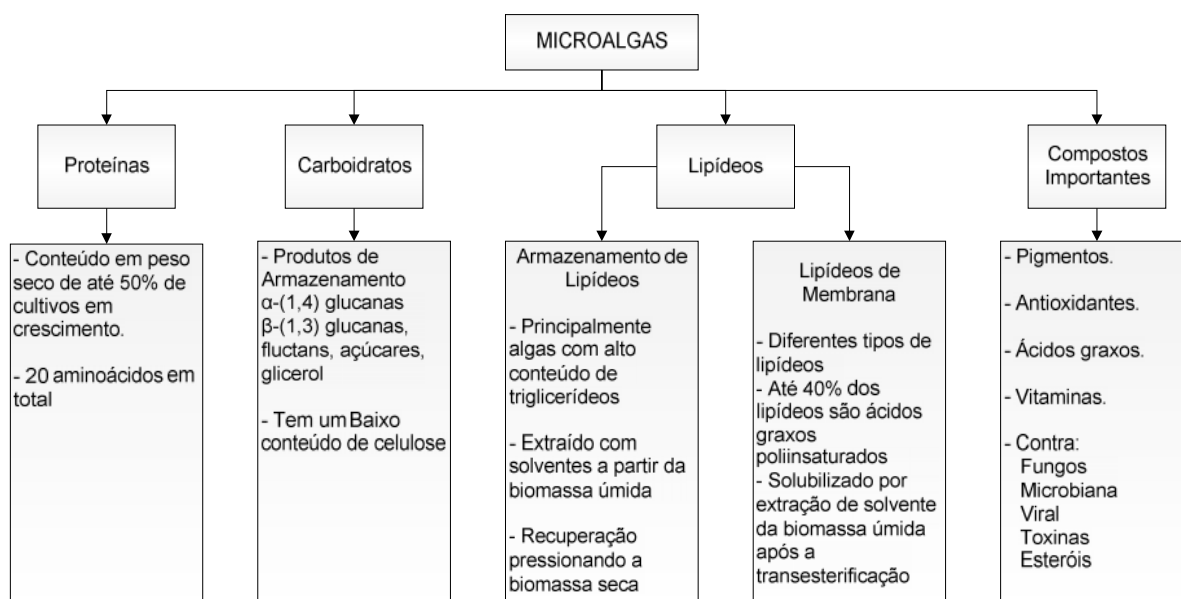


Figura 3: Composição das microalgas.

Fonte: Adaptado de [42]

Com a finalidade de identificar a competitividade de algumas espécies de microalgas, comparando os principais componentes frente a alguns alimentos convencionais, a Tabela 3 apresenta as porcentagens de proteínas, carboidratos e lipídeos.

Tabela 3: Componentes principais em porcentagem de matéria seca de alimentos convencionais e algumas espécies de microalgas.

Produto	Proteína Crua (% matéria seca)	Carboidratos (% matéria seca)	Lipídios (% matéria seca)
Soja	37	30	20
Milho	10	85	4
Trigo	14	84	2
Carne	43	1	34
Leite	26	38	28
Farinha de peixe	55	0	38
<i>Chlorella vulgaris</i>	51 a 58	12 a 17	14 a 22
<i>Chlorella sp.</i>	56	22	21
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Nannochloropsis sp.</i>	64	19	29 a 68
<i>Euglena gracilis</i>	39 a 61	14 a 18	14 a 20
<i>Porphyridiumcruentum</i>	28 a 39	40 a 57	9 a 14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50 a 56	10 a 17	12 a 14
<i>Spirogyra sp.</i>	6 a 20	33 a 64	11 a 21

Fonte: Autoria própria com base em [32,43–45]

Além das vantagens mencionadas anteriormente, segundo [39] as microalgas também têm as seguintes características:

- Devido a sua capacidade fotossintética podem alcançar grandes rendimentos (até 8%, quatro vezes maior que a média dos vegetais) somente com energia solar, uma fonte de carbono, e nutrientes de fácil disponibilidade.
- Algumas espécies podem crescer em ambientes diferentes, em presença ou ausência de luz, adversos para muitos outros organismos vegetais, devido à variedade excepcional de lipídeos e de outros compostos que conformam as microalgas.
- Dentre os grupos de organismos fotossintéticos, as microalgas são mais eficientes em utilizar a energia solar, por exemplo, as plantas superiores apresentam uma eficiência fotossintética aproximada de até 2%, mas as microalgas por sua simplicidade estrutural podem alcançar de 4% a 8%, sendo assim mais eficientes que qualquer planta terrestre.
- Pelo seu ritmo de crescimento, as microalgas podem ser cultivadas várias vezes ao ano, e colhidas periodicamente.
- Os cultivos de microalgas têm um consumo de água menor que a requerida pelos cultivos tradicionais, e posteriormente pode ser reutilizada para irrigação.
- As microalgas crescem de maneira exponencial, propriedade que nenhum vegetal tem já que as plantas necessitam de tempos longos de crescimento.
- Por serem organismos unicelulares, sua biomassa possui todos os compostos desejados (lipídeos, carboidratos, etc.) para a geração dos produtos de interesse (sejam ou não biocombustíveis), os quais podem ser efetivamente extraídos.

3.4.2 Aspectos Gerais das Microalgas Para a Produção de Biogás

A biomassa de microalgas pode ser processada de diferentes formas para obter diversos biocombustíveis. O cultivo anaeróbio pode resultar em produtos como biohidrogênio e biogás, e a partir da extração de compostos líquidos podem-se obter biodiesel e bioetanol [17]. Até agora, tem-se demonstrado bons resultados na produção de biometano a partir da fermentação anaeróbia da biomassa de microalgas, obtendo-se uma maior eficiência em comparação com outras fontes de biomassa [46]. Por diversos estudos realizados [17,29,47], as quantidades de biometano produzido por distintas espécies de microalgas, estão entre 140 e 650 (mL CH₄/g SV). O nível de produção de biogás além dos fatores mencionados no item 3.2.1 (Fatores que influem na digestão anaeróbia), também está relacionado com as variações em conteúdo de proteínas, lipídeos, carboidratos e a estrutura das paredes celulares que caracterizam às diferentes espécies de microalgas. A Tabela 4 apresenta algumas quantidades de biometano gerado a partir de biomassa de diferentes espécies de microalgas.

Tabela 4: Produção de biometano por espécie de microalga.

Espécie de microalga	Produção de metano (mL CH ₄ / g SV)
<i>Chlamydomonas Reinhardtii</i>	387
<i>Chlorella Kessleri</i>	218
<i>Chlorella sp.</i>	550
<i>Chlorella vulgaris</i>	286
<i>Dunaliella salina</i>	323
<i>Nannochloropsis sp.</i>	630
<i>Scenedesmus obliquus</i>	210

Fonte: Autoria própria com base em [17,29,47]

Segundo [48], para a produção de biogás a partir de microalgas, devem-se considerar os seguintes aspectos:

- A biodegradabilidade das microalgas depende da composição bioquímica e da natureza de sua parede celular.
- O alto conteúdo de proteína celular resulta na produção de amoníaco que pode inibir o processo.
- A alta salinidade para espécies marinhas pode afetar na digestão da biomassa.

- A co-digestão entre a biomassa de microalgas e outro substrato, pode ser uma estratégia para incrementar a relação C/N e conseguir quebrar as paredes celulares das microalgas, embora a quantidade de lipídeos não superem o 40% na composição da biomassa final que pode ser contraproducente para a geração de biogás.
- O processo para a geração de biogás de boa qualidade deve resultar numa proporção de 69 a 75% de metano.
- No caso em que o efluente tenha uma alta quantidade de nitrogênio, pode empregar-se o mesmo para uma co-digestão junto a um substrato pobre em nitrogênio para assim obter uma composição de efluente ótimo.

Para a purificação do biogás e obtenção de biometano com baixos teores de CO₂, uma estratégia estudada é a fixação do dióxido de carbono, fazendo borbulhar o biogás no cultivo de microalgas, embora o cultivo tenha o pH regulado. Outro método é borbulhar o biogás numa solução de hidróxido de sódio para assim fixar o dióxido de carbono na solução, e obter um gás com um alto conteúdo de metano considerando que os demais compostos ficam também na solução [48,49].

3.5 FONTES FORNECEDORAS DA MATÉRIA-PRIMA

São descritas três possíveis fontes fornecedoras de biomassa de microalgas como matéria-prima, a primeira considera uma biorrefinaria de microalgas, a segunda somente considera a produção de biodiesel, e na terceira opção considera-se a biomassa não empregada em nenhum outro processo (biomassa fresca).

3.5.1 Biorrefinaria de Microalgas

Segundo os autores [37,50], o termo biorrefinaria deriva do conceito de uma refinaria de petróleo cru convencional, que recebe o material bruto, o refina e produz uma série de combustíveis e materiais petroquímicos, e uma de suas principais vantagens é a diminuição nos custos de produção, resultando num incremento na rentabilidade geral da planta de refino, devido ao fato de que vários dos produtos podem-se sustentar entre eles, relacionando os processos.

Desse modo pode-se definir uma biorrefinaria de microalgas como um sistema integrado que relaciona processos de produção de biocombustíveis como biodiesel, bioetanol, e biohidrogênio, além de produzir pigmentos, suplementos alimentícios, produtos químicos e farmacêuticos, partindo do cultivo de microalgas, até fechar o ciclo empregando a biomassa residual de todos os processos para gerar biogás e bio-fertilizante de microalgas, o qual pode retornar ao meio ambiente sem causar impactos negativos.

Descrevem-se de forma resumida as etapas principais que compõem uma biorrefinaria a base de microalgas:

- a) Cultivo.** As microalgas, como dito anteriormente, podem ser cultivadas em terrenos não necessariamente agrícolas, podendo ser cultivadas até em locais inférteis [35,36], mas seguindo o conceito de uma biorrefinaria, para que elas possam crescer adequadamente precisam de um sistema de cultivo específico o qual pode ser de dois tipos, aberto ou fechado. No primeiro caso, as microalgas podem crescer em tanques abertos, ou piscinas com recirculação de líquido. Esse tipo de sistema depende do clima da região, e requer um maior grau de controle devido à possível contaminação por predadores ou outros microrganismos. Para o segundo tipo de sistema de cultivo, empregam-se os chamados fotobiorreatores, que são basicamente câmaras fechadas com acesso à luz (natural ou artificial), e são caracterizados por minimizar a contaminação por microrganismos, ter condições controladas de temperatura, pH, níveis de iluminação, e adição de nutrientes entre outros [10,51].
- b) Colheita.** A colheita da biomassa produzida pode ser realizada por dois processos (independentes, paralelos ou sequenciais), o primeiro pode extrair uma grande parte do líquido pertencente ao meio de cultivo, mas ele ainda conta com nutrientes e outros componentes que são retornados para o cultivo, esta etapa é denominada como Colheita Primária, e emprega métodos de floculação e tecnologias de flotação dando como resultado uma biomassa com um conteúdo de sólidos totais entre 0,5 até 6%. O segundo processo é denominado Colheita Secundária, emprega

equipamentos mecânicos que podem ser de filtração e centrifugação retirando uma maior quantidade de umidade, resultando numa biomassa com um conteúdo de sólidos totais entre 10 até 20 % aproximadamente [13].

c) Produção de Biocombustíveis. O de maior interesse é o biodiesel, o qual é produzido a partir da extração de lipídeos das microalgas por um método denominado transesterificação [52,53], em que se empregam combinações de solventes e alcoóis, dando como resultado ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos (biodiesel) e glicerol. Por suas características as microalgas mais utilizadas são *botryococcus braunii*, *chlorella vulgaris*, *nannochloropsis s.p.*, *nitzschia laevis*, *parietochloris incise* e *schizochytrium s.p.*, pois sua composição aproximada é de até 50% em peso de óleo [13,54,55]. Outro biocombustível importante é o bioetanol, porque várias espécies de microalgas acumulam altos níveis de polissacarídeos em suas paredes celulares complexas, têm a capacidade de produzir mais carboidratos que lipídeos, e estes hidratos de carbono são extraídos e fermentados utilizando bactérias ou leveduras em condições anaeróbias gerando principalmente etanol, dióxido de carbono e água [41,56], entre as espécies mais estudadas por seus conteúdos de carboidratos para a produção de bioetanol estão *chlorella*, *chlamydomonas*, *dunaliella*, *scenedesmus*, e *tetraselmis* [57]. Por outro lado, também se pode obter biohidrogênio a partir das microalgas, segundo [58] o processo consiste em separar as células do cultivo principal num meio líquido livre de enxofre como se fosse um segundo cultivo, mas com a diferença que esse sistema é fechado sem entrada de ar, e iluminado adequado para as condições de fotofermentação. Nessas condições, o Fotossistema II é inibido gradualmente, porém existe uma respiração oxidativa pelas células originando uma cultura anaeróbia que é suficiente para provocar a hidrogenase e a conseqüente produção de hidrogênio gasoso. Dentre algumas das espécies de microalgas mais estudadas para a produção de

H₂ estão: *chlorella sp.*, *dunaliella tertiolecta*, *chlamydomonas spp.*, *scenedesmus spp.*, e *laminaria japonica*, entre outras [17].

- d) Outros Produtos.** Existem espécies de microalgas que têm altos conteúdos de ácidos graxos poliinsaturados com cadeias de mais de 20 átomos de carbono, estes são compostos de alto valor como alimentos saudáveis assim como também trazem consigo efeitos antiinflamatórios e chegam a aliviar a dor da artrite [55,56]. Outra aplicação é dada nos cosméticos como protetor solar, produtos para cuidado da pele e do cabelo, mas também as microalgas estão envolvidas com a produção de produtos químicos, por exemplo, os pigmentos gerados, clorofilas (verde), carotenóides (laranja, amarelo e vermelho) e ficobilinas (pigmento fluorescente). Os dois primeiros são aplicados como corantes naturais, e o último é utilizado na citometria de fluxo, microscopia de fluorescência e outras técnicas usadas em pesquisas biomédicas [55,59].
- e) Produção de Biogás.** A produção desse tipo de biocombustível é almejada para fechar o ciclo da utilização da biomassa de microalgas. O biogás pode ser produzido a partir da biomassa residual dos processos de geração dos outros biocombustíveis por meio da biodegradação num biorreator, em condições anaeróbias. Como esse é composto principalmente por CH₄ e CO₂, pode ser purificado para obter biometano e melhorar o desempenho energético global da biorrefinaria. Por outro lado, o efluente desse processo tem duas fases, uma sólida e outra líquida as quais podem ser empregadas como fertilizantes e pesticidas orgânicos respectivamente, neste sentido a biomassa digerida retorna ao meio ambiente. Além disso, ainda se analisa a possibilidade de gerar um poliéster biodegradável a partir da alimentação do cultivo de microalgas com metano de modo que exista uma cooperação simbiótica entre as bactérias metanotróficas e as microalgas, formando bioflocos que podem ser aproveitados [17,41].

A Figura 4 apresenta um esquema de uma biorrefinaria de microalgas.

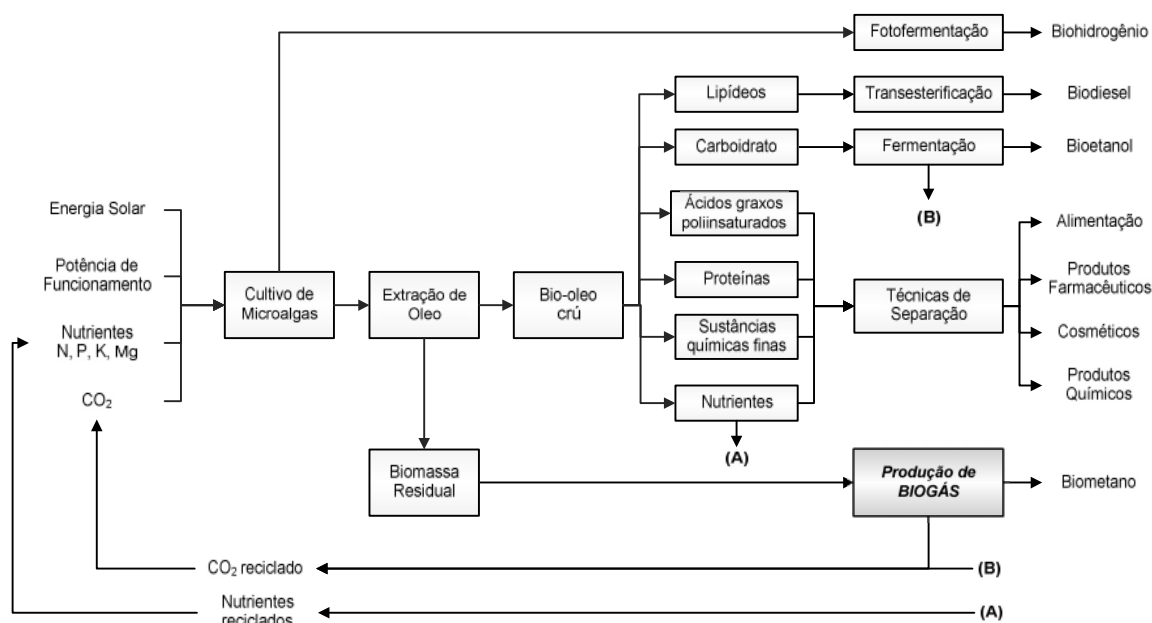


Figura 4: Aproveitamento da biomassa de microalgas para produção de biogás numa biorrefinaria.
Fonte: Adaptado de [37,42,55]

3.5.2 Biodiesel a Partir de Microalgas

Esse biocombustível produzido a partir de microalgas é biodegradável, não é agressivo ao meio ambiente, e como se fez menção no item anterior (3.5.1 Biorrefinaria de microalgas), é obtido por transesterificação considerando que várias espécies de microalgas têm conteúdos de lipídeos até cerca de 50% de seu peso seco, além de ter uma velocidade de crescimento quase similar ao das bactérias, fazendo a utilização das microalgas uma alternativa vantajosa para a geração desse biocombustível [32,52,53]. Por outro lado, segundo os autores [60,61], o biodiesel produzido a partir de microalgas não tem enxofre nem outras substâncias tóxicas e nocivas que possam danificar as tubulações e condutos do veículo, e a depender da espécie tem um poder calorífico aproximado de 40 (MJ/kg), um número de cetano (medida da qualidade da combustão) de 52, e um ponto de ignição de 98 °C. Todos esses valores são próximos ao do diesel de petróleo convencional.

Para evidenciar as vantagens descritas anteriormente, é apresentada na Tabela 5, uma comparação entre os níveis de produção de diferentes fontes geradoras de biodiesel, em função da produção em litros por hectare por ano, e a quantidade de área requerida, em que se pode identificar uma produtividade superior para as microalgas.

Tabela 5: Comparação de diferentes matérias-primas para gerar biodiesel em função da quantidade produzida e da área de terra requerida.

Matéria-prima	Produção de biodiesel (L/ ha / ano)	Superfície requerida para abastecer a demanda mundial de petróleo (ha x 10 ⁶)
Palma	5950	819
Jatropha	1892	2577
Colza	1190	4097
Girassol	952	5121
Soja	446	10932
Microalgas	12000 ^a e 20000 ^b	<406

^a Rendimento conservador.

^b Rendimento obtido por tecnologia atualmente disponível.

Fonte: Adaptado de [32,62,63]

Como foi apresentado na Tabela 3, a depender da espécie de microalga, essa pode ter diferentes conteúdos de lipídeos, mas, é preciso mencionar que nem todas as espécies de microalgas são adequadas para gerar biocombustíveis [64], segundo [55] para a produção de biodiesel o número de carbono contido nos ácidos graxos deve estar entre 14 e 20, e os superiores a 20 por terem cadeias longas, são mais apropriados para gerar produtos não-combustíveis.

Para a produção do biodiesel, geralmente é necessária a extração de lipídeos, a qual pode ser feita por diversos métodos. Segundo [56], os mais comuns são os seguintes:

- a) **Prensa de óleo.** Com a biomassa seca usa-se um equipamento para comprimir a mesma até obter o óleo, tendo assim um rendimento de 75% aproximadamente.
- b) **Por solvente.** Regularmente para a extração do óleo são utilizados benzeno, ciclohexano, hexano, acetona, e clorofórmio, entre outros solventes que são adicionados à biomassa, rompendo assim as paredes celulares e extraíndo o óleo, mas é preciso remover e recuperar o solvente.
- c) **Supercrítica.** Este método submete a biomassa a uma temperatura e pressão elevadas (45 a 55 °C e 400 a 700 bar), para assim romper as paredes das células e obter o óleo.

d) Ultrassom. Empregando ondas ultrassônicas de alta intensidade, elas geram microbolhas que chegam a colapsar as paredes celulares, obtendo-se o óleo em forma de solução.

Após a extração dos lipídeos, o óleo deve ser convertido em ésteres metílicos ou etílicos (biodiesel) e glicerol, mas a produção de biodiesel a partir de microalgas ainda não é energeticamente e economicamente favorável, pois é necessária uma fonte externa de energia para as etapas de cultivo das microalgas e colheita da biomassa, já que ela tem que estar o mais seca possível para obter um bom rendimento no processo de extração dos lipídeos. Vale ressaltar que estes são métodos convencionais, porém ainda na atualidade são desenvolvidas pesquisas para a extração de lipídeos que superem o inconveniente do uso excessivo de energia externa, tal é o caso do Laboratório de Bioenergia e Catalise da Escola Politécnica da UFBA, que vai desenvolvendo um método para a obtenção de biodiesel etílico a partir de microalgas, o qual não precisa secar a biomassa nem extrair os lipídeos para obter o produto desejado, diminuindo significativamente o uso de energia, e obtendo uma taxa energética líquida (*Net Energy Ratio* NER) positiva.

Por outro lado, a incorporação do biogás no processo pode apresentar uma alternativa adequada para fornecer energia a estes processos, assim como também gerar dióxido de carbono que pode ser aproveitado no cultivo das microalgas. Além disso, a digestão anaeróbia produz bio-fertilizante que retorna a biomassa digerida para o meio ambiente [13,64,65].

A Figura 5 apresenta um esquema geral do processo de produção do biodiesel adicionando e identificando a produção de biogás.

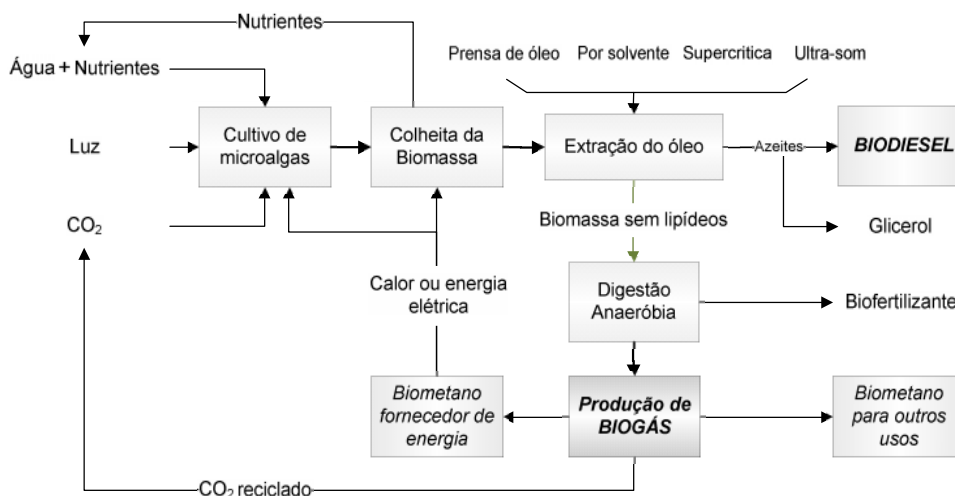


Figura 5: Aproveitamento da biomassa de microalgas para produção de biodiesel e biogás.
Fonte: Autoria própria com base em [13,56,64]

3.5.3 Biomassa de Microalgas Utilizada Exclusivamente para Geração de Biogás

Nessa situação, considera-se que exista um excedente de biomassa produzida, ou no caso que ela possa estar contaminada com outros microrganismos sendo em todo caso não recomendável para sua utilização em processos de produção dos outros combustíveis ou produtos, pois as microalgas são ameaçadas por esses microrganismos e podem morrer [66], nesse caso, considerando que se emprega bastante energia para sua colheita é importante não excluir a biomassa, de modo que é possível aproveitá-la para gerar biogás.

Uma das vantagens das microalgas como fontes de geração de biocombustíveis é o nível de crescimento que elas têm. Segundo os autores [62,67], as microalgas comparadas aos cultivos terrestres têm uma eficiência que vão de cinco até trinta vezes na produção de biomassa por hectare, e apresentam altos níveis de lipídeos, proteínas, carboidratos, e não contém lignina, que é dificilmente digerida, o qual faz desse tipo de biomassa adequada para a produção de biogás. Comparando-se as quantidades produzidas de biometano por hectare num ano para diversas fontes de matéria-prima, por exemplo, empregando cereais podem ser gerados 3.200 a 4.500 (m^3/ha ano) de biometano [68], empregando milho pode ser gerado entre 5.780 até 12.390 (m^3/ha ano) a depender do tipo de crescimento e colheita [68,69], mas no caso das microalgas podem ser gerados dentre 200.000 até

400.000 (m³/ha ano) a depender da espécie, o sistema de cultivo e a forma de colheita [62].

Segundo os autores [13,48,70,71], embora se tenham vantagens na produção de biogás a partir de microalgas, também devem ser consideradas algumas limitações importantes, dentre elas a baixa relação carbono/nitrogênio, pois as microalgas tem um alto conteúdo de nitrogênio, razão pela qual no processo de geração de biogás pode-se gerar amônia, prejudicial para a atividade metanogênica, o que pode diminuir ou inibir o processo de geração do biogás. As microalgas que apresentam esses inconvenientes são aquelas que têm altos conteúdos de proteínas, e à medida que são digeridas, a amônia gerada é acumulada na fase líquida. Outra desvantagem importante é a difícil biodegradabilidade dos ácidos graxos de cadeias longas, os quais compõem as paredes celulares fortes, limitando a acessibilidade das enzimas aos substratos, diminuindo o processo de degradação, e demandando tempos de retenção de 20 a 30 dias para uma digestão adequada. As paredes celulares das microalgas são formadas de biopolímeros como *sporollenin* e *algaenan*, que influem diretamente na eficiência de todo o processo de geração do biometano.

Para diminuir o impacto das desvantagens mencionadas anteriormente, estão sendo desenvolvidas várias técnicas para uma melhor eficiência na produção de biogás, para facilitar a quebra das paredes celulares. Existem técnicas de pré-tratamento da biomassa de microalgas, as quais são métodos térmicos, químicos, enzimáticos, mecânicos, por exposição a micro ondas, extração de lipídeos ou considerando a biomassa residual dos processos de produção de bioenergia numa biorrefinaria de microalgas. Em todos esses casos, a biomassa é previamente adequada para seu uso no biorreator, e gerar biogás eficientemente, evitando a formação excessiva de amônia, por incremento da relação carbono/nitrogênio. Estão sendo avaliados também processos de co-digestão da biomassa de microalgas para aumentar a quantidade de carbono e assim diminuir a geração de amônia.

Esses processos para melhorar a qualidade da biomassa que devem ser alimentadas ao biorreator, ainda estão sendo avaliados, porém obtendo-se bons resultados, cabe analisar a energia utilizada para executá-los, quer dizer que para

empregar métodos de pré-tratamento se emprega energia externa a qual melhora a quantidade e qualidade do gás produzido, mas a energia gerada não compensa a energia utilizada. Por outro lado, segundo o autor [70] o emprego da co-digestão melhora a cinética do processo, mas não melhora significativamente a eficiência da produção de biogás, nesse sentido, a produção de biogás a partir de biomassa de microalgas sem algum tipo de pré-tratamento, e de forma individual é possível, a depender da espécie e dos compostos que a constitui, mas ainda devem ser desenvolvidas pesquisas em relação às técnicas de pré-tratamento nas quais o consumo energético não supere a quantidade de energia gerada, e avaliar quais seriam as proporções adequadas para uma ótima co-digestão.

Como dito anteriormente, um fator importante para o aproveitamento da biomassa das microalgas é o rápido crescimento que elas têm, e como observadas em espécies tais como *nannochloropsis s.p.* que podem crescer em águas salobras como meio de cultivo, e empregando esgoto doméstico como fonte de nutrientes. Segundo [72] o crescimento das microalgas não são prejudicadas pelas bactérias do esgoto, e a alta salinidade do meio evita contaminações externas, pois o cultivo de microalgas em águas salinas evita a utilização de água doce que é aproveitada domesticamente, ou para a irrigação de cultivos agrícolas [67], mas cabe mencionar que segundo [48] os níveis de salinidade da biomassa influem na produção de biogás porque a concentração de cloreto de sódio não deve ultrapassar um máximo de 0,3M, caso se tenha valores superiores (0,4 a 0,5M NaCl) a produtividade de geração de biogás vai sendo afetada até ser inibida por completo.

A Figura 6 apresenta um esquema do processo de geração do biogás empregando biomassa de microalgas, considerando a utilização de águas salinas como meio de cultivo, esgoto como fonte de nutrientes, uma colheita simples já que para a produção de biogás a biomassa pode estar úmida [13], em continuação a biomassa é digerida obtendo um bio-fertilizante e a parte gasosa produzida (biogás) pode ser borbulhada no sistema de cultivo assim o dióxido de carbono pode ser fixado, obtendo-se desta forma o biometano.

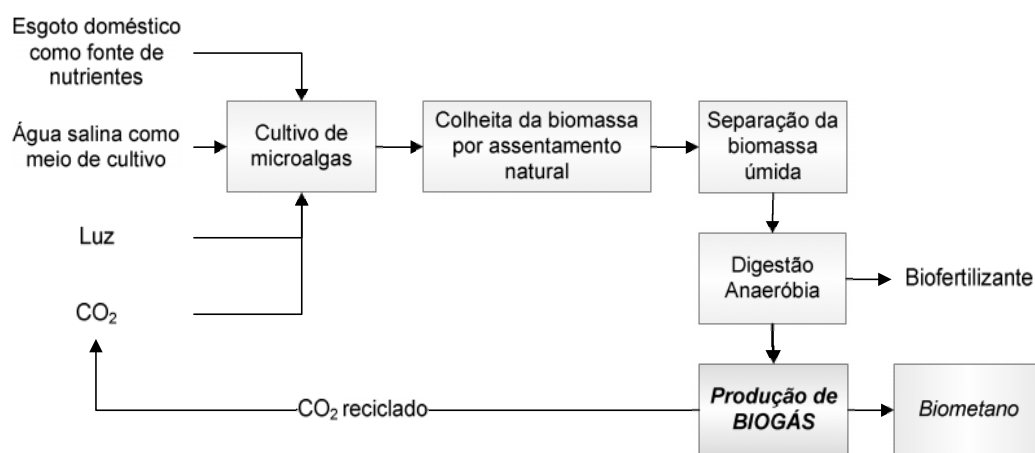


Figura 6: Aproveitamento da biomassa de microalgas para produção de biogás.
Fonte: Autoria própria com base em [13]

4 MATERIAL E MÉTODOS

No presente capítulo são considerados três etapas fundamentais para alcançar os objetivos propostos, partindo da escolha do tipo de reator a ser testado, o processo de produção do biogás, e as etapas para levar a cabo os testes.

Como matéria-prima foi empregada a biomassa mista com predominância da microalga *Chlorella sp.*, cultivada nos fotobiorreatores de tipo placa plana pertencentes ao Laboratório de Bioenergia e Catálise (LABEC) da Escola Politécnica – UFBA. No presente trabalho a biomassa foi unicamente empregada para a produção de biogás.

O projeto do biorreator e do sistema de produção de biogás foi feito com base na literatura disponível sobre reatores usados para a geração desse biocombustível, considerando suas características, vantagens e limitações a serem superadas. Para isso, foram identificados reatores atualmente empregados, e que por suas características de funcionamento já tiveram bons resultados aplicados para o tratamento de resíduos em áreas rurais, assim como também aqueles que são empregados para o tratamento de águas residuais, devido a que a biomassa de microalgas tem um alto conteúdo de umidade, que poderia ser adaptada para seu uso na geração de biogás em reatores que empreguem material orgânico num meio majormente líquido.

Os testes em escala de laboratório foram realizados usando protótipos dos reatores projetados, considerando dois reatores preenchidos com biomassa e inóculo (lodo anaeróbio) para a ativação do reator na primeira carga, e as duas cargas subsequentes somente com biomassa de microalgas e água destilada (as quantidades correspondentes a cada ensaio são apresentadas na Tabela 8). Além desses testes foi realizado um terceiro teste avaliando a produção de biometano num reator carregado somente com o inóculo. Em todos os testes o biogás produzido foi purificado para se obter somente biometano, conforme descrito na sessão 4.3.7.

4.1 DETERMINAÇÃO DO TIPO DE REATOR

Para determinar o tipo de reator a ser projetado, foram estudados quatro tipos de reatores empregados comumente para o tratamento de águas residuais, esgoto, e biomassa de esterco de gado nas áreas rurais. Esses reatores por suas características podem ser utilizados para a produção de biogás a partir de biomassa de microalgas, mas individualmente apresentaram certas limitações que serão detalhadas posteriormente.

4.1.1 Identificação dos Quatro Modelos de Reatores

Os modelos de reatores foram escolhidos por suas características e atual aplicação para o tratamento de resíduos agrícolas e de águas residuais, estes foram identificados a partir da informação das Tabelas 1 e 2 do presente trabalho. O primeiro reator escolhido foi o de Cúpula Fixa, devido a que é apto para o tratamento de esterco de gado assim como dejetos vegetais em grande escala, é de fácil construção, é econômico a depender de sua capacidade, e tem um sistema hidráulico para a saída do efluente. Como segundo reator, se tem o de Dois Estágios para tratamento de despejos industriais, ele foi escolhido por seu sistema de recirculação de biomassa não digerida, evitando a perda de material orgânico, em alimentações contínuas com um afluente majormente líquido. O digestor de Chicanas foi o terceiro, por ser um reator de alta taxa que mistura o material orgânico sem empregar equipamentos externos, mantendo um equilíbrio hidrodinâmico e contínuo misturando a biomassa dentro do reator. Como último reator se tem o de Manta de Lodo (UASB), o qual foi escolhido por já ter empregado ele para o tratamento de biomassa de microalgas, mas devido a suas limitações, ainda pode ser adaptado para o tratamento adequado deste tipo de material orgânico.

Os quatro modelos de reatores, são apresentados nas Tabelas 1 e 2, as quais indicam suas características e principais limitações, que influenciaram os critérios adotados para o desenho dos protótipos de reatores do presente trabalho.

4.1.2 Projeto do Protótipo de Reator para Microalgas

Foram projetados três protótipos, buscando superar os inconvenientes que reatores usualmente utilizados para digestão anaeróbia apresentam, quais sejam:

- Falta de um sistema de mistura da biomassa dentro do reator, o qual faz com que se possa formar uma espuma na superfície da biomassa dentro do reator dificultando a saída do biogás.
- Variabilidade na pressão do biogás.
- Emprego de energia externa para o misturador.
- Perda de sólidos no efluente.
- Odor.

Dessa forma, foram utilizados os princípios de funcionamento dos quatro reatores empregando um sistema de dois estágios para evitar a saída de biomassa no efluente, num sistema que tem condutos similares ao do tipo de reator de chicanas com a forma exterior de um reator de cúpula fixa. Como o preparo da biomassa composta por microalgas e água deve ser alimentada em sua grande maioria na forma líquida, e internamente, o reator segue o comportamento de um reator de manta de lodo (UASB).

A seguir são apresentados os protótipos, dos quais um deles foi o reator escolhido como o mais adequado para gerar biogás a partir de microalgas.

4.1.2.1 Primeiro Protótipo: Reator UASB com Estagio de Pós-Digestão

Esse tipo de reator é composto por duas etapas de digestão, na primeira a biomassa preenche todo o reator interno, que é basicamente um reator de tipo manta de lodo, e após o tempo de retenção, assim que ingresse uma nova carga de biomassa, ela desloca a antiga biomassa do reator interno para o externo. Desse modo parte dos sólidos que não foram degradados passam ao reator externo onde ficarão um segundo tempo de retenção necessário para sofrer degradação. Neste tipo de reator, a manta de lodo fica sem alterações durante todo o tempo de retenção, em que a nova biomassa é degradada. Por outro lado, para evitar o entupimento do separador trifásico assim que se alimente o reator, a válvula de

saída do biogás correspondente ao reator interno, deve ser fechada para que o gás dentro da câmara *headspace* exerça certa pressão evitando a entrada da biomassa pelo separador trifásico e entupindo os condutos. A Figura 7 apresenta o protótipo, indicando em setas verdes o percurso da biomassa pelos reatores tanto interno como externo, ambos em condições anaeróbias, sem entrada de ar no sistema, tendo em vista que o reator UASB tem um separador trifásico (sólido, gás, líquido), e o protótipo tem sua própria câmara superior gasosa (*headspace*) independente do reator externo, porém ambas saídas do biogás são conectadas por um mesmo conduto final.

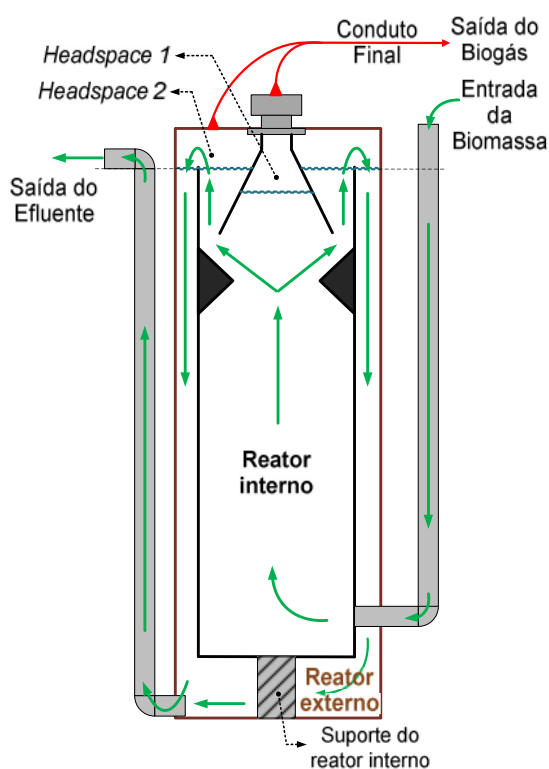


Figura 7: Protótipo 1 reator UASB com estágio de pós-digestão.
Fonte: Autoria própria.

As hipóteses para desse tipo de reator são:

- Maior degradação da biomassa.
- Não apresenta perdas significativas de sólidos no efluente final.
- Como a biomassa é maiormente degradada, não deve apresentar maus odores.
- A pressão do gás pode ser regulada a depender da câmara *headspace* dos reatores e um sistema adequado de armazenamento do biogás.

- Não emprega energia externa para seu funcionamento.
- A mistura do material orgânico dentro do reator interno é por meio das bolhas de biogás geradas no leito de biomassa.

Hipoteticamente, as limitações identificadas são:

- Requer o dobro de tamanho, pois, irá digerir a biomassa em duas etapas.
- A forma de construção do sistema por suas características, no posicionamento dos defletores e o separador trifásico, requer de mão de obra qualificada, o qual eleva relativamente os custos envolvidos na construção do sistema.
- O separador trifásico a depender do material (concreto, metal, etc.) requer manutenção periódica, o que poderia interromper o ciclo na produção do biogás.

4.1.2.2 Segundo Protótipo: Reator de Dois Estágios com Recirculação do Biogás

O segundo protótipo avaliado emprega a recirculação do biogás, que serve como misturador da biomassa dentro do reator interno, mas o modo de funcionamento é diferente do anterior. Nesse caso, somente o reator externo tem a câmara *headspace*, que é completamente independente do conduto do biogás do reator interno, de modo que para que a biomassa possa se deslocar do reator interno ao externo. No topo do primeiro reator existem quatro furos que somente são abertos ao girar-se o conduto do biogás no topo do reator externo, de modo que o biogás armazenado na câmara *headspace* não ingresse ao reator interno pelo fluxo da biomassa. Além disso, para evitar que a biomassa ingresse ao conduto de saída do biogás, ele deve ser fechado antes de iniciar a carga da biomassa ao sistema.

Nesse protótipo o sistema é preenchido por completo com a biomassa de modo que o biogás gerado no reator externo possa ocupar sua câmara *headspace* e exercer uma pressão suficiente que consiga avançar pela tubulação e ingressar no reator interno sem empregar qualquer bomba. Dessa maneira, o biogás gerado no reator externo misturaria a biomassa que está no reator interno e sairia por um

conduto único. Diferentemente do primeiro protótipo que junta os condutos de ambas câmaras *headspace*.

Na Figura 8 é apresentado o desenho desse tipo de protótipo, indicando com setas verdes o sentido que segue a biomassa. A linha azul representa os condutos da recirculação do biogás, e as linhas ponteadas de cor azul são as bolhas de biogás que circulam pelo reator interno para finalmente saírem pelo conduto correspondente representado com uma seta vermelha.

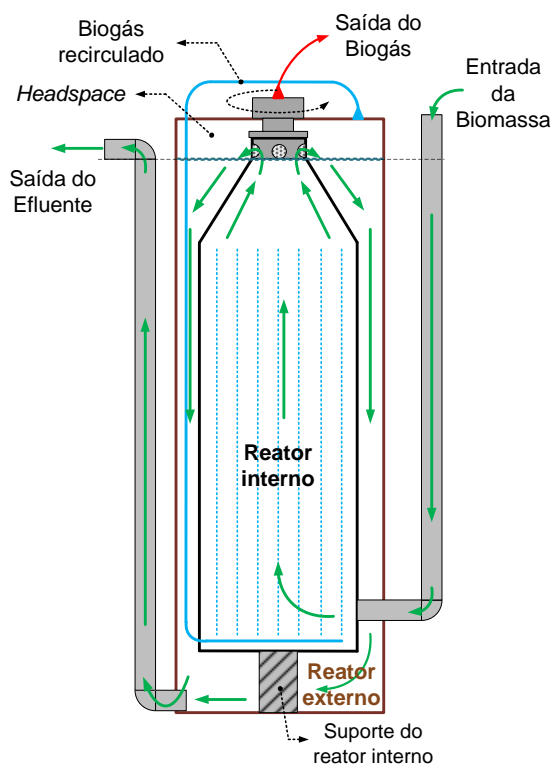


Figura 8: Protótipo 2 reator de dois estágios com recirculação de biogás.
Fonte: Autoria própria.

Hipoteticamente, as vantagens desse tipo de reator são:

- O reator interno tem um sistema de mistura da biomassa do tipo autônomo pelo borbulhamento do biogás sem empregar fontes externas que demandam energia.
- Menor quantidade de perdas de sólidos não digeridos no efluente final.
- Como a biomassa é completamente degradada, não há emissão de odores.
- A pressão do biogás ao sair do sistema é estável.

- As bolhas que ingressam ao reator interno puxam as bolhas de biogás que estão retidas entre a biomassa desse reator.

Hipoteticamente, as desvantagens identificadas são:

- Requer o dobro de tamanho, pois irá digerir duas vezes a biomassa (a segunda digestão gera o biogás que irá recircular).
- A recirculação do biogás somente é possível assim que o reator externo comece a produzir o biocombustível com a pressão suficiente para borbulhar no reator interno o que poderia ser demorado.
- A forma de construção do sistema do topo do reator interno que é móvel e serve de passagem para o biogás e na parte inferior para o deslocamento da biomassa, deve ser perfeitamente estruturado com a finalidade de evitar fugas do gás ou desequilíbrio no sistema o que requer mão de obra qualificada, elevando os custos envolvidos na construção do sistema.
- Como o topo do reator interno é móvel (ele deve ser girado quando se pretende carregar uma nova quantidade de biomassa), ele requer uma adequada manutenção e revisão contínua para certificar-se que não existam perdas, ou se a biomassa esta sendo adequadamente deslocada de um reator a outro.
- O biogás do sistema deve ser armazenado por completo num reservatório com dimensão suficiente para que não existam perdas do gás nem grande demais para evitar a queda de pressão.

4.1.2.3 Terceiro Protótipo: Reator de Dois Estágios com Fluxo de Carga Semi-Contínuo

Como último protótipo está o reator de dois estágios com fluxo semi-contínuo. Esse tipo de reator é composto por duas etapas da mesma maneira que os anteriores, porém possui diferença no tocante à carga: o reator é carregado periodicamente de modo que a biomassa vai circulando pelos dois estágios em todo o ciclo de degradação do material orgânico.

É denominado de fluxo semi-contínuo, porque as alimentações de material orgânico são periódicas (podem ser semanais ou quinzenais), e assim a entrada da biomassa servirá como força motriz para a mistura interna, deslocando aos poucos o material orgânico dentro dos reatores, tanto o interno como o externo. Esse protótipo tem somente uma câmara *headspace* entre os reatores, e uma saída de biogás. A diferença desse sistema para os anteriores é que não possui a necessidade de recircular o gás, nem possui peças móveis no topo do reator interno, o que facilita a vedação completa para impedir a entrada de ar no sistema. Além disso, como as alimentações de biomassa são periódicas, o sistema vai degradando a biomassa desde sua entrada no reator interno até a saída do mesmo, sem a necessidade de ter uma dupla digestão como os protótipos anteriores, assim o tamanho desse reator é menor em comparação com os anteriores, para uma mesma quantidade de biomassa.

Na Figura 9 é apresentado o desenho do protótipo deste reator, onde as setas verdes representam o sentido que segue a biomassa, as setas de cor azul, são condutos instalados para se fazer as amostragens para estimar a quantidade de DQO e o pH dentro dos reatores interno e externo, e a seta vermelha é a saída única de biogás.

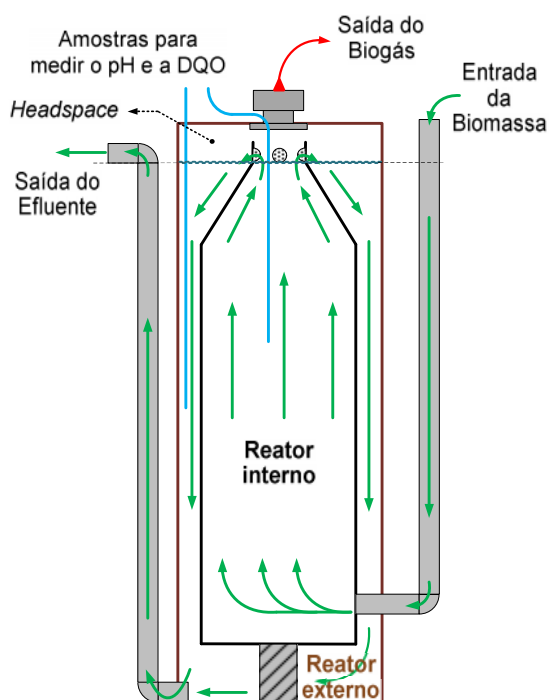


Figura 9: Protótipo 3 reator de dois estágios com fluxo de carga semi-contínuo.
Fonte: Autoria própria.

Hipoteticamente, as vantagens desse tipo de reator são:

- A entrada periódica de biomassa nos reatores (interno e externo) gera uma agitação natural do material orgânico dentro dos reatores em períodos menores que um mês (a depender do tempo entre alimentações de biomassa).
- Menor quantidade de perdas de sólidos não digeridos no efluente final, porque a maior parte da biomassa fica nos reatores até ser maiormente digerida e descartada no efluente.
- Como a biomassa é maiormente degradada, não há emissão de odores.
- A pressão do gás pode ser regulada a depender das dimensões da câmara *headspace* e do sistema adequado de armazenamento do biogás.
- Não requer energia externa para mistura da biomassa.
- Pela simplicidade da estrutura do reator, é de fácil construção.

Hipoteticamente, as limitações identificadas são:

- O início do funcionamento pode demorar, pois necessita da degradação da biomassa inicial, para depois serem realizadas as alimentações periódicas (semanais ou quinzenais).
- Parte do biogás gerado deve ser adequadamente armazenado num reservatório com capacidade satisfatória, nem pequeno demais para que não existam perdas do gás, nem grande demais para evitar a redução da pressão. Este fator depende do volume da câmara *headspace* em relação à quantidade de biogás a ser armazenado e utilizado.

4.1.3 Eleição do Protótipo mais Adequado

Teoricamente, em função das vantagens e avaliando as limitações hipotéticas dos reatores propostos, o protótipo mais adequado para realizar os testes com a biomassa de microalgas foi o terceiro, de dois estágios de fluxo semi-contínuo. Devido as suas características consegue adotar o modo de funcionamento de um reator de manta de lodo (UASB), adequado para o tratamento de águas

residuais, e a biomassa de microalgas também tem altos níveis de umidade, além de que ao entrar material orgânico no reator, esse encontra-se em forma líquida, o que ajuda a manter o fluxo sem entupimentos nos condutos, nem uma sobrecarga de biomassa no sistema.

4.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO PROTÓTIPO DE REATOR

O modo de funcionamento do reator foi composto pelas seguintes operações:

- Antes de iniciar a primeira carga, preparou-se a biomassa, a qual segundo [23] pode estar acompanhada de um inóculo que sirva para acelerar o processo de início do sistema. Por outro lado, pode-se apenas alimentar com biomassa, porém o tempo para a produção do biogás será mais demorado. A biomassa deve estar em estado líquido para que possa fluir dentro do reator sem a possibilidade de obstrução dos condutos internos.
- Para a primeira alimentação, o sistema foi preenchido por completo com a biomassa, inicialmente, a válvula de saída do biogás esteve aberta para o meio ambiente, para que assim o ar contido dentro do sistema possa sair ao entrar a biomassa.
- Uma vez feita à alimentação, a câmara *headspace* do sistema pode ser preenchido com nitrogênio ou dióxido de carbono para assim deslocar para fora do reator o oxigênio presente no ar que ficou dentro do digestor. Em caso de não operar o sistema dessa forma, segundo [74] assim que o sistema esteja gerando biogás, o conduto final pode ficar aberto para assegurar-se que não exista a presença de ar no *headspace*, tubulações e condutos.
- Passado o tempo de degradação da biomassa o biogás foi coletado, parte na câmara *headspace* e o restante num reservatório externo.
- Para uma nova alimentação de biomassa, a válvula de saída do biogás foi fechada com a finalidade de evitar que o material orgânico chegue até o conduto e o obstrua. Fechando a válvula, o biogás dentro da câmara *headspace* fica retido exercendo certa pressão que evita que a biomassa

alcance o orifício de saída do biogás, após preencher o sistema com a quantidade certa de biomassa, a válvula de saída do biogás foi aberta.

- Assim que a biomassa foi ingressando, uma quantidade equivalente foi saindo do reator externo. Esse efluente contém o bio-fertilizante que segundo alguns autores [19,75] pode ser utilizado no cultivo tradicional misturando numa proporção dentre 1/10 até 1/4 com água (não necessariamente potável) para irrigação.
- Finalmente o biogás foi conduzido por tubulações passando por um manômetro. Logo após o mesmo foi purificado (segundo o método apresentado no item 4.3.7 Purificação e Quantificação do Biometano Gerado) obtendo assim biometano, que foi armazenado num reservatório para sua quantificação. Por outro lado, no conduto por onde o biogás e o biometano foram conduzidos, existiram válvulas contra a acumulação de umidade.

4.3 TESTES REALIZADOS

Uma vez definido o projeto do tipo de reator, a etapa seguinte foi testar o modelo com biomassa de microalgas. Para isso a espécie disponível na quantidade adequada para os testes foi a microalga *Chlorella sp.*, mesma espécie cultivada dentro dos fotobiorreatores pertencentes no Laboratório de Bioenergia e Catálise (LABEC), instalados na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Dessa forma, com base no material disponível, foi projetado um número adequado de reatores construídos com materiais simples e de fácil acesso dentro do mesmo laboratório, visando a construção simples que o reator deve ter para seu futuro uso em áreas rurais. A seguir, são detalhadas as distintas etapas para realizar os testes necessários.

4.3.1 Disponibilidade do Inóculo

Segundo o autor [23], é recomendável empregar um inóculo para a partida e operação de reatores anaeróbios, em que o inóculo pode estar ou não adaptado ao substrato utilizado (biomassa de microalgas). Dessa forma, foi empregado como

inóculo o lodo anaeróbio obtido a partir de um reator UASB da estação de tratamento de esgoto, localizado no município de Lauro de Freitas, Estado da Bahia.

O inóculo não foi aclimatado à biomassa das microalgas antes de carregá-la nos reatores [76], porém um dia antes do início dos experimentos, ele foi adaptado à temperatura ambiente que seria a mesma dos testes. O inóculo somente foi empregado unicamente para o início dos testes, ou seja, para as alimentações seguintes dos reatores foram empregadas apenas biomassa de microalgas e água.

4.3.2 Disponibilidade da Biomassa e Capacidade do Protótipo

O material orgânico composto por microalgas foi obtido a partir dos cultivos dos fotobiorreatores de placas planas pertencentes à Planta Piloto do Laboratório de Bioenergia e Catálise, localizada na Escola Politécnica da UFBA. Esses reatores possuem uma capacidade de aproximadamente 150 (L), dos quais foi empregado um volume total aproximado de 100 (L) de cultivo presente em cada um dos três reatores utilizados. A concentração de microalgas nos reatores não era uniforme devido a vários fatores, dentre eles o mais importante era a intensidade de luz, que influencia no crescimento das microalgas. Por isso numa consideração otimista a quantidade total de biomassa úmida para os fotobiorreatores utilizados, seria de 2.500 (g) de microalgas no volume total utilizado. Em contrapartida numa situação pessimista (considerando a metade da produção de biomassa úmida), seria de 1.250 (g). Esses valores foram estimados a partir de amostras coletadas nos três fotobiorreatores. Dessa forma, foi considerado o cenário pessimista com a finalidade de evitar a falta de material orgânico.

A capacidade do protótipo foi definida de acordo com a quantidade de biomassa disponível para os testes. Segundo o autor [49], empregaram-se 4 (g) de sólidos totais (ST) para um volume de 500 (mL) do reator, seguindo a mesma relação, foi estimada uma quantidade de sólidos totais para a biomassa utilizada. Com esses valores a carga orgânica resultante é de 0,27 (kg ST/m³.dia) aproximadamente. Seguindo os passos do Método 2540 G proposto por [77], e considerando a construção de 2 reatores (com base no terceiro protótipo) cada um com três ensaios, a média estimada de biomassa úmida foi de 94,34 (gST/kg

biomassa úmida). A medição dos sólidos totais foi realizada no Laboratório de Resíduos e Efluentes (LABRE) localizado na Escola Politécnica da UFBA, o que equivale a 2,46 (L) do volume do reator. Como o crescimento da biomassa nos fotobiorreatores é variável assim como seus respectivos níveis de sólidos totais, foi considerado um volume total teórico de 2,20 (L) para cada reator, com pequenas variações na construção dos mesmos.

4.3.3 Construção dos Reatores

Conforme o desenho do terceiro protótipo foram construídos dois reatores para serem carregados com biomassa de microalgas como substrato e lodo anaeróbio como inóculo. Contudo, para se avaliar a quantidade de biometano gerado exclusivamente pelo lodo anaeróbio, foi montado um terceiro reator com as mesmas características, com a diferença que este fora alimentado somente com o inóculo.

Como materiais principais para a construção dos reatores foram empregados tubos de PVC de 80 (mm) e 100 (mm) de diâmetro para os reatores internos e externos respectivamente. Para a parte superior do reator interno possuir a forma cônica (Figura 9) foram empregadas reduções de 80 (mm) para 50,8 (mm). Segundo vários projetos de construção de biodigestores tubulares e de cúpula fixa [19,78-84], para a altura dos reatores são consideradas diversas relações altura/diâmetro, e para o presente estudo foi considerada uma relação na ordem de 3/1. A dimensão da câmara *headspace* foi considerada como 10% do volume total do reator, essa porcentagem foi utilizada pelo autor [85], que empregou a mesma espécie de microalga para seus testes. Essa dimensão da câmara *headspace* foi utilizada para melhorar a quantificação do biogás. Para a entrada da biomassa e saída do efluente, foram empregadas tubulações de tipo eletroduto rígido PVC de 1/2 polegada de diâmetro.

Os três reatores foram construídos com PVC, em que a única peça metálica foi a conexão de saída do biogás, que corresponde a um adaptador de 1/2 polegada com rosca fêmea para mangueira de 5/16 polegadas.

As dimensões dos reatores são descritas na Figura 10.

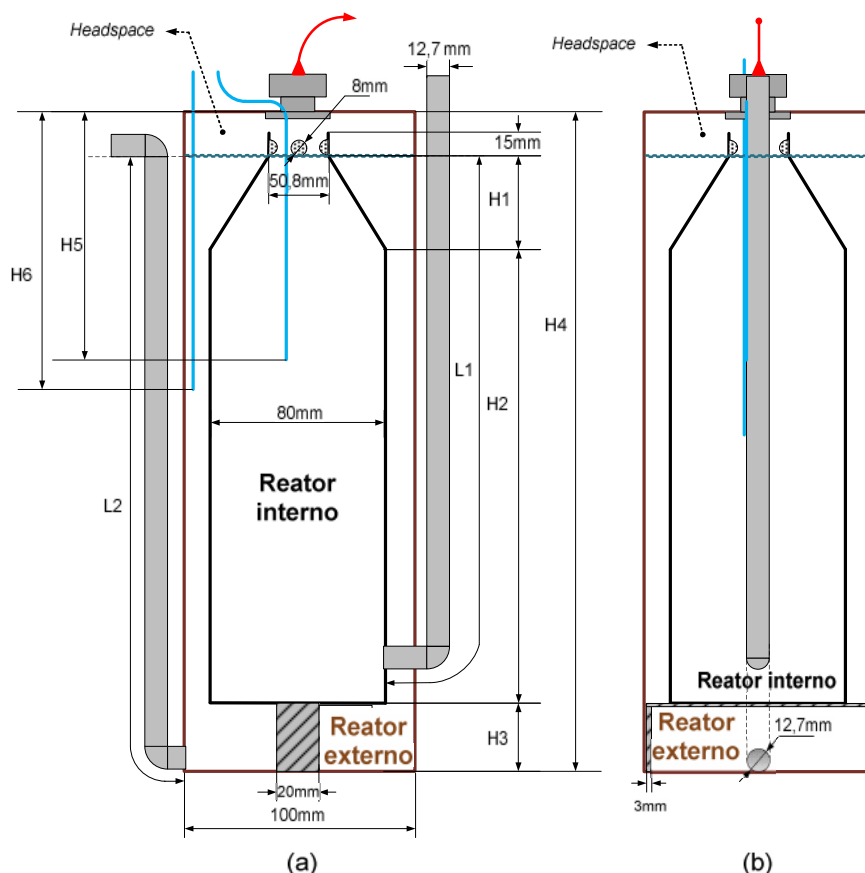


Figura 10: Simbologia das dimensões do protótipo a ser construído (a) vista frontal, (b) vista lateral. Fonte: Autoria própria.

A dimensão específica para cada um dos reatores construídos é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Dimensões dos protótipos construídos.

Reator	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	H5 (mm)	H6 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	Volume reator		Volume headspace (mL)
									Interno* (mL)	Externo* (mL)	
R1	26	189	53	288	92	109	225	285	1065	1045	152
R2	24	193	49	288	94	111	225	282	1070	1028	171
R3	22	192	59	289	87	107	220	291	1056	1071	123

* Os volumes dos reatores tanto interno como externo de todos os reatores construídos incluem também o volume respectivo das tubulações de entrada de biomassa e saída do efluente empregando os comprimentos L1 e L2.

Fonte: Autoria própria.

Os reatores construídos na sua forma real são apresentados na Figura 11; para fixar as peças foi empregada uma cola para vários usos (PVC, metal, madeira, e outros). Por outro lado, como o foco do projeto é empregar o desenho do reator em

áreas rurais, os reatores foram instalados para seu funcionamento diretamente no meio ambiente, mas para evitar mudanças bruscas na temperatura, os reatores foram colocados em câmaras de isopor. Além disso, para o controle de pH e DQO em cada reator construído, foram colocadas mangueiras em suas tampas com válvulas para evitar a entrada de ar no sistema.

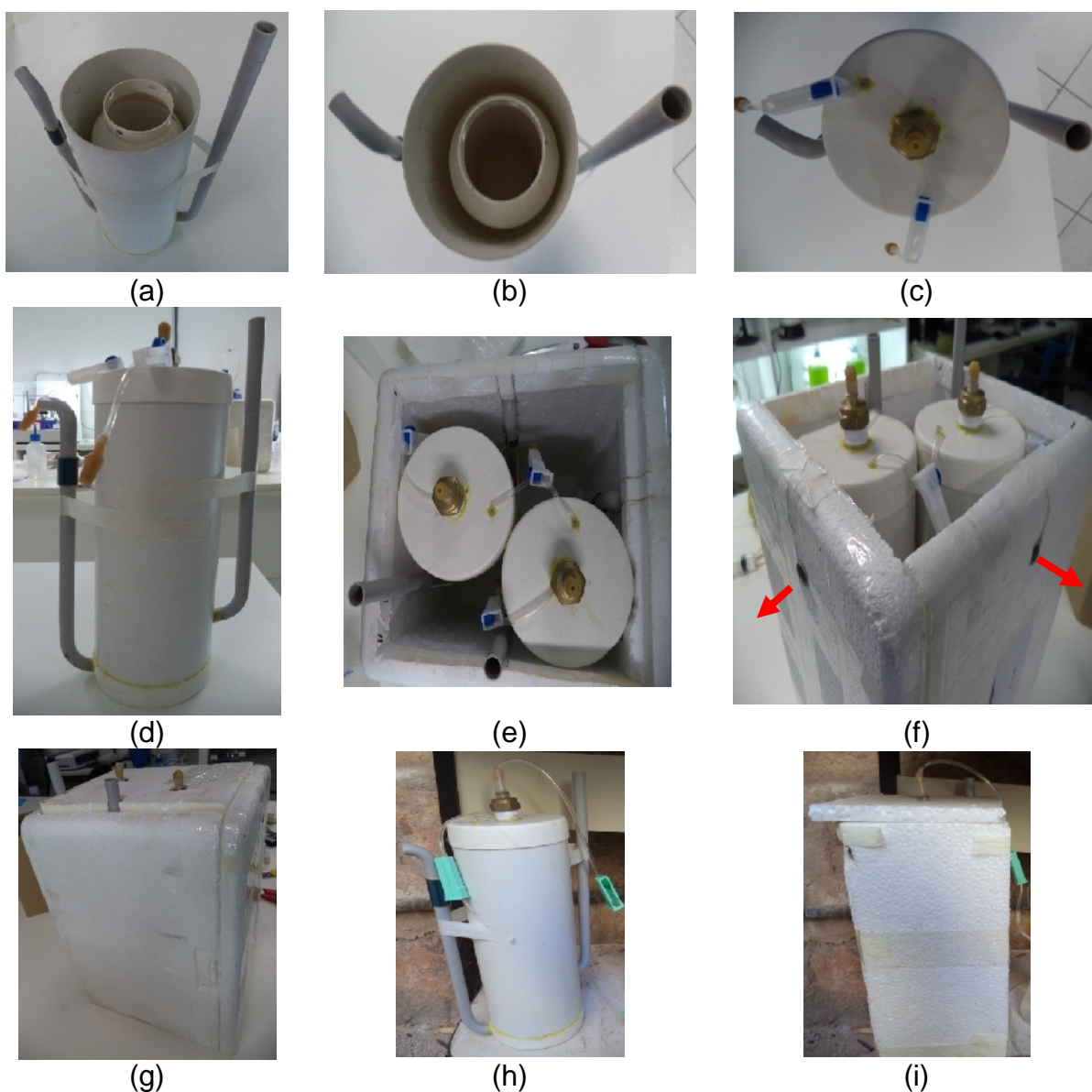


Figura 11: Reatores construídos (a) sistema interno, (b) vista interna, (c) tampa do reator com as saídas para tomar as amostras para a medição de pH e DQO, (d) vista lateral do reator pronto, (e) reatores 1 e 2 dentro da caixa de isopor, (f) reatores 1 e 2 com suas saídas de efluente nos lados da caixa de isopor, (g) sistema fechado dos reatores 1 e 2, (h) reator 3, (i) reator 3 dentro de sua caixa de isopor.

Fonte: Autoria própria.

4.3.4 Planejamento da Produção e Número de Experimentos

Como o seu próprio nome indica, a produção nos reatores é do tipo semi-continua. Por tal motivo a carga da biomassa foi planejada em períodos de tempo diferentes para cada reator (R1 e R2), com a finalidade de avaliar os períodos ótimos de alimentação de material orgânico para obter uma maior quantidade de biogás. Os reatores foram submetidos a três ensaios, em que para cada um foi definido um período de trabalho em função do tempo de degradação da biomassa. Para isso, foram empregadas as seguintes referências [49,85,86], das quais se obteve um tempo de degradação médio de 30 dias, que é o tempo no qual a biomassa deixa de produzir biogás, ou a produção resultante é menor que 1% do volume total acumulado.

O primeiro ensaio foi realizado com período de alimentação de 30 dias, carregando ambos os reatores com substrato e inóculo, e os outros dois ensaios foram carregados apenas com biomassa de microalgas, mas com a diferença que o reator R1 teve alimentações de material orgânico 3 vezes semanalmente (a cada 7 dias) e uma de 9 dias, para complementar os 30 dias do tempo de retenção, o reator R2 teve alimentações quinzenais (a cada 15 dias).

O reator R3 foi alimentado somente com inóculo para avaliar a quantidade de biogás gerado pelo mesmo, e assim determinar o biogás gerado exclusivamente pela biomassa de microalgas nos reatores R1 e R2. Este reator foi carregado apenas uma vez no mesmo tempo correspondente a um ensaio dos outros reatores.

4.3.5 Colheita e Análise da Biomassa

A biomassa foi coletada em duas etapas para obter uma maior quantidade de sólidos totais [13]. Para isso, a biomassa foi coletada com seu meio de cultivo líquido e submetida ao processo de floculação para separar a biomassa do meio. Posteriormente a mesma foi centrifugada, obtendo assim a biomassa úmida com um maior conteúdo de sólidos. As etapas de colheita foram realizadas no LABEC, mas a medição de sólidos foi realizada no LABRE, da Escola Politécnica da UFBA.

4.3.5.1 Floculação

A biomassa foi coletada junto com o meio de cultivo em galões de 20 (L), e para iniciar a floculação da biomassa foi empregada uma solução de 2 (L) de quitosana [87], a qual foi preparada através da dissolução de 2 (g) de quitosana em 400 (mL) de 0,1 (M) HCl, fazendo uso de um agitador magnético IKA® HS 7, durante 20 minutos, logo após foram adicionados 1600 (mL) de água destilada e agitou-se por mais 10 minutos. A solução de quitosana foi adicionada nos galões e deixou-se repousar por 24 horas. O sobrenadante foi removido, e a biomassa restante ainda úmida foi colocada em Erlenmeyers de 2 (L), deixando repousar por mais 2 horas para retirar o sobrenadante restante.

4.3.5.2 Centrifugação

Após obter a biomassa floculada, como a mesma ainda continha altos níveis de umidade, foi necessária uma etapa de centrifugação. Deste modo, a biomassa úmida passou 6 minutos a 4.400 RPM numa centrífuga (Centrifuge 5702 Eppendorf®).

Na Figura 12 se apresenta a biomassa de microalgas na fase de floculação e após a centrifugação.

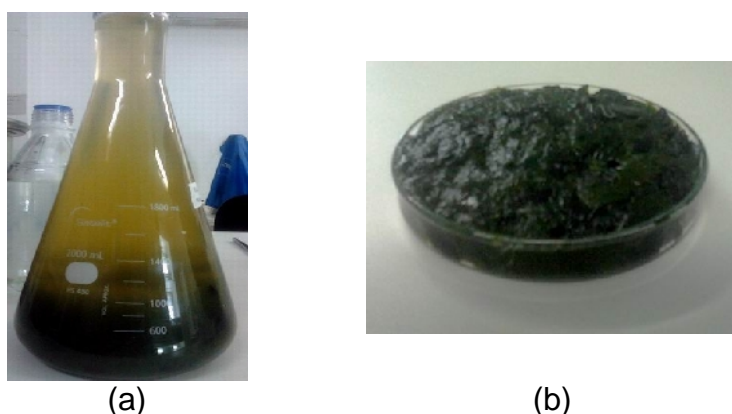


Figura 12: Etapas de colheita da biomassa (a) biomassa floculada antes da remoção do sobrenadante restante, (b) biomassa após a centrifugação.

Fonte: Autoria própria.

4.3.5.3 Sólidos Totais e Sólidos Voláteis (ST, SV)

Para avaliar a quantidade adequada de material orgânico que ingressa em cada reator, assim como os sólidos contidos no efluente, foi empregado o Método 2540 G segundo [77].

4.3.6 Quantidades de Carga de Material Orgânico aos Reatores

Para estimar a quantidade de biomassa que deve ingressar em cada reator é preciso conhecer a quantidade de sólidos totais e sólidos voláteis da biomassa. A Tabela 7 apresenta dados da literatura específica, relacionados ao carregamento de biomassa e inóculo:

Tabela 7: Relação entre o volume de reatores, sua quantidade de biomassa e inóculo utilizado segundo diferentes publicações.

Publicação	Volume do reator (mL)	Quantidade de biomassa por reator	Quantidade de inóculo (mL)	Referência
Energy recovery from lipid extracted, transesterified and glycerol codigested microalgae biomass.	500	4 ± 0,05 g ST	400	[49]
Anaerobic digestion of microalgae residues resulting from the biodiesel production process.	2000	5-40 g SV L ⁻¹	0	[65]
Anaerobic digestion of cyanobacteria and <i>chlorella</i> to produce methane for biofuel.	330	1 – 9 g SV	300	[85]
Influence of different pre-treatment routes on the anaerobic digestion of a filamentous algae.	500	4 ± 0,05 g ST	300	[89]
Biochemical Methane Potential of microalgae biomass after lipid extraction	160	3 g ST/kg, 10 g ST/kg e 20 g ST/kg	3 g ST/kg, 10 g ST/kg e 20 g ST/kg	[90]

Fonte: Adaptado de [88].

Para se obter uma quantidade de biomassa adequada ao dimensionamento dos reatores construídos, foi considerada a referência do autor [49] (4 gST da biomassa de microalgas para um reator de 500 mL de volume total, e o volume de inóculo equivalente a 80% do volume do reator). Desse modo, para cada reator usado no presente trabalho, as cargas de material orgânico foram estabelecidas conforme o volume total de cada reator, e a quantidade de sólidos totais da

biomassa de microalgas empregadas para cada ensaio, estabelecendo assim quantidades totais de biomassa de microalgas úmida, inóculo e água destilada a serem carregados a cada reator para a produção de biogás. Todos estes dados são apresentados na Tabela 8. Vale se ressaltar que devido à disponibilidade de matéria-prima, não foram realizados testes em duplicata ou triplicata, mas para a avaliação dos resultados foi considerada uma porcentagem de segurança para os cálculos correspondentes ao dimensionamento do reator em escala real.

Tabela 8: Quantidade de biomassa, inóculo, e água, carregados a cada reator.

Reator	Volume do reator (mL)	Ensaio	Sólidos totais da biomassa (g ST/kg biomassa úmida)	Quantidade de alimentação		
				Biomassa de microalgas (g ST / L.dia)	Inóculo (g ST / L.dia)	Água destilada (mL / L.dia)
R1	2262	1	96,24	0,27	0,71*	1,65
		2	92,44	0,27	0	28,20
		3	71,95	0,17	0	12,10
R2	2269	1	96,24	0,27	0,30*	1,38
		2	92,44	0,27	0	27,94
		3	71,95	0,19	0	12,83
R3	2250	1	0,00	0,00	0,37*	1,67

* As quantidades do inóculo em volume foram equivalentes aos 80% do volume total de cada reator [49], mas na prática existiu uma variação no seu conteúdo de sólidos totais, porém as quantidades das microalgas e da água foram semelhantes para os reatores R1 e R2.

Fonte: Autoria própria.

Como se fez menção no item 4.3.4 (Planejamento da produção e número de experimentos), no segundo e terceiro ensaio dos reatores, as cargas foram realizadas em períodos semanais (R1) e quinzenais (R2), onde as cargas semanais de R1 foram realizadas seguindo três cargas consecutivas de sete dias e considerando mais nove dias adicionais para completar o período de 30 dias de degradação da biomassa, sendo assim que a quantidade de biomassa dessa última semana foi maior por tratar-se de mais tempo. Com base nos dados da Tabela 8, em que se apresentam as quantidades totais de carga de biomassa de microalgas e água por ensaio para cada reator, podem-se estimar as quantidades de cargas semanais e quinzenais respectivas para cada reator por ensaio de experimento.

O efluente coletado foi removido conforme o material orgânico era adicionado, devido ao equilíbrio hidrodinâmico existente no sistema, ao carregar a biomassa uma quantidade equivalente saía dos reatores, e ao finalizar cada ensaio, o efluente foi também submetido à análise de sólidos.

Ao finalizar todos os ensaios de cada reator, além de avaliar os sólidos contidos no efluente final, também foi avaliada a quantidade de sólidos contidos dentro do reator para a realização do balanço de massa durante o processo de produção do biogás, identificando a quantidade de biomassa que ficava dentro dos reatores após o tempo de degradação.

4.3.7 Purificação e Quantificação do Biometano Gerado

Uma vez os reatores operando e gerando biogás, o produto deve ser submetido a uma etapa de purificação para garantir que o biocombustível gerado seja constituído exclusivamente por metano. Para isso, segundo os autores [49,65,91], o biogás pode ser posto em contato com uma solução de hidróxido de sódio, na qual é retido o dióxido de carbono e outros compostos presentes em menores proporções como o sulfeto de hidrogênio, liberando assim somente o metano. No caso dos testes realizados, foi empregado um Erlenmeyer de 250 (mL) com uma solução de NaOH a 5%, em que o biogás foi borbulhado para obter assim o metano, que foi medido a partir do deslocamento de água numa proveta invertida de 100 (mL) de capacidade. Uma vez que o metano preenchia a capacidade da proveta, a válvula de saída do gás era fechada para encher a proveta de água novamente, e continuar com a quantificação do volume de biocombustível gerado. Como o sistema estava diretamente em contato com o meio ambiente, a água onde ficava posicionada a proveta também era trocada assim que apresentasse algum material estranho. A Figura 13 mostra o sistema empregado na literatura, assim como o usado nos testes do presente trabalho.

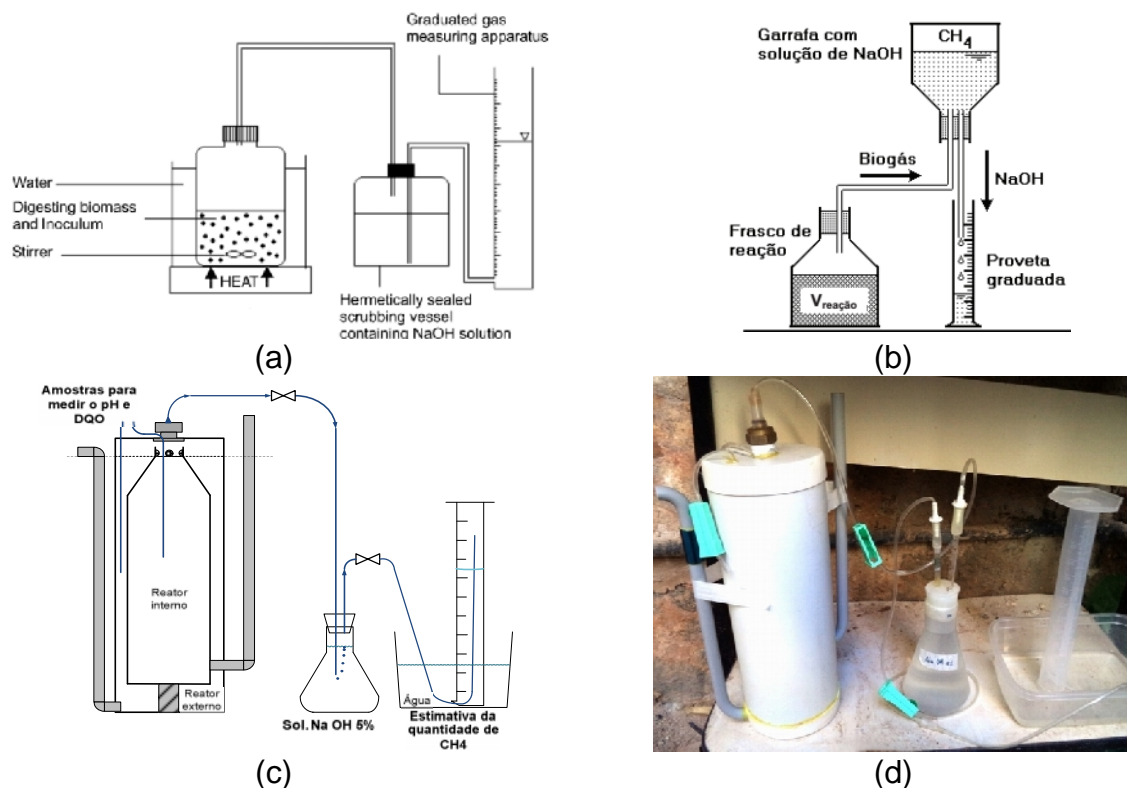


Figura 13: Purificação do biogás (a) por deslocamento do hidróxido de sódio [49], (b) por deslocamento do hidróxido de sódio empregando um frasco de Mariotte [91], (c) esquema do sistema utilizado, (d) vista real do sistema empregado (antes de colocar o reator dentro do isopor).

Fonte: Autoria própria com base em [49,91].

4.3.8 Quantificação da Demanda Química de Oxigênio (DQO), e Níveis de pH no Afluente e Efluente

A estimativa dos níveis de DQO e pH do afluente e efluente, foram realizadas semanalmente no laboratório LABRE da Escola Politécnica da UFBA. Para a medição da DQO foi empregado o método de refluxo fechado e determinação colorimétrica do autor [77], e para a medição do pH, foi utilizado um pHmetro de laboratório da marca Digimed®.

4.3.9 Estimativa do Conteúdo de Carbono e Nitrogênio na Biomassa da Microalga *Chlorella sp.* Empregada nos Testes

Para estimar os níveis de nitrogênio foi empregado o método de digestão Kjeldahl do autor [77] e determinação titulométrica, e para a estimativa do nível de carbono total, foi usado o sistema de alta combustão de sólidos (1200°C) em analisador multi N/C®2100 da marca Analytik Jena.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos testes realizados, neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, úteis para se estimar a produção de biogás, com a finalidade de projetar as dimensões para a construção do protótipo de reator em escala real, sendo capaz de fornecer biogás a uma família, considerando todos os componentes e acessórios necessários para seu correto funcionamento, e armazenamento do gás. Finalmente, é apresentado um breve manual de operação, manutenção, e segurança do reator.

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES

5.1.1 Produção de Biometano nos Reatores

A produção de biogás nos reatores foi monitorada diariamente, mas foi quantificada diretamente como biometano gerado. Pelo seu desenho, o modo de funcionamento dos reatores possuía uma etapa inicial na qual a alimentação é composta pelo substrato (biomassa de microalgas), inóculo (lodo anaeróbio) e água destilada. Essa etapa demorou 30 dias com a finalidade de acelerar o processo de degradação do substrato nas cargas posteriores, e após essa etapa procedeu-se a alimentação dos reatores de forma semi-contínua semanal ou quinzenal somente com substrato e água por um período contínuo de 69 dias para o reator R1, e 62 dias para o reator R2.

As quantidades produzidas pelos reatores são apresentadas na Figura 14, em que nos primeiros 30 dias os reatores R1 e R2 estavam carregados com substrato, inóculo, e água destilada, e após desse tempo o reator R1 teve alimentações semanais, e o R2 quinzenais. O reator R3 teve uma carga unicamente de inóculo e água. As quantidades de alimentação foram apresentadas na Tabela 8.

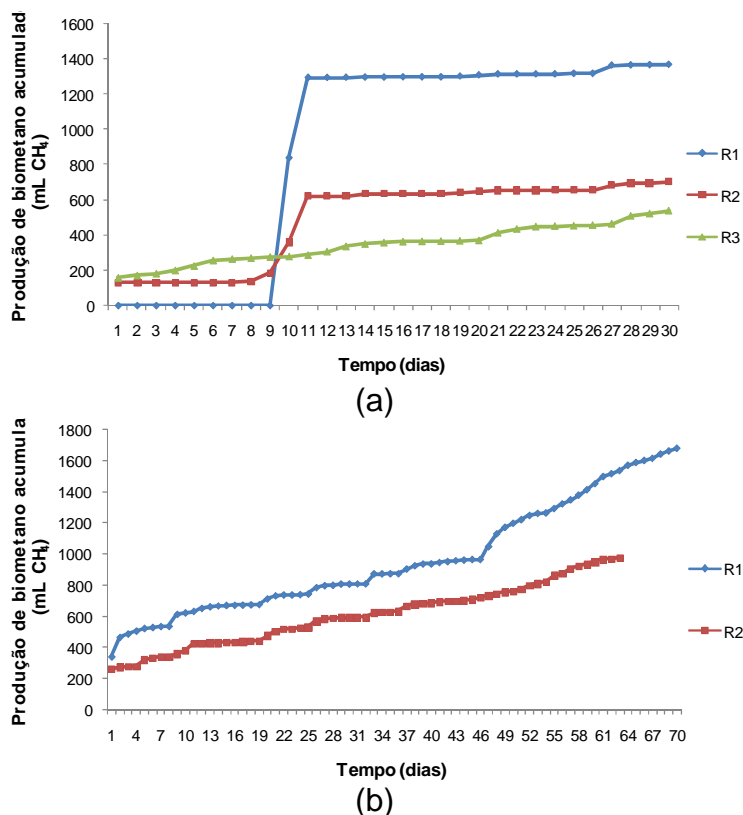


Figura 14: Produção de biometano acumulado (a) nos reatores R1, R2, e R3 nos primeiros 30 dias de operação, (b) gerado só pelas microalgas nos reatores R1 e R2 após 30 dias da primeira carga.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 14 é evidente que existe uma produção significativa do biocombustível nos reatores R1 e R2 entre os dias 9 e 13, isso se deve à modificação do sistema de purificação do biogás conforme a Figura 13. O sistema anterior acumulava o biogás e não permitia a saída do biometano para a quantificação, além de que parte do biogás também ficou na câmara *headspace* dos reatores. Desse modo, ao mudar o sistema de purificação, o biogás retido foi liberado, resultando numa grande quantidade de metano medido durante esse período. Por outro lado, a Figura 14 também apresenta uma produção elevada nos primeiros 30 dias devido à presença de inóculo dentro do reator. Após isso, as cargas foram sequenciais só com biomassa de microalgas, resultando numa produção de biogás mais uniforme.

No caso do reator R3, como ele tem a função de estimar a quantidade de biometano gerado somente pelo inóculo e não foi submetido a cargas de biomassa, teve uma produção de biogás com um incremento regular a cada sete dias. É possível que tenha um comportamento de acumulação do biogás nesse tempo

devido ao modo de medição do metano gerado. Como foi apresentada na Figura 13, a forma de quantificar o volume do gás, foi empregando uma proveta invertida, a qual tinha certa capacidade que forçava fechar e abrir a válvula de saída de metano, cada vez que enchia o volume medível da proveta. Mesmo as medições foram realizadas diariamente, esse processo de medição alterava a pressão de saída do metano e, por conseguinte a acumulação de gás a cada sete dias aproximadamente. No caso do protótipo de reator em escala real, é contemplado um reservatório de biogás, e uma câmara *headspace* com capacidades adequadas para armazenar todo o biogás gerado assim que seja produzido, evitando o aprisionamento do biogás dentro do reator.

Para avaliar o comportamento da produção de metano apenas das cargas com microalgas, a Figura 15 apresenta o nível de produção líquido de biometano nos dias em que somente foi alimentado o substrato (após os primeiros 30 dias de operação dos reatores R1 e R2 e abatendo a produção oriunda do inóculo), onde o comportamento na geração de metano, para os reatores apresentam duas produções maiores em períodos menores do que os 15 dias ao igual que no caso do reator R3, mas como foi dito com anterioridade, é devido ao método de quantificação do metano produzido, e tem-se contemplada uma solução para essa situação. Por outro lado, para finalizar os testes, e o terceiro ensaio para os reatores R1 e R2, após 45 dias, foram ingressadas cargas de água destilada para manter a mistura nos reatores, assim como para deslocar parte a parte o efluente digerido dentro dos reatores, tempo no qual a produção de biogás foi-se tornando mais regular no reator R1 com valores de produção entre 13 e 34 (mL CH₄/dia), e no caso do reator R2 como as cargas foram a cada 15 dias, o biogás gerado nos últimos 16 dias foi resultado das últimas cargas que misturaram a biomassa interna do reator, demonstrando uma diminuição na produção de biogás.

Na Tabela 9, são apresentadas as quantidades de biometano gerado para cada um dos reatores empregados, indicando o tempo em dias de operação acumulados, e as quantidades de matéria orgânica e água utilizada.

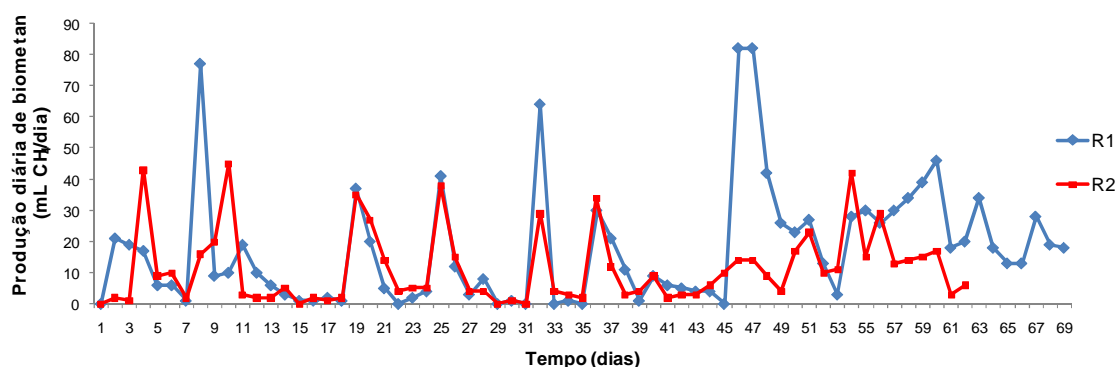


Figura 15: Produção líquida diária de biometano nos reatores R1 e R2 após 30 dias da primeira alimentação.
Fonte: Autoria própria.

Tabela 9: Quantidade de biometano gerado por reator.

Reator	Ensaio	Tempo de operação acumulado (dias)	Quantidade de biomassa úmida de microalgas (g)	Quantidade de lodo anaeróbio (g)	Quantidade de água destilada (mL)	Biometano gerado (mL CH ₄)
R1	1	30	188,03	1.810	112	1.495
	2	61	195,76	0	1.914	342
	3	99	164,12	0	821	868
R2	1	30	188,63	1.815	94	714
	2	61	196,39	0	1.902	317
	3	92	176,40	0	873	380
R3	1	30	0,00	943	113	537

Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Balanço de Massa

Para realizar um balanço de massa adequado, os sólidos totais de cada material orgânico empregado foram levados em consideração, tanto do substrato quanto do inóculo que entrou e saiu do sistema para cada um dos reatores. Dessa forma, foi possível estimar a quantidade de biometano obtido por quantidade de sólido total degradado, mas devido à complexidade na produção de biogás, é importante considerar os seguintes aspectos:

- No início dos testes, empregou-se inóculo para quantificar a produção especificamente do metano gerado pelas microalgas, assim o balanço de massa será medido primeiramente para o reator R3.
- Parte da biomassa que ingressou no reator nas respectivas cargas de alimentação ficava ainda algum tempo depois do que deveria dentro dos reatores, assim no final dos testes existia uma quantidade de biomassa dentro do reator.

- Além do efluente que saía dos reatores cada vez que era carregada a biomassa, tomaram-se amostras dos reatores para as medições de DQO e pH, que foram quantificadas cada vez que eram coletadas.
- No caso específico do reator R1, nos dias 75 a 78 dos testes, foi apresentado um excesso na produção de biogás, que provocou uma saída da biomassa do sistema, a qual também foi quantificada através da entrada de água destilada no sistema até que chegasse novamente ao equilíbrio hidrodinâmico.
- Ao final dos testes foi medida a quantidade de biomassa sólida, e a parte líquida que ficaram nos reatores, para assim determinar o nível de biomassa que foi degradada.
- Como o processo de degradação não foi uniforme, quer dizer que parte da biomassa inicial ficou até o segundo ou terceiro ensaio, o balanço de massa foi levado a cabo por etapas, mas quantificada como um todo.

5.1.2.1 Balanço de Massa no Reator R3

A entrada e saída do lodo anaeróbio dentro do reator R3 são apresentadas na Tabela 10, a qual representa a única carga de biomassa degradada num tempo de 30 dias, nos quais não se ingressou mais material orgânico ao reator, com a finalidade de quantificar somente a produção de metano por quantidade de lodo, o reator e as condições em que foi realizado este teste foi similar aos outros.

Tabela 10: Entrada e saída de material orgânico no reator R3.

Ensaio	Quantidade de lodo anaeróbio		Sólidos degradados (g ST)	Biometano produzido (mL CH ₄)
	Entrada (g ST)	Saída (g ST)		
1	25,07	21,76	3,31	537

Fonte: Autoria própria.

Com base nesses dados a quantidade de biometano em relação aos sólidos totais degradados pôde ser calculada empregando a seguinte equação:

$$QPM = \frac{PAM}{Q_{ST\text{entrada}} - Q_{ST\text{saída}}} \quad (1)$$

Em que:

QPM = Quantidade produzida de metano (mL CH₄/g ST)

PAM = Produção acumulada de metano (mL CH₄)

Q_{ST entrada} = Quantidade de sólidos totais ingressados no reator (g ST)

Q_{ST saída} = Quantidade de sólidos totais que saíram do reator após o tempo de degradação (g ST).

Empregando a equação (1), a produção de metano por quantidade de sólidos totais degradados para o lodo anaeróbio utilizado como inóculo nos testes com microalgas resulta em 162,24 (mL CH₄/gST), valor que serviu como padrão para estimar as quantidades de biometano gerado pelas microalgas nos reatores R1 e R2. A diferença nas quantidades de material líquido neste reator pode ser correspondente à quantidade de material que foi convertido em biometano.

5.1.2.2 Balanço de Massa no Reator R1

A Tabela 11 apresenta um esquema que contém as quantidades gerais de sólidos totais que estiveram em contato com o sistema em todo o tempo dos testes, mesmo valor que serviu para fazer os cálculos correspondentes de entrada e saída do material orgânico.

Tabela 11: Entrada e saída de material orgânico no reator R1.

Ensaio	Quantidade de Entrada		Quantidade de Saída		Biometano produzido (mL CH ₄)
	Substrato (g ST)	Inóculo (g ST)	Amostras DQO e pH (g ST)	Efluente (g ST)	
1	18,10	48,09	0,58	8,73	1.495
2	18,10	0,00	0,32	14,92	342
3	11,80	0,00	0,07	60,09	868
Totais	96,09		84,71		2.705

Fonte: Autoria própria.

Os dados da Tabela 11 possibilitam somar as quantidades de sólidos totais que ingressaram no reator e subtrair aqueles que saíram durante todo o período dos testes, a soma de toda a matéria orgânica que ingressou (substrato e inóculo) equivale a 96,09 (g ST), e toda a quantidade que saiu do reator mais aquela que ficou retida dentro dele equivale a 84,71 (g ST), desse modo a quantidade de biomassa que foi degradada e convertida em biometano é de 11,38 (gST), mas parte desta biomassa corresponde ao inóculo empregado. Para obter a quantidade estimada de sólidos totais de lodo anaeróbio convertido em metano, empregaram-se os resultados obtidos no reator R3.

Para estimar a quantidade degradada do inóculo foram empregados os resultados de sólidos totais obtidos no afluente e efluente do reator R3, no início do teste o lodo anaeróbio continha 25,07 (g ST), e ao final 21,76 (g ST), o que representa uma porcentagem de 13,19% dos sólidos totais do material que ingressou. Seguindo o mesmo raciocínio com relação ao reator R1, uma estimativa da quantidade de lodo que foi degradada no reator, pôde ser calculada empregando essa porcentagem e a quantidade inicial de sólidos totais ingressados, resultando num valor de 6,34 (g ST) de sólidos totais degradados do inóculo que ingressou no reator R1. Com esse valor, e a produção de biometano produzido no reator R3 (162,24 mL CH₄/g ST), pôde-se estimar a quantidade de metano gerado no reator R1 correspondente somente ao inóculo. Dessa forma, fazendo a multiplicação entre ambos dados, o inóculo gerou aproximadamente 1.028,60 (mL CH₄).

Com a quantidade de sólidos totais do inóculo já degradado, e seu nível de produção de metano, podem-se estimar os sólidos da biomassa de microalgas que foram degradados e a quantidade de metano por sólidos totais. Subtraindo os 6,34 (g ST) do inóculo da quantidade de sólidos totais degradados (11,38 g ST), tem-se que a biomassa da microalga *Chlorella sp.* que foi degradada é de 5,04 (g ST). Por outro lado, considerando a quantidade total de metano gerado (2.705 mL CH₄) dos quais 1.028,60 (mL CH₄) correspondem ao inóculo, obtemos que a biomassa de microalgas gerou um total de 1.676,40 (mL CH₄). Com os valores da quantidade de biomassa degradada e o nível de produção de metano, a microalga *Chlorella sp.*, no reator R1 gerou aproximadamente 332,62 (mL CH₄/g ST). Este valor em relação aos resultados obtidos na literatura é em alguns casos baixo [17,49], mas em outro como o caso do autor [29], a quantidade produzida é semelhante para a espécie *Chlorella sp.*, embora a produção relativamente baixa possa ser resultado do emprego de biomassa mista de microalgas, a qual pelo fato de possuir outros microrganismos influi na produção de biogás.

5.1.2.3 Balanço de Massa no Reator R2

Seguindo a metodologia empregada no reator R1, procedeu-se o cálculo da quantidade de biometano por sólidos totais obtidos pelas microalgas no reator R2.

Na Tabela 12, é apresentado o esquema que contém as quantidades gerais de sólidos totais que serviu para realizar os cálculos correspondentes de entrada e saída do material orgânico.

Tabela 12: Entrada e saída de material orgânico no reator R2.

Ensaio	Quantidade de Entrada		Quantidade de Saída		Biometano produzido (mL CH ₄)
	Substrato (g ST)	Inóculo (g ST)	Amostras DQO e pH (g ST)	Efluente (g ST)	
1	18,15	20,49	0,29	5,52	714
2	18,15	0,00	0,13	4,88	317
3	12,69	0,00	0,05	50,96	380
Totais	69,48		61,83		1.411

Fonte: Autoria própria.

Com os dados fornecidos na Tabela 12, da mesma forma que no caso do reator R1, somando as quantidades que ingressaram e saíram do reator, estima-se que a biomassa de entrada é de 69,48 (g ST), e a de saída 61,83 (g ST), com uma diferença de 7,65 (g ST) da biomassa degradada. Como esta ainda conta com a biomassa degradada do inóculo, esta foi subtraída fazendo uso dos resultados obtidos do reator R3, em que neste caso a biomassa do lodo anaeróbico conta com 20,49 (g ST), dos quais 13,19% foi degradada, obtendo assim que a biomassa correspondente ao inóculo degradado é de 2,70 (g ST), e por conseguinte a biomassa relacionada às microalgas degradadas corresponde a 4,95 (g ST).

Considerando a quantidade de sólidos degradados do inóculo, a quantidade de biometano gerado empregando os resultados do reator R3 (162,24 mL CH₄/g ST), corresponde a 438,05 (mL CH₄). Dessa forma, este valor é subtraído da quantidade total de biometano gerado neste reator (1.411 mL CH₄), obtendo assim uma quantidade aproximada de biocombustível produzido pelas microalgas de 972,95 (mL CH₄).

Com as quantidades de biomassa, e o nível de produção de biometano das microalgas degradadas nos testes do reator R2, a geração de biocombustível em relação aos sólidos totais degradados resultou em 196,56 (mL CH₄/g ST). Este valor em relação aos resultados obtidos na literatura [17,49,29], e em comparação com o resultado obtido no teste do reator R1, é notavelmente inferior.

A Figura 14 que apresenta os níveis de produção dos reatores identificou uma menor produção para este tipo de reator, mas essa diferença, como foi

demonstrada nestes testes, está relacionada com o tipo e os períodos de alimentação dos reatores. No caso do reator R1, a produção foi maior ainda que exigisse mais tempo, devido às cargas semanais que, por serem em períodos inferiores aos 15 dias, movimentavam a biomassa interna do reator liberando possíveis bolhas de biogás preso dentro do reator e melhorando o contato da superfície do substrato com o meio líquido, o que gerou uma quantidade superior de biogás. De acordo com o protótipo de reator proposto, para uma maior e melhor produção de biogás, é recomendável carregar quantidades de material orgânico em períodos semanais ou inferiores aos 15 dias.

5.1.3 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

As estimativas da demanda química de oxigênio foram realizadas coletando amostras semanalmente de forma contínua durante todo o período dos testes, as respectivas estimativas de DQO para cada reator são apresentadas na Figura 16, na qual se pode identificar que existe uma diminuição conforme o transcorrer do tempo e degradação do material orgânico. Os valores da DQO foram estimados em função da quantidade de biomassa que ingressava periodicamente no reator.

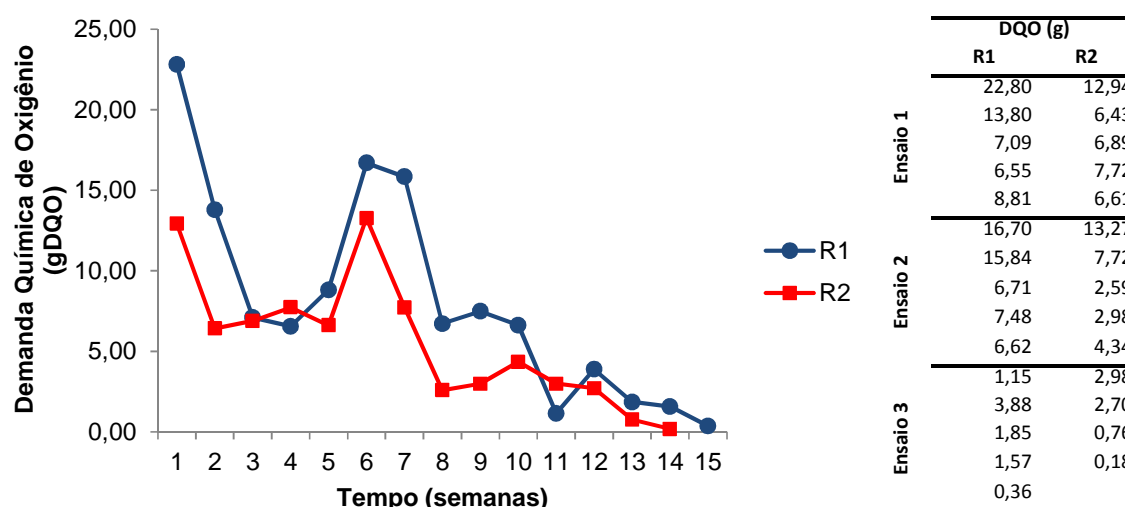
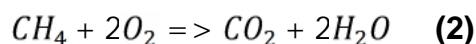


Figura 16: Demanda química de oxigênio por semana para cada reator.

Fonte: Autoria própria.

Partindo do nível de diminuição da demanda química de oxigênio nos reatores, de acordo com o autor [23], foi possível estimar a quantidade de biometano gerado empregando as seguintes equações:



$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (3)$$

$$K(t) = \frac{P \cdot K}{R (273+t)} \quad (4)$$

Em que:

V_{CH_4} = Volume de metano produzido (L CH_4)

DQO_{CH_4} = Quantidade de DQO removida do reator e convertida em metano (g DQO)

$K(t)$ = Fator de correção para a temperatura operacional do reator (g DQO/L)

P = Pressão atmosférica (1 atm)

K = DQO correspondente a 1 mol de CH_4 (64 g DQO/mol)

R = Constante dos gases (0,08206 atm.L/mol K)

t = Temperatura operacional do reator ($^{\circ}C$).

Conforme as equações (2), (3) e (4), e os dados fornecidos na degradação da demanda química de oxigênio, pôde-se estimar as quantidades de metano gerado teoricamente para cada reator, e compará-los com os obtidos experimentalmente. Estas estimativas são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13: Quantidade de biometano gerado por reator a partir da degradação da demanda química de oxigênio.

Reator	Ensaio	DQO inicial (g)	DQO final (g)	DQO degradado (g)	DQO _{CH₄} (g)	K(t) t=30°C (gDQO/L)	Biometano gerado (L CH ₄)
R1	1	22,80	8,81	13,99	3,50	2,57	1,361
	2	16,70	6,62	10,08	2,52	2,57	0,981
	3	1,15	0,36	0,79	0,20	2,57	0,077
R2	1	12,94	6,61	6,33	1,58	2,57	0,616
	2	13,27	4,34	8,93	2,23	2,57	0,869
	3	2,98	0,18	2,80	0,70	2,57	0,272

Fonte: Autoria própria.

Totalizando a produção de metano teórico para cada reator, obtém-se que os reatores R1 e R2 geraram respectivamente 2.419 (mL) e 1.757 (mL) de biometano durante todo período de realização dos testes, assim como uma produção equivalente a 97,3 e 97,25 (mL CH_4 /g DQO degradado). Comparando estes resultados com os obtidos na Tabela 9 é notável uma semelhança entre os

níveis de produção real do reator R1 que gerou 2.705 (mL CH₄), e 108,81 (mL CH₄/g DQO degradado) tendo somente uma variação de 10% em relação às quantidades estimadas com o real. Porém no caso do reator R2, existe uma variação mais relevante onde a quantidade de metano esperado supera em 24% ao valor alcançado no teste que foi de 1.411 (mL), e comparando-se a produção por quantidade de DQO degradado, teve uma variação de 20% a menos do esperado teoricamente. Vale-se ressaltar que este reator estava sujeito a cargas quinzenais, não teve um bom rendimento na produção de biogás em comparação ao reator R1. Por outro lado, os dados teóricos consideram comportamentos ideais, por exemplo, considera-se que a temperatura média é constante, mas a mesma modificou-se de acordo com a passagem do dia para a noite durante todo o período em que os reatores estavam em funcionamento, assim como em temporadas de chuva em que a temperatura diminuía durante alguns dias chegando a 23°C, e em outros dias em que a temperatura chegava a 32°C. O fator de correção para a temperatura operacional do reator pode chegar a ter variações que influem na estimativa teórica da quantidade de biometano gerado, mesmo assim estes valores indicam que o reator R1 apresenta melhores resultados do que o reator R2 com resultados próximos aos calculados teoricamente.

5.1.4 Níveis de pH Alcançados nos Testes

Para estimar os níveis de pH na biomassa dentro dos reatores, as medições foram realizadas conjuntamente às da DQO, utilizando as mesmas amostras, desse modo o pH foi monitorado semanalmente para cada um dos reatores. Em todo o tempo dos experimentos, as amostras não apresentaram níveis de pH superiores a 8 ou inferiores a 6, por isso não foi preciso adicionar nenhum tipo de reagente ou solução tampão para manter o pH neutro. A Figura 17 apresenta os resultados dos níveis de pH em todo o período do experimento.

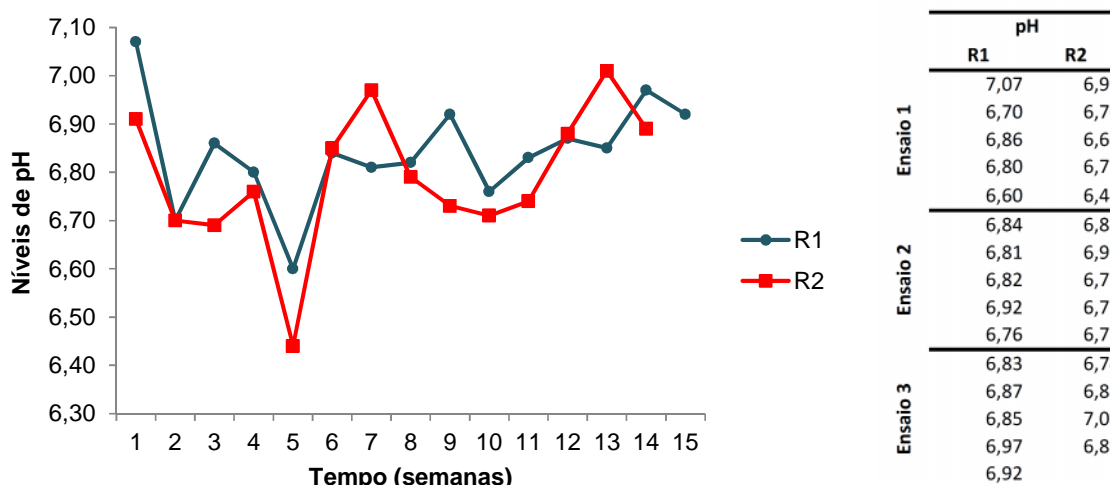


Figura 17: Níveis de pH por semana para cada reator.
Fonte: Autoria própria.

Os valores médios de pH, para os reatores R1 e R2 são 6,84 e 6,79 respectivamente. Segundo a literatura mencionada no item 3.2.1 (Fatores que influem na digestão anaeróbia), o nível ótimo de pH deve estar na faixa de 6,8 a 7,2, e os valores medidos durante os experimentos apresentaram-se em média próximos a estes recomendados pela literatura. Os níveis de pH foram próximos a 7 possivelmente porque as cargas da mistura de biomassa que eram alimentadas a cada reator possuíam uma maior proporção de água.

5.1.5 Relação Carbono Nitrogênio (C/N)

Para estimar a relação carbono/nitrogênio da biomassa da microalga *Chlorella sp.*, empregada nos testes, avaliou-se as quantidades de cada componente independentemente, resultando numa média de 66,7 (g Nitrogênio/kg biomassa), e 379 (g Carbono/kg biomassa). Com estes valores, a relação C/N da biomassa equivale a 5,68, valor que esta dentro da faixa calculada pelo autor [49]. Deste modo é evidente que a biomassa tem uma relação C/N inferior a 30, que é a recomendada para uma maior eficiência na produção de biogás. Por tal motivo, para obter um valor maior na relação C/N, a biomassa requer um co-substrato para ser digerido. Embora, como foi observado nos testes, e nos resultados obtidos pelo autor [49], é possível gerar biogás, empregando somente biomassa de microalgas sem algum tipo de co-substrato. Porém, o reator projetado no presente trabalho pode aceitar a biomassa acompanhada por outro co-substrato visando otimizar a

relação C/N, sempre que esteja em meio líquido para não entupir os condutos; poder-se-ia empregar esterco de gado, ou outros materiais orgânicos similares.

Considerando 30 a melhor relação C/N para digerir matéria orgânica, no caso da microalga *Chlorella sp.*, para que possa chegar a um valor próximo ao ideal, a biomassa deve ser misturada com um co-substrato com um alto nível de carbono (muito acima do ideal), numa proporção em peso adequada, que pode ser estimada a partir da seguinte equação empregada pelo manual de biogás [92]:

$$RCN = \frac{(C_1 \times Q_1) + (C_2 \times Q_2)}{(N_1 \times Q_1) + (N_2 \times Q_2)} \quad (5)$$

Em que:

RCN = Relação C/N da mistura entre a biomassa de microalgas e o co-substrato

C1 = Porcentagem de carbono orgânico contido nas microalgas (%)

C2 = Porcentagem de carbono orgânico contido no co-substrato (%)

N1 = Porcentagem de nitrogênio orgânico contido nas microalgas (%)

N2 = Porcentagem de nitrogênio orgânico contido no co-substrato (%)

Q1 = Peso úmido das microalgas (após ser centrifugada) (kg)

Q2 = Peso fresco do co-substrato (kg).

A partir da equação (5), assumindo uma quantidade total de biomassa (microalga com co-substrato) de 100 (g), e conhecendo os valores das porcentagens médias, estimaram-se as quantidades das proporções entre a biomassa da microalga *Chlorella sp.* e diferentes co-substratos. Com a finalidade de analisar essas quantidades, tomaram-se como base os dados do manual [92], em que se têm diversos conteúdos de carbono e nitrogênio para diferentes tipos de substratos. Com base nesses valores e nos níveis de C/N da microalga testada, estruturou-se a Tabela 14, que apresenta as quantidades em porcentagem de biomassa de *Chlorella sp.* (Q_1) e de co-substrato (Q_2) de diferentes materiais orgânicos que podem acompanhar o substrato principal, para obter diferentes valores na relação C/N conjunta entre ambos compostos orgânicos.

Tabela 14: Quantidade em porcentagem de biomassa da espécie *Chlorella s.p.* (Q1) para diferentes co-substratos obtendo relações C/N iguais a 15, 20 e 30.

	Microalga	Co-substrato					
	<i>Chlorella sp.</i>	Serragem de madeira	Folhas secas	Restolho de milho	Esterco de peru	Esterco de pato	Esterco de gado equino
C	37,9%	44,0%	41,0%	40,0%	35,0%	38,0%	40,0%
N	6,7%	0,1%	1,0	0,8%	0,7%	0,8%	0,8%
C/N	30	20,6%	6,3%	9,7%	7,9%	7,9%	9,0%
	20	30,9%	18,0%	20,7%	18,0%	18,7%	20,1%
	15	40,9%	29,5%	31,6%	28,3%	29,5%	31,0%

Fonte: Autoria própria com base a dados fornecidos por [92].

Com base nos cálculos realizados, é possível obter uma relação C/N de 30 adicionando à biomassa de microalgas outros substratos secundários, porém como se pode identificar na Tabela 14, a porcentagem do co-substrato em proporção supera a metade da mistura total da biomassa (substrato e co-substrato). Desse modo, para se gerar biogás a partir de microalgas a relação C/N poderia ser melhorada, mas dificilmente igualada a 30 que é o valor ótimo. Nesse caso, como os cálculos anteriores foram feitos em relação aos diferentes co-substratos, uma alternativa adequada poderia ser o uso de serragem de madeira como co-substrato para obter uma relação C/N de 15, alcançando pelo menos um valor quase três vezes superior ao valor de 5,68 estimado nas análises de carbono e nitrogênio da biomassa independente. É possível também que existam outros materiais orgânicos similares à serragem que possam acrescentar adequadamente a proporção C/N da biomassa de microalgas para gerar biogás.

5.2 ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO DO REATOR

Para esta análise, foram considerados os resultados obtidos a partir da produção de metano das microalgas, e tomando como referência alguns projetos realizados em áreas rurais para a produção de biogás, foi estimada uma quantidade de biocombustível requerido em uma escala de produção equivalente para fornecer energia a uma família. Posteriormente, com base no requerimento energético, foi calculada a quantidade de biomassa de microalgas necessária para tal produção, e com base nestes outros dados, finalmente se estimaram as dimensões e instalações requeridas para a montagem do reator proposto em escala real.

5.2.1 Escala de Produção

Na Tabela 15, são apresentados os requerimentos energéticos para famílias que utilizam biogás em áreas rurais, sendo que esses exemplos são casos reais que foram executados no Brasil e em outros países. A partir desses dados foi calculada a quantidade de biometano a ser fornecido proveniente da biomassa da microalga *Chlorella sp.*

Tabela 15: Requerimento de biogás para uma família que mora numa área rural segundo algumas publicações.

Publicação	País	Horas de trabalho (h/dia)	Biogás requerido		Pessoas por família	Referência
			Por hora (L/h)	Por dia (L/dia)		
Manual para la producción de biogás	Argentina	5	300	1.500	-	[28]
Manual para la producción de biogás	Argentina	5	600	3.000	-	[28]
Manual de biogás	Chile	5	300	1.500	5	[92]
Energia, economia, rotas tecnológicas	Brasil	-	-	2.100	5	[75]
Estudo da viabilidade de um biodigestor no município de Dourados	Brasil	5	250	1.250	5	[93]
Construção e funcionamento de biodigestores	Brasil	5	250	1.250	5	[94]
Biodigestores familiares: guía de diseño y manual de instalación	Bolívia	5	140	700	-	[19]
Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino	Cuba	5	350	1.750	5	[79]

Fonte: Autoria própria.

De todos os dados fornecidos nas diversas experiências dos projetos relacionados, os que foram considerados como referência para os cálculos, são os dos autores [93,94], indicando que são necessários 1.250 (L_{biogás}/dia) (valor médio empregado em áreas rurais do Brasil) para uma família composta por cinco pessoas, que empregue 5 horas ao dia para preparar seus alimentos num fogão convencional.

Com a quantidade de biogás requerida, e os poderes caloríficos correspondentes tanto de biogás como de metano, pôde-se estimar o volume de biometano necessário para o abastecimento energético de uma família. Dessa forma, considerando os dados fornecidos por [18,94], os poderes caloríficos em

média para o biogás e o metano respectivamente são 5.100 (Kcal/m³) e 8.600 (Kcal/m³). Com as quantidades e o requerimento de biogás por dia se pode estimar a quantidade de metano requerido semanalmente. Como o reator R1 teve condições de funcionamento com cargas semanais, esse foi o reator considerado nos cálculos.

A seguir é calculada a quantidade de metano demandado:

$$QMD = \frac{1.250(L_{biogás})}{1(dia)} * \frac{7(dias)}{1(semana)} * \frac{5.100(kcal)}{1.000(L_{biogás})} * \frac{1.000(L_{CH_4})}{8.600(kcal)}$$

$$QMD = 5.188,95 \left(\frac{L_{CH_4}}{semana} \right)$$

Onde:

QMD = Quantidade de metano demandado (L CH₄/semana)

Arredondando o resultado, sabe-se que para uma família de cinco pessoas são requeridos aproximadamente 5.190 litros de metano por semana.

5.2.2 Matéria-Prima Necessária para a Produção em Escala Real

Com a demanda energética calculada no item anterior, o passo seguinte foi estimar a quantidade de biomassa da microalga *Chlorella sp.* Necessária. Para isso, foi preciso tomar em consideração o nível de metano gerado nos testes (332,62 mL CH₄/g ST), mas como foi mencionado no item 4.3.6 (Quantidades de carga de material orgânico aos reatores), foi considerada uma porcentagem de segurança, a qual é de 90% do volume total gerado (299,36 mL CH₄/g ST), isso a fim de garantir o fornecimento energético. Por outro lado, foi considerada uma quantidade média dos sólidos totais que foi obtido na colheita da biomassa para carregar o reator R1. Dessa forma a quantidade de biomassa requerida resulta ser:

$$QBMR = QMD \left(\frac{mL_{CH_4}}{semana} \right) * \frac{1}{PMST} \left(\frac{gST}{mL_{CH_4}} \right) * \frac{1}{STBM} \left(\frac{kg_{Biomassa\úmida}}{gST} \right) \quad (6)$$

Onde:

QBMR = Quantidade de biomassa requerida (kg biomassa úmida/semana)

QMD = Quantidade de metano demandado (mL/semana)

PMST = Produção de metano por sólido total (mL CH₄/g ST)

STBM = Quantidade de sólidos totais por quilograma de biomassa úmida (g ST/kg).

Com os valores correspondentes na equação (6), obtém-se:

$$QBMR = 5190000 \left(\frac{mL_{CH_4}}{semana} \right) * \frac{1}{299,36} \left(\frac{gST}{mL_{CH_4}} \right) * \frac{1}{94,3413} \left(\frac{kg_{Biomassa\ úmida}}{gST} \right)$$

$$QBMR = 183,77 \left(\frac{kg_{Biomassa\ úmida}}{semana} \right)$$

É assim que são requeridos 183,8 (kg) de biomassa úmida de microalga *Chlorella sp.* por semana para a produção de metano demandado por família, considerando que esse valor tem aproximadamente um conteúdo de 94,3 (g ST/kg biomassa úmida). Isso representa uma carga de 17,3 (kg) de sólidos totais de biomassa de microalgas que deverá ser carregada a cada 7 dias.

Com os valores calculados, pôde-se fazer uma comparação com as quantidades de biomassa que provêm de esterco de gado bovino, que é empregado em áreas rurais. Para isso, foram avaliados dados de várias publicações, que foram resumidos na Tabela 16, na qual se fez o cálculo para cada caso, identificando a quantidade de biomassa úmida expressa em quantidade de sólidos totais necessários para gerar 8.750 litros de biogás por semana (1.250 litros por dia, equivalente a 5.190 litros de metano por semana).

Comparou-se o requerimento de biomassa tanto úmida como em sólidos totais para produzir uma mesma quantidade de biogás, e ficou evidente que a biomassa da microalga *Chlorella sp.* demandada, de acordo com sua capacidade de produção de metano, requer menos sólidos totais em relação à biomassa tradicional de esterco de gado bovino empregado em áreas rurais para obter biogás.

Tabela 16: Biomassa de esterco de gado bovino requerida para produzir 8.750 litros de biogás por semana segundo algumas publicações.

Publicação	País	Biomassa úmida (kg/semana)	Porcentagem de sólidos totais (%)	Sólidos totais requeridos (kg/semana)	Referência
Biodigestores familiares: guía de diseño y manual de instalación	Bolívia	250	17,0	42,49	[19]
Manual para la producción de biogás	Argentina	216	12,0	25,92	[28]
Manual de biogás	Chile	219	13,4	28,43	[92]
Energia, economia, rotas tecnológicas	Brasil	219	13,4*	28,43	[75]
Construção e funcionamento de biodigestores	Brasil	243	13,4*	32,57	[94]

* Os valores de sólidos totais foram baseados no trabalho do autor [92] pela semelhança na produção de biogás por quilograma de matéria orgânica.

Fonte: Autoria própria.

A partir dos dados fornecidos pelo manual de biogás [92], pode-se comparar o nível de produção de biometano produzido pelas microalgas digeridas nos testes, frente a outros substratos empregados em áreas rurais como ser esterco bovino (177 mL CH₄/g ST), suíno (237 mL CH₄/g ST), ovino (93 mL CH₄/g ST), e equino (125 mL CH₄/g ST), que em relação ao valor obtido pelas microalgas nos testes realizados (299,36 mL CH₄/g ST) resultam ter uma menor produção e, por conseguinte um maior emprego de biomassa para a produção da mesma quantidade de biogás.

Outra matéria-prima importante para fluidizar a biomassa empregada comumente é a água (a qual pode estar ou não limpa), segundo [19], pode-se empregar a parte líquida do efluente no caso de não contar com água suficiente para as cargas semanais. Para a quantidade de água requerida na mistura que vai ingressar ao reator, segundo os manuais para produção de biogás [19,75,79,92,94,95], podem-se considerar uma relação em massa entre a biomassa de microalgas e a água de 1:1 até 1:4. No caso do presente trabalho, para obter uma mistura com um maior conteúdo líquido que não produzisse entupimentos nos condutos de entrada e saída do reator, assim como manutenção flexível da carga de biomassa, foi considerada uma relação de 1:4, em que para cada 183,8 (kg) de biomassa úmida que ingressaram semanalmente, serão necessários 735,1 (kg) de

água a cada sete dias. Dessa forma, a mistura entre a biomassa e a água mantém-se homogênea antes de ingressar ao reator.

5.2.3 Instalações Requeridas

5.2.3.1 Dimensionamento e Estrutura do Reator em Escala Real

Para estimar as dimensões do reator, partiu-se da quantidade de material orgânico alimentado semanalmente, tomando em consideração uma estrutura similar aos reatores de cúpula flutuante, segundo os parâmetros dados pelos manuais de construção de reatores [94,95,96], construídos basicamente de cimento e concreto armado, este material não categórico foi escolhido por ser barato e flexível em relação à estrutura do reator projetado, mas a depender da disponibilidade de materiais de construção também podem-se empregar outros, como por exemplo anéis para poço, sempre que estes tenham as mesmas dimensões requeridas para a construção do reator.

Para calcular o volume útil do reator correspondente à mistura de biomassa de microalgas e água, é empregada a seguinte equação:

$$V_{UR} = V_{CARGA} \cdot TR \quad (7)$$

Em que:

V_{UR} = Volume útil do reator (L)

V_{CARGA} = Volume de carga (L/dia)

TR = Tempo de retenção do material orgânico dentro do reator (dias)

Com os valores correspondentes calculados no item anterior e empregando a equação (7):

$$V_{UR} = (183,77 + 735,08) \left(\frac{L}{semana} \right) * \frac{1}{7} \left(\frac{semana}{dias} \right) * 30(dias)$$

$$V_{UR} = 3.937,93 (L)$$

Assim obtém-se que o volume útil do reator equivale a aproximadamente 3.937,9 litros. Dessa forma, como o reator é composto por duas etapas ou dois reatores, um interno e outro externo, e o volume de cada reator para manter o equilíbrio hidrodinâmico deverá ser igual, de modo que o volume para cada reator seria equivalente à metade do volume útil (V_{UR}), sendo assim os reatores teriam um volume aproximado de 1.969 litros, cada um.

Por outro lado, em vista do modelo do protótipo testado, foi projetado um reator em escala real, com algumas modificações do modelo original, porém com o mesmo princípio de funcionamento. A primeira modificação consiste na forma dos tubos de carga e descarga do material orgânico. No protótipo foi em forma de “L” empregando um joelho, mas no modelo final é considerada uma tubulação inclinada 70° como nos modelos dos reatores apresentados no manual para construção de biodigestores do autor [94].

Outra modificação considerada foi a altura da tubulação de entrada do material orgânico, no protótipo a tubulação encontrava-se a uma altura acima da base do reator interno, mas para melhorar a mistura do material orgânico, na escala real, a tubulação de entrada da biomassa no sistema estará posicionada no nível da base do reator interno.

Como outra alteração, foi a altura da câmara *headspace*, que é maior em proporção à aquela empregada no protótipo, para armazenar adequadamente o biogás. Neste caso, a câmara *headspace* segundo os manuais para construção de reatores [19,94-96], pode variar de 25 até 45% do volume útil do reator. Nesse sentido, de modo a garantir um armazenamento completo do biogás produzido, na escala real foi considerada uma câmara *headspace* de 45% do volume útil dividido em duas partes, a primeira estaria integrada ao topo do reator constituindo um volume de 30%. Para evitar perdas caso o biogás fosse produzido em excesso ou não fosse utilizado, foi instalado um reservatório de biogás feito de polietileno reforçado (lona plástica) correspondente aos 15% restantes para chegar aos 45% do volume de material orgânico total que irá a ingressar ao reator.

Como última modificação feita foi em relação ao suporte que sustenta o reator interno dentro do sistema. No protótipo foi empregado somente um suporte, mas como na escala real o reator será feito de concreto armado, o peso dele requer mais suportes. Dessa forma, foram considerados cinco suportes, quatro deles no perímetro do reator interno, embaixo da sua base em forma circular, mas para não atrapalharem o fluxo da biomassa líquida dentro do reator externo, estes suportes têm espaços por onde a biomassa flui (Figura 18). Além desses suportes, para sustentar a parte central da base do reator interno existe um pilar de forma circular.

Como vários tipos de biodigestores, o modelo projetado tem como material de construção principal o concreto armado o qual pode reduzir os custos de construção (a depender do local e o modo de aquisição), e as câmaras de carga e descarga foram estabelecidas seguindo um modelo similar ao dos modelos do autor [94]. Desse modo, o reator em escala real tem a forma como se vê na Figura 18.

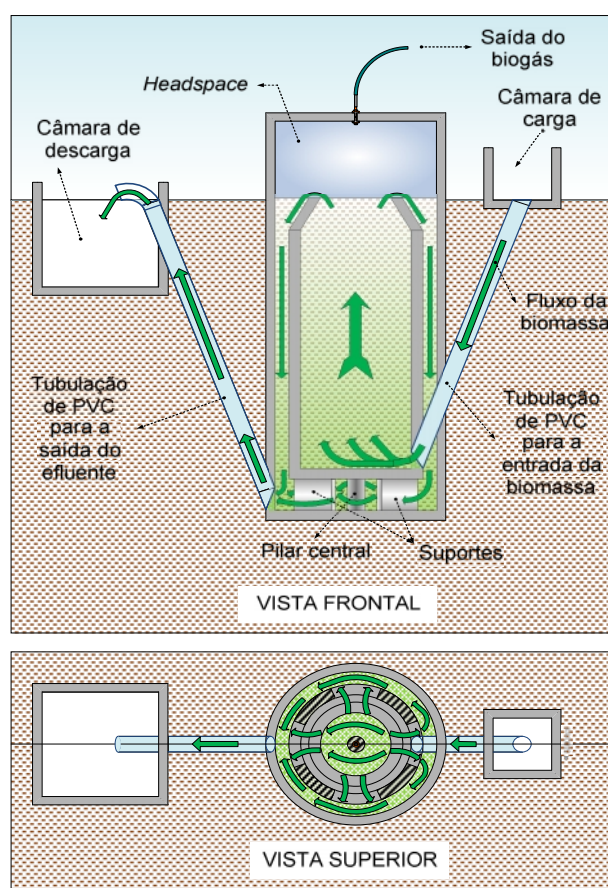


Figura 18: Reator projetado para seu uso em escala real.
Fonte: Autoria própria.

Para obter as dimensões do reator em escala real, foram consideradas as características de dimensionamento dos reatores interno e externo do protótipo original, de modo que para uma carga mensal de 3.937,9 (L) de biomassa e água. O biodigestor deve ter as dimensões descritas na Tabela 17, em função das características dimensionais da Figura 19.

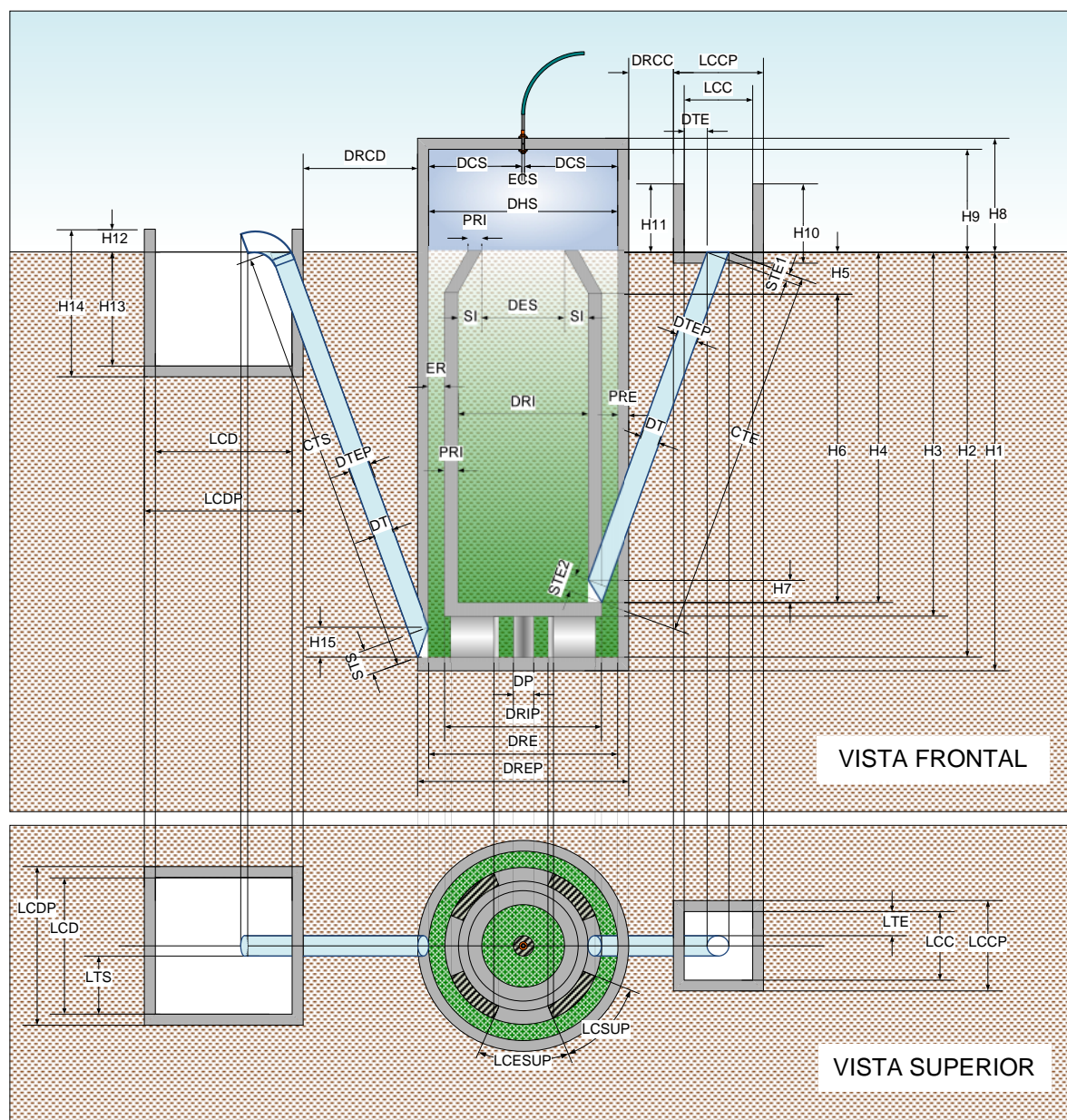


Figura 19: Características de dimensionamento do reator projetado para seu uso em escala real.
Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 19, as dimensões do reator projetado são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17: Dimensões do reator em escala real.

Sigla	Descrição da dimensão	Dimensão (mm)
H1	Altura reator externo com piso	3.379
H2	Altura do cilindro reator externo	3.279
H3	Altura cilindro, cone e piso do reator interno	2.933
H4	Altura cilindro e cone do reator interno	2.833
H5	Altura do cone	307
H6	Altura do cilindro interno	2.526
H7	Altura final da tubulação de entrada	185
H8	Altura da câmara <i>headspace</i> com teto	830
H9	Altura interna da câmara <i>headspace</i>	750
H10	Altura câmara de carga com piso	580
H11	Altura câmara de carga	500
H12	Altura da câmara de descarga por acima do nível do solo	170
H13	Altura parede câmara de descarga	830
H14	Altura parede câmara de descarga com piso	1.080
H15	Altura inicial da tubulação de saída	240
CTE	Comprimento tubo entrada	3.014
CTS	Comprimento do tubo de saída	3.490
DT	Diâmetro tubo entrada e saída	150
DTEP	Diâmetro tubo entrada e saída com paredes	157
DRI	Diâmetro reator interno	945
PRI	Espessura das paredes do reator interno	100
DRIP	Diâmetro do reator interno com paredes	1.145
SI	Seção inclinada	172
DES	Diâmetro espaço superior	600
ER	Espaço entre reatores	118
DRE	Diâmetro reator externo	1.381
PRE	Espessura das paredes do reator externo	80
DREP	Diâmetro do reator externo com paredes	1.541
DP	Diâmetro pilar central	150
LCSUP	Largura curva de fora dos suportes	450
LCESUP	Largura curva de fora entre os suportes	450
DHS	Diâmetro da câmara <i>headspace</i>	1.381
ECS	Espaço conduto de saída	25
DCS	Distância até o conduto de saída	678
LCC	Largura câmara de carga	500
LCCP	Largura câmara de carga com paredes	660
DTE	Distância até o tubo de entrada	166
STE1	Seção inicial do tubo de entrada	57
STE2	Seção final do tubo de entrada	140
DRCC	Distância entre o reator até a câmara de carga	419
LTE	Largura até a tubulação de entrada	171
LCD	Largura câmara de descarga	1.000
LCDP	Largura câmara de descarga com paredes	1.160

Sigla	Descrição da dimensão	Dimensão (mm)
STS	Seção final do tubo de saída	198
LTS	Largura até a tubulação de saída	421
DRCD	Distância entre o reator até a câmara de descarga	946

Fonte: Autoria própria.

Conforme o reator projetado originalmente, pode-se ter o mesmo sistema com variações no dimensionamento do diâmetro do reator interno, pois este fator juntamente com o volume útil de 3.937,9 litros de matéria orgânica processada mensalmente, são os fatores que servem como ponto de partida para estimar novas dimensões de biorreatores com a mesma capacidade de produção de biogás a partir de uma mesma quantidade de material orgânico. Na Tabela 18 são apresentadas as dimensões de biorreatores seguindo a forma de funcionamento do protótipo. De acordo a esses valores, pode-se escolher um reator com dimensões adequadas ao espaço disponível na fazenda.

Tabela 18: Dimensões de biorreatores em escala real em função às variações do diâmetro do reator interno considerando o mesmo volume útil de material orgânico de 3.937,9 litros.

Sigla	Descrição da dimensão	Dimensão	Dimensão	Dimensão	Dimensão	Dimensão
		1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)
DRI	Diâmetro reator interno	1.000	1.100	1.200	1.300	1.400
H1	Altura reator externo com piso	3.055	2.579	2.211	1.921	1.688
H2	Altura do cilindro reator externo	2.955	2.479	2.111	1.821	1.588
H3	Altura cilindro, cone e piso do reator interno	2.652	2.246	1.937	1.697	1.509
H4	Altura cilindro e cone do reator interno	2.552	2.146	1.837	1.597	1.409
H5	Altura do cone	325	358	390	423	455
H6	Altura do cilindro interno	2.227	1.788	1.447	1.175	954
H7	Altura final da tubulação de entrada	185	185	185	185	185
H8	Altura da câmara <i>headspace</i> com teto	800	680	600	530	480
H9	Altura interna da câmara <i>headspace</i>	720	600	520	450	400
H10	Altura câmara de carga com piso	580	580	580	580	580
H11	Altura câmara de carga	500	500	500	500	500
H12	Altura da câmara de descarga por acima do nível do solo	170	170	170	170	170
H13	Altura parede câmara de descarga	830	830	830	830	830
H14	Altura parede câmara de descarga com piso	1.080	1.080	1.080	1.080	1.080
H15	Altura inicial da tubulação de saída	240	240	240	240	240
CTE	Comprimento tubo entrada	2.716	2.283	1.955	1.700	1.499
CTS	Comprimento do tubo de saída	3.144	2.638	2.247	1.938	1.690

Sigla	Descrição da dimensão	Dimensão 1 (mm)	Dimensão 2 (mm)	Dimensão 3 (mm)	Dimensão 4 (mm)	Dimensão 5 (mm)
DT	Diâmetro tubo entrada e saída	150	150	150	150	150
DTEP	Diâmetro tubo entrada e saída com paredes	157	157	157	157	157
PRI	Espessura das paredes do reator interno	100	100	100	100	100
DRIP	Diâmetro do reator interno com paredes	1.200	1.300	1.400	1.500	1.600
SI	Seção inclinada	183	201	219	237	256
DES	Diâmetro espaço superior	635	699	762	826	889
ER	Espaço entre reatores	125	138	150	163	175
DRE	Diâmetro reator externo	1.450	1.575	1.700	1.825	1.950
PRE	Espessura das paredes do reator externo	80	80	80	80	80
DREP	Diâmetro do reator externo com paredes	1.610	1.735	1.860	1.985	2.110
DP	Diâmetro pilar central	150	150	150	150	150
LCSUP	Largura curva de fora dos suportes	471	511	550	589	628
LCESUP	Largura curva de fora entre os suportes	471	511	550	589	628
DHS	Diâmetro da câmara <i>headspace</i>	1.450	1.575	1.700	1.825	1.950
ECS	Espaço conduto de saída	25	25	25	25	25
DCS	Distância até o conduto de saída	713	775	838	900	963
LCC	Largura câmara de carga	500	500	500	500	500
LCCP	Largura câmara de carga com paredes	660	660	660	660	660
STE1	Seção inicial do tubo de entrada	57	57	57	57	57
STE2	Seção final do tubo de entrada	140	140	140	140	140
DRCC	Distância entre o reator até a câmara de carga	477	316	191	92	10
LTE	Largura até a tubulação de entrada	171	171	171	171	171
LCD	Largura câmara de descarga	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
LCDP	Largura câmara de descarga com paredes	1.160	1.160	1.160	1.160	1.160
STS	Seção final do tubo de saída	198	198	198	198	198
LTS	Largura até a tubulação de saída	421	421	421	421	421
DRCD	Distância entre o reator até a câmara de descarga	828	655	521	416	331

Fonte: Autoria própria.

Como constata na Tabela 18, as dimensões máximas para o presente reator consideram um diâmetro de reator interno de 1.400 (mm), devido a que a distância entre o reator e a câmara de carga (DRCC) se reduz a 10 (mm). Nesse caso, a parede da câmara *headspace* pode servir como parede da câmara de carga, porém é possível que as cargas de material líquido ao reator possam gerar alguma fuga do biogás da câmara *headspace*. Desse modo, o reator considerando as dimensões do

protótipo, deve ter um diâmetro inferior a 1.400 (mm). Por outro lado, para não possuir grandes profundidades para localizar o reator, e manter o desenho do protótipo original, é recomendável que ele não tenha um diâmetro no reator interno inferior a 945 (mm) que é a dimensão apresentada na Tabela 17.

Dentre todos os dimensionamentos, o que apresenta uma melhor utilização da área disponível por sua profundidade e espaço requerido, é a Dimensão 3 da Tabela 18, que possui um diâmetro do reator interno de 1.200 (mm). Fazendo uma comparação, entre este reator e outro que emprega esterco de gado [95,96], o desenho do protótipo apresenta menores dimensões gerais comparadas às empregadas em outros projetos. A Figura 20 apresenta as dimensões do reator considerando o diâmetro de 1.200 (mm).

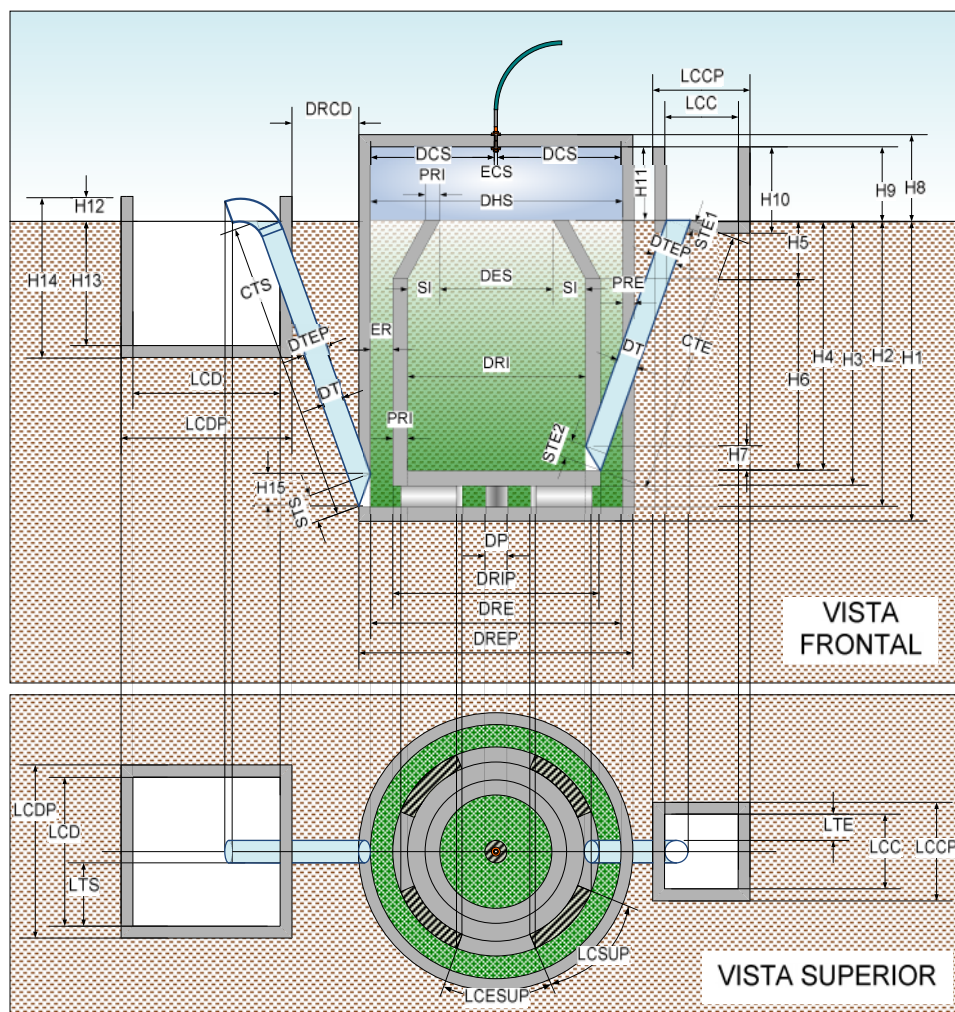


Figura 20: Características de dimensionamento do reator com 1200 (mm) de diâmetro interno (DRI).
Fonte: Autoria própria.

Para a construção desse reator, inicialmente se faz uma escavação do terreno com um diâmetro superior ao do reator externo aproximadamente de 50 (cm) a mais em relação a seu raio. Posteriormente, é construída a base do reator empregando ferro de construção para uma estrutura estável. Após isso deve localizar-se adequadamente a tubulação de saída da biomassa em sua posição definitiva considerando sua inclinação. Para conformar a parede do reator externo se deve estruturar o ferro de construção e a forma de madeira para então ser enchida com a mistura entre cimento brita e areia. Vale se ressaltar que como o reator está conformado com um digestor interno, as paredes dos reatores devem ser construídas paralelamente parte a parte. Na primeira etapa, a parede do reator externo deve chegar até o limite onde ingressara a tubulação para a carga de material orgânico, uma vez nesse ponto, a parede do reator externo é detida até estruturar os suportes do reator interno, que são feitos também com ferro de construção e concreto.

Uma vez construídos os suportes, deve-se estruturar a base do reator interno. Como o perímetro do reator e os suportes coincidem, é recomendável deixar parte do ferro de construção dos suportes acima deles para juntá-los com a estrutura das paredes do reator interno. Contudo, antes de colocar a mistura do concreto, é importante conferir que a tubulação de PVC de entrada esteja perfeitamente localizada. Conforme tudo esteja correto, vão se montando as paredes do reator externo e interno. Primeiro uma parte da parede do reator externo e logo a do reator interno, limpando periodicamente as impurezas que ingressem aos reatores (pedras ou outros materiais estranhos). Uma vez que o reator interno chegue até a parte inclinada de sua parede (quando a altura H_6 esteja concluída), a parede do reator externo pode ser terminada até a altura H_2 conforme as Figuras 19 e 20. Neste ponto, é montada a forma de madeira com a inclinação correspondente do topo do reator interno, e uma vez terminada esta parte, pode-se prosseguir com as paredes da câmara *headspace*, para finalmente estruturar o teto do reator que é feito com a estrutura de ferro de construção e com um furo no meio para o flange que proporcionará a saída do biogás. O teto deve ser construído de forma independente com um diâmetro ligeiramente superior ao do DRE, para assim colocá-lo em cima do reator, e posteriormente vedá-lo com concreto até chegar ao diâmetro do reator

externo (DREP). Uma vez concluída a parede da câmara *headspace* para evitar a saída do biogás é realizado um reforço de cimento externo.

Após da construção do reator, o espaço de 50 (cm) que foi deixado fora do diâmetro do reator na escavação, deve ser cheio com terra para posteriormente proceder com a construção das câmaras de carga e descarga. Uma vez feito isso, deve-se estruturar a base da câmara de carga deixando o furo correspondente de 157 (mm) de diâmetro para a tubulação de entrada do material orgânico, posteriormente com auxílio da forma de madeira se estruturam as paredes da câmara quadrada. Como passo final, para a câmara de descarga deve ser escavada uma fossa, o primeiro passo é construir a base e posteriormente, semelhante às paredes do reator externo, deve-se avançar com precaução na parte que ingressa a tubulação de saída do efluente. Por outro lado, as paredes que não estão em contato com a tubulação podem ser concluídas, mas nessa parede em particular o concreto deve ficar sem aberturas nem espaços entre a parede e a superfície da tubulação; uma vez conferido isso, podem-se concluir as paredes da câmara de descarga.

5.2.3.2 Condutos, Sistema de Filtragem e Reservatório do Biogás

Segundo os autores [19,94-97], pode-se empregar uma mangueira plástica como conduto do biogás a partir da saída do reator até o fogão, ou também ela pode ser unida a uma tubulação de PVC flexível. No caso do presente trabalho, foi considerado o sistema empregado pelos autores [19,96,97], utilizando uma mangueira flexível como conduto principal e incluindo um reservatório para o biogás.

O sistema emprega um flange na saída do reator, logo depois se utiliza uma tubulação de PCV de 20 (mm) de diâmetro, e 20 (cm) de comprimento que se encaixa com uma mangueira presa com auxílio de uma abraçadeira. Posteriormente, segundo recomendações do autor [19], no caso de existir um excesso na produção de biogás que ultrapasse a capacidade da câmara *headspace* e o volume do reservatório, é importante colocar uma válvula de segurança logo depois da saída do reator, que evite a explosão do reservatório ocasionando danos físicos às pessoas que estivessem perto. Um excesso na produção de biogás ou um baixo consumo

pode ocasionar que o biocombustível exerça uma pressão na biomassa provocando a saída do material orgânico do biodigestor desequilibrando todo o sistema.

A válvula de segurança tem a função de expulsar o biogás não empregado para o meio ambiente, com a finalidade de evitar esses inconvenientes. Vale ressaltar que essa não é a melhor solução, mas no caso extremo que acontecesse, o operador deve queimar o biogás na cozinha em sentido contribuir menos ao aquecimento global emitindo biogás diretamente ao meio ambiente, pois o CO_2 gerado na queima tem um forçamento radiativo vinte vezes inferior ao do metano. Por outro lado, a válvula de segurança também serve para regular a pressão máxima a ser alcançada pelo biogás. A sua instalação é feita colocando um Tê no conduto do biogás ao sair do reator, nele é adicionada na parte vertical uma tubulação do mesmo diâmetro e com 400 (mm) de comprimento. Essa tubulação é mergulhada em água contida num recipiente plástico transparente (pode ser uma garrafa PET) que tem uma abertura na parte superior para que o biogás possa sair no caso que exista um excesso de produção, mas para impedir que o biogás consiga sair em condições de normalidade. Segundo [19] essa tubulação deve estar mergulhada entre 8 a 13 (cm) de água. Desse modo, a pressão máxima do sistema é diretamente proporcional à profundidade da tubulação mergulhada, ou seja, quanto maior a profundidade, maior a pressão.

Para ajustar e manter a pressão máxima, o nível de água deve ser constante e de igual profundidade à tubulação mergulhada, pelo que se devem fazer orifícios no recipiente localizados no nível escolhido, para que quando a pressão aumente e a água dentro da tubulação fosse deslocada para fora, não altere o nível externo. Esta válvula é apresentada na Figura 21, e é utilizada em reatores instalados de áreas rurais, considerando uma altura no nível de água em relação ao tubo de 13 (cm).

Com a finalidade de fechar o sistema em caso de que o reator precise algum tipo de manutenção, logo depois da válvula de segurança deve ser colocado um registro de esfera para o gás.



Figura 21: Válvula de segurança.
Fonte: Adaptado de [19,97].

Para retirar-se o sulfeto de hidrogênio do biogás, segundo os autores [19,95-98], é empregada palha de aço (comercializado comumente com o nome de Bombril). Este material é colocado dentro de uma junção simples de esgoto de 40 (mm), empregando os adaptadores correspondentes (40 mm para 20 mm). O material reage com o biogás fixando o H_2S e depositando-o no fundo da junção. Por outro lado, em caso que exista algum acidente com fogo, este filtro ao possuir um diâmetro maior ao do conduto do biogás, além de fixar o sulfeto de hidrogênio, tem a função de impedir a passagem da chama para que não chegue até a câmara *headspace* do reator. Esta palha de aço com o tempo deve ser trocada, a depender se existe odor ruim na hora de utilizar o biogás no fogão [96], mas segundo [19], o tempo médio de troca é de seis meses. A Figura 22 apresenta o filtro de biogás.

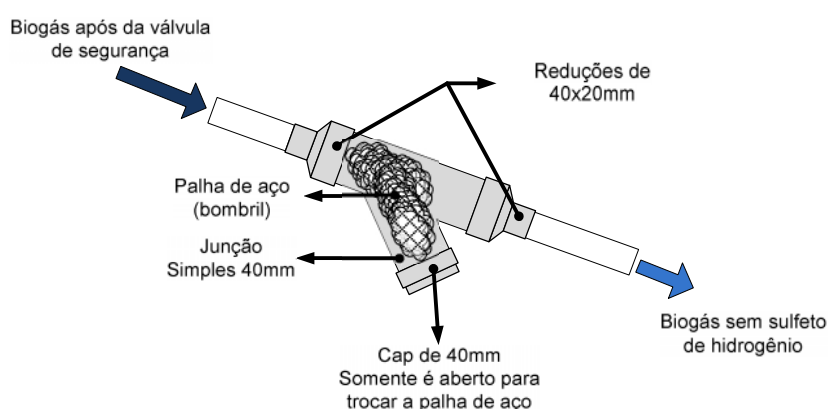


Figura 22: Filtro do biogás.
Fonte: Autoria própria com base em [16,98].

Segundo o autor [19], a melhor distância entre o reator e o fogão, fica entre 20 até 50 metros, a depender das condições do terreno, da área disponível para o

digestor, e a localização da cozinha. Após a colocação do filtro, como se pode observar na Figura 22, ele tem uma inclinação que serve de drenagem, já que o biogás ao sair do reator tem umidade que no percurso do conduto até chegar ao fogão chega a se condensar, sendo um prejuízo porque a acumulação da água pode chegar a entupir o conduto e evitar o passo do biogás. Por tal motivo se deve colocar um ou vários drenos para retirar a água condensada.

O dreno pode ser uma garrafa PET como a usada para a válvula de segurança, só que neste caso o recipiente fica cheio de água num nível suficiente para mergulhar uma parte da tubulação de dreno para evitar a saída do gás. Esta garrafa deve estar ligada ao conduto empregando um Tê e um registro de esfera, para que quando fique cheia com água, o conduto possa ser fechado para esvaziar a garrafa sem emitir biogás ao meio ambiente.

O número de drenos é dado em função da distância entre o reator e a cozinha, e ao modo de condução do biogás. Em alguns manuais [19,73,92] a tubulação ou a mangueira que conduz o biogás está a uma altura do nível do solo, mas em outros projetos [96,99], o conduto do biogás está enterrado para proteger e não danificar a tubulação pelo contato direto com os raios do sol. Para o presente trabalho, tendo em vista que o reator tem a finalidade de ser instalado em áreas rurais, e considerando as altas temperaturas registradas na região Nordeste, é considerado conduzir o biogás por baixo do nível do solo a uma profundidade aproximada de 15 (cm). Foi adotada uma distância entre o reator e a cozinha de 20 metros, caso o reator esteja localizado mais longe é possível o requerimento de mais pontos de drenagem.

Para que o dreno funcione adequadamente, a tubulação deve estar inclinada, facilitando o deslocamento da água até os pontos de dreno. A Figura 23 apresenta os sistemas de dreno para uma curta e longa distância.

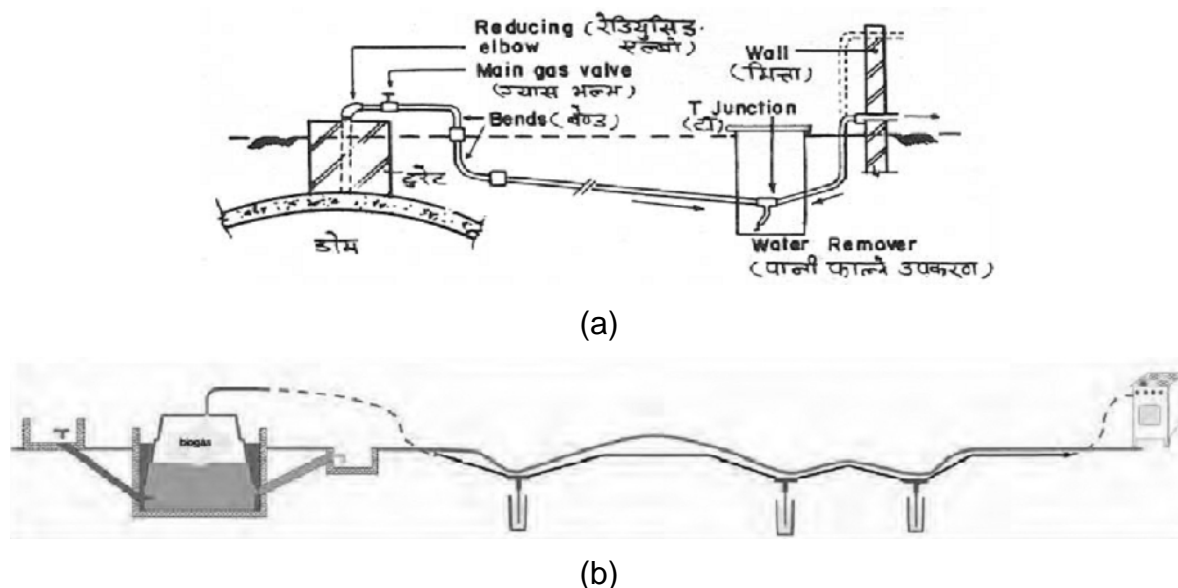


Figura 23: Sistemas de drenagem entre o reator e a cozinha, (a) curta distância, (b) longa distância. Fonte: Adaptado de [96,99].

Posteriormente ao ponto de drenagem, com a finalidade de evitar variações na pressão do reator, que assim como um biodigestor de cúpula fixa, tem uma câmara *headspace* com volume fixo, é considerado colocar um reservatório de biogás. Este depósito de biogás segundo [19,97] deve ficar perto da cozinha (porém não dos fogões), devem ser herméticos, contar com um registro independente para sua manutenção sem influir no sistema, e em caso de serem construídos com um material frágil é preferível que não estejam em contato com o solo, e protegidos contra chuvas e os raios do sol.

O reservatório a ser empregado ao igual do modelo apresentado pelo autor [19], pode ser feito com lona de polietileno. Este sistema de armazenamento é flexível e fornece biogás a uma pressão regulável independente da câmara *headspace* do reator, além de ser simples e não representar um custo alto. Ele é construído em forma de um balão, vedando os extremos da lona e colocando um único ponto de entrada e saída do biogás, empregando um flange devidamente fixado na lona. Ele estará localizado por segurança aproximadamente a cinco metros de distância do fogão, e estará ligado ao conduto principal empregando um Tê e uma mangueira do mesmo diâmetro, e contará com seu próprio registro de esfera para isolá-lo em caso que seja necessário algum tipo de manutenção ou troca do reservatório.

Por suas características, o reservatório deve estar protegido com um teto que evite a entrada dos raios do sol e a chuva, com a finalidade de não danificar a superfície do material plástico.

As dimensões do reservatório de biogás foram definidas pela diferença entre o volume destinado para o armazenamento do biocombustível e o volume empregado na câmara *headspace* do reator. Neste caso, no dimensionamento do reator considerou-se que o volume de armazenamento será igual a 45% do volume útil do reator (V_{UR}), dos quais 15% correspondem ao reservatório. Como o V_{UR} estimado foi de 3.937,9 (L), a correspondente porcentagem indica um resultado aproximado de 590 (L) para o reservatório; conforme este dado e as dimensões de lona plástica disponíveis no mercado (segundo a Loja CASAS RUAS em Salvador BA, as dimensões podem ser 2x2 m, 3x2 m, e 4x3 m), deve-se empregar uma lona de três metros de comprimento por dois de largura, onde para obter o tamanho requerido deve-se fazer um vinco na largura para ter uma lona de 3x1 (m), mas sem cortar o plástico.

Para a entrada e saída do biogás é utilizado um flange plástico de 20 (mm) que é ligado ao conduto principal do biogás. Finalmente, para vedar a parte das extremidades, elas são dobradas em forma de acordeão, e com auxílio de uma seladora para embalagens plásticas, elas são fixadas a 47 (cm) em cada extremo. Estas extremidades após serem vedadas, servem para sustentar o reservatório na estrutura externa que suportará o teto, e são seguradas com ajuda de uma corda para varal. Na Figura 24 é apresentado o reservatório de biogás que será empregado considerando o modelo do autor [19].

Após da conexão do reservatório, a mangueira que leva o biogás é segurada com uma abraçadeira no conduto de gás do fogão, mas por segurança, segundo os manuais de biogás [19,96], deve existir um último registro de esfera antes da ligação com o conduto das bocas do fogão. A Figura 25 resume todo o percurso do biogás desde o reator até o fogão, considerando uma distância entre ambos de 20 metros e apresentando a localização das válvulas, filtros, e o reservatório de biogás, em que todas as ligações entre a mangueira com as tubulações, registros, e válvulas, foram fixadas com adesivo plástico para PVC.

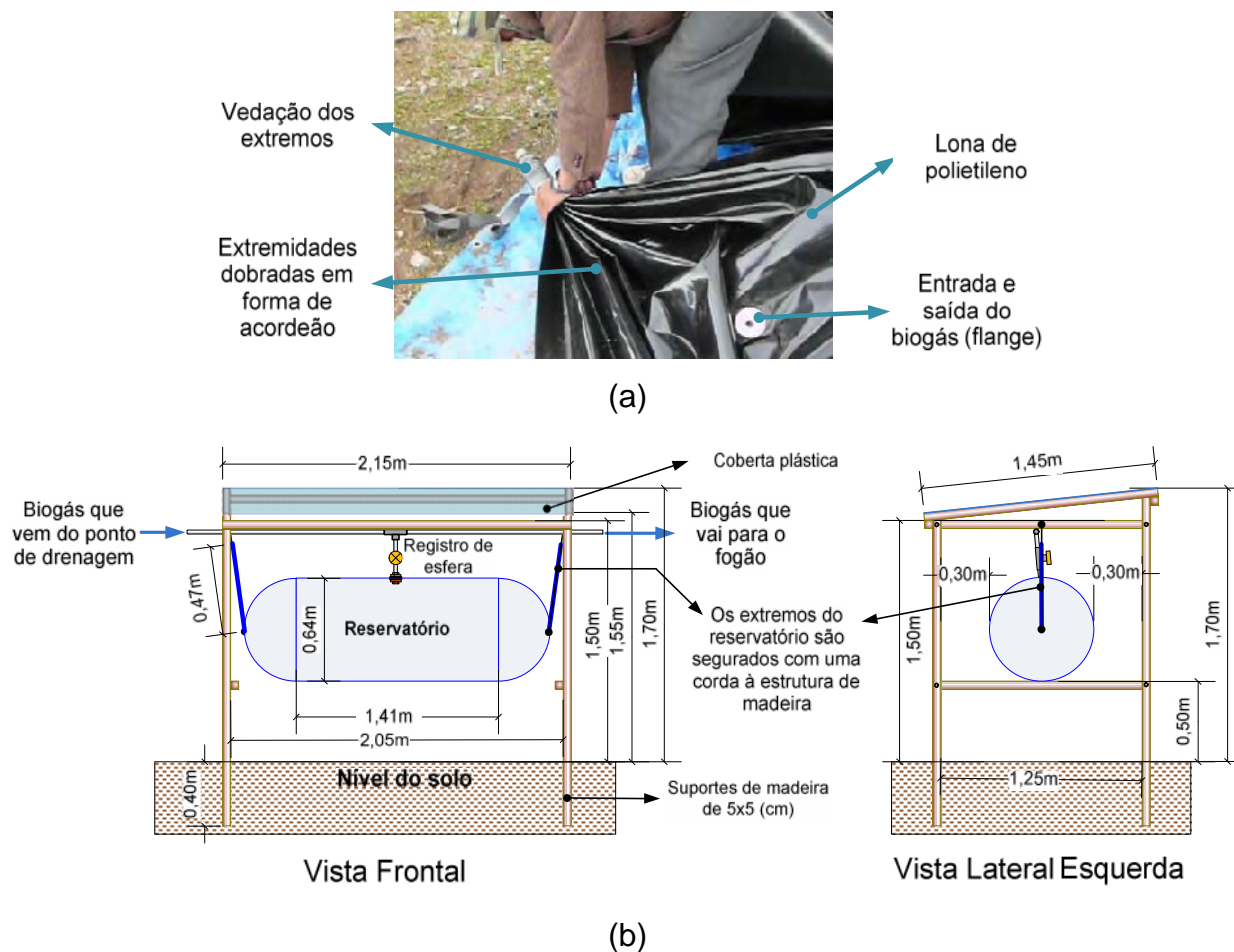


Figura 24: Reservatório do biogás, (a) construção, (b) estrutura para proteção contra chuva.
Fonte: Autoria própria com base em [19,97].

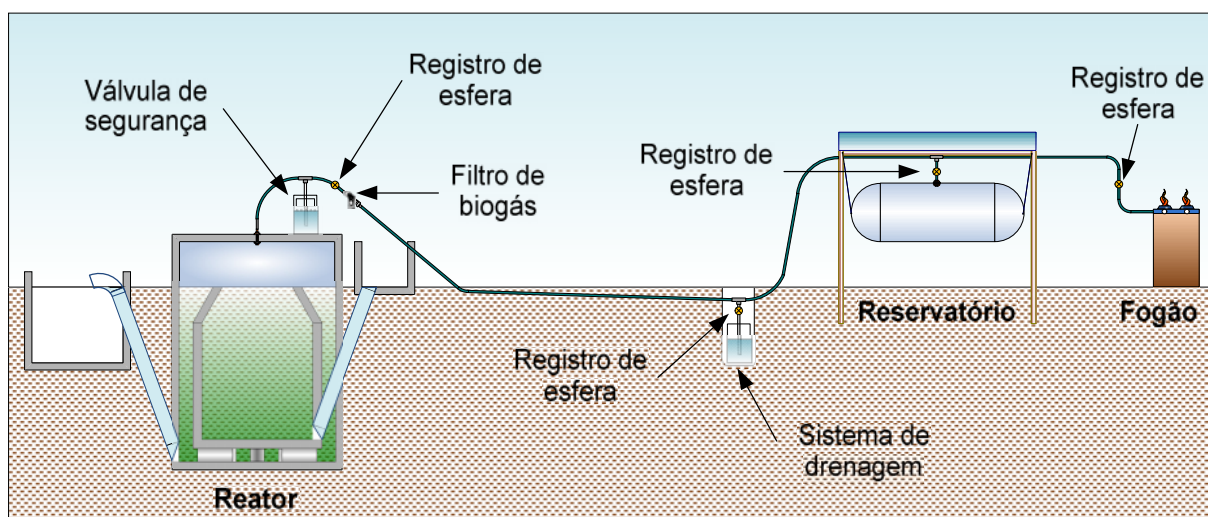


Figura 25: Condução do biogás desde o reator até seu destino final.
Fonte: Autoria própria.

5.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

No presente capítulo, serão considerados todos os custos envolvidos na construção, operação e possível manutenção do reator proposto. O investimento deste reator vai ser comparado com os custos de construção de outros biodigestores empregados comumente em áreas rurais para verificar que tem um custo razoável a outros modelos utilizados.

5.3.1 Investimento dos Materiais e Mão de Obra na Construção do Reator

A Tabela 20 apresenta a listagem de materiais de construção, os acessórios plásticos, assim como os custos de mão de obra na construção da estrutura do reator. Todos os valores foram estimados em Reais (R\$) na data 05/02/2015, em que a taxa de câmbio era de R\$ 2,74 equivalente a um dólar dos EUA, segundo informação do Banco Central do Brasil [100]. Os valores para a construção foram considerados seguindo os parâmetros para concreto armado reforçado para as paredes dos reatores interno e externo, e concreto simples para as câmaras de carga e descarga empregando as quantidades estimadas pelo autor [101] e as relações de mistura entre o cimento, areia, e pedra brita empregadas no Brasil segundo [102], e os valores resultantes são apresentados na Tabela 19.

5.3.2 Custos em Operação e Manutenção

Pela simplicidade do funcionamento do reator, os custos de operação do sistema somente se aplicam na troca da palha de aço a cada seis meses. Porém podem existir despesas na manutenção do conduto do biogás, requerendo o uso de adesivo de PVC nas uniões. Por outro lado, a cobertura da estrutura que protege o reservatório, como vai estar exposta ao sol pode ser que tenha uma deterioração com o tempo aproximado de 2 até 5 anos [19,97], desse modo ela deve ser trocada quando for necessário.

5.3.3 Comparação de Investimento Frente a Outros Reatores

O biodigestor proposto por sua construção tem uma vida útil aproximada de 20 a 30 anos, e como é descrito na Tabela 20, tem um investimento total de R\$ 2.336,14 ou 852,61 (USD) com taxa de cambio em data 05 de fevereiro de 2015. Com esses dados pôde-se comparar este sistema com o investimento de outros biodigestores empregados em áreas rurais e alguns outros modelos pré-fabricados no mercado. Os investimentos correspondentes para cada reator são apresentados na Tabela 21, na qual se pode evidenciar que em comparação ao valor em cada data de referência, o custo do investimento para o reator proposto no presente trabalho, é menor em relação aos apresentados por outros autores. Estes consideraram como biomassa esterco de animais, assim como outros reatores com custos mais elevados como é o caso dos apresentados pelos autores [107,108,111], nos quais os volumes de geração de biogás representa valores para mais de uma família, ou para transformar o biogás em energia elétrica e empregá-la como forma de negócio na venda de energia na rede pública. Nesse caso, é requerida uma grande quantidade de biomassa, além de maiores instalações para localizar o biorreator.

Nesse sentido, o foco do presente trabalho empregando a biomassa de microalgas, não considera uma produção excedente, pelo que o custo justifica uma produção de biogás exclusiva para seu uso por uma família com dimensões menores em relação a outros modelos similares (cúpula flutuante).

Comparou-se o custo dos reatores em dólares para quantificar um custo na data de referência que foram construídas, mas ainda assim comparando o custo do protótipo em relação com os modelos mais recentes [96,109,110,112]. O custo do reator projetado, pela simplicidade que possui é relativamente menor, mas isso não implica que ele tenha uma economia de recursos, devido a que os materiais empregados foram os mesmos utilizados na construção de reatores de cúpula fixa e flutuante [94,96], e para o reservatório foi empregado o modelo do autor [19], mas foi obtido um reator competitivo em funcionamento e custo.

Tabela 19: Estimação da quantidade de materiais de construção requeridos para os reatores, a câmara *headspace*, e as câmaras de carga e descarga.

Concreto Armado	Unidade	Padrão	Reator externo e <i>headspace</i>	Reator interno	Câmaras de carga e descarga	Total reatores, <i>headspace</i> e câmaras	Equivalente para a compra comercial	
							Quantidade	Unidade
Volume	m ³	1,00	1,67	0,92	0,58	3,16	-	-
Cimento	kg	300,00	499,84	274,78	174,27	948,89	19,00	Sacos de 50 kg
Ferro de construção Gerdau 3/8", 10 mm	kg	55,00	91,64	50,38	0,00*	142,01	142,00	kg
Pedra brita 01	m ³	0,63	1,05	0,58	0,37	1,99	2,00	m ³
Areia lavada média	m ³	0,42	0,70	0,38	0,24	1,33	1,40	m ³
Arame galvanizado N° 12	kg	0,80	1,33	0,73	0,46	2,53	2,50	kg
Prego com cabeça 18x27	kg	0,80	1,33	0,73	0,46	2,53	3,00***	kg
Tabua de madeira bruta	pé ²	30,00	49,98	0,00**	0,00**	49,98	0,111	m ³

* O ferro de construção não será empregado nas câmaras de carga por serem estruturas de concreto armado simples que não precisam suportar quantidades de peso consideráveis

** Como se tem adquirida uma quantidade de madeira para a estrutura maior como é o reator externo junto à câmara *headspace*, a madeira dessa estrutura servirá também para uso no reator interno e as câmaras de carga e descarga, diminuído o custo deste material para essas estruturas.

*** O valor do prego foi arredondado para esse valor, devido a que o excedente servirá para montar a estrutura de madeira que protegerá o reservatório.

Fonte: Autoria própria com base a dados fornecidos por [101,102].

Tabela 20: Custos de investimento em materiais e mão de obra para a construção do reator em (R\$).

Item	Finalidade	Unidade	Quantidade requerida	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)	Referências dos preços
Mangueira plástica de 25 mm	Conduto principal do biogás	m	22,00	3,66	80,52	Comercial Ramos® Salvador-BA
Registro de esfera soldável	Isolar áreas do sistema	u	4,00	6,86	27,44	[103]
Tê liso soldável de 20 mm	Válvula de segurança, dreno, e reservatório	u	3,00	0,78	2,34	[103]
Junção de 40 mm	Filtro do biogás	u	1,00	2,42	2,42	[103]
Palha De Aço Bombril de 25g	Filtro do biogás	u	1,00	0,95	0,95	Lojas Americanas® Salvador-BA
Bucha de Redução Longa 40 x 20 mm	Entrada e saída do filtro de biogás	u	2,00	2,57	5,14	[103]
Cap esgoto de 40 mm	Filtro do biogás	u	1,00	1,31	1,31	[103]
Tubulação de PVC soldável de 20 mm	Saída de biogás do reator, entrada à válvula de segurança e ao dreno	m	1,00	2,47	2,47	[103]

Item	Finalidade	Unidade	Quantidade requerida	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)	Referências dos preços
Adaptador com flange de 20 mm	Saída do biogás do reator e reservatório	u	2,00	8,93	17,86	[103]
Corda para varal	Segurar o reservatório	m	4,00	0,57	2,29	Lojas Americanas® Salvador-BA
Tabua de madeira de pinus serrada de 1ª qualidade	Estrutura protetora do reservatório	m ³	0,05	916,68	47,21	[103]
Lona plástica de 150 micras	Cobertura da estrutura de madeira, e superfície do reservatório de biogás	m ²	10,00	1,19	11,90	[103]
Seladora de embalagem plástica	Vedação dos extremos do reservatório	u	1,00	96,00	96,00	[104]
Adesivo plástico para PVC	Fixação do material plástico	u	1,00	10,68	10,68	[103]
Abraçadeiras rosca sem fim 18 a 32 mm	Ligação da mangueira no início e final do conduto	u	2,00	1,95	3,90	[105]
Cimento (50 kg)	Estrutura do reator e as câmaras de carga e descarga	u	19,00	26,80	509,20	[103]
Ferro de Construção Gerdau 3/8", 10 mm	Estrutura do reator e câmaras	kg	142,00	3,68	522,56	[103]
Pedra brita 01	Estrutura do reator e câmaras	m ³	2,00	50,73	101,46	[103]
Areia lavada média	Estrutura do reator e câmaras	m ³	1,40	56,42	78,99	[103]
Arame galvanizado N° 12	Estrutura do reator e câmaras	kg	2,50	8,50	21,25	[103]
Prego com cabeça 18x27	Estruturas de suporte do reservatório, e da madeira para forma do concreto	kg	3,00	7,70	23,10	[103]
Tabua de madeira de pinus serrada de 1ª qualidade	Forma para o concreto	m ³	0,11	916,68	101,75	[103]
Tubo esgoto de 150 mm	Entrada e saída da biomassa	m	4,20	33,89	142,34	[103]
Joelho 90° de 150 mm	Saída do efluente	u	1,00	55,06	55,06	[103]
Mão de obra especializada	Construção das estruturas	Dias/homem	4,00	54,00	216,00	[106]
Mão de obra não especializada	Construção das estruturas	Dias/homem	7,00	36,00	252,00	[106]
Total (R\$)					2.336,14	

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21: Custos de investimento para diferentes biodigestores empregados em áreas rurais.

Tipo de biodigestor	Quantidade de biogás produzido (m³/mês)	Volume médio do reator (m³)	Investimento (R\$)	Data de referência	Taxa de câmbio ano de referência (R\$/USD)	Investimento no ano de referência (USD)	Relação Investimento (USD)/ Biogás gerado (m³/mês)	Referência
Cúpula flutuante	702,00	22,00*	8.000,00	2005	2,51	3.187,25	4,54	[107]
Cúpula flutuante	1.290,00	24,73	8.175,00	Jan., 2007	2,13	3.838,03	2,98	[108]
Cúpula flutuante	29,00	8,47	2.700,00	Out., 2014	2,44	1.106,56	38,16	[96,109,110]
Tubular	2.000,00	>200,00*	12.000,00	2010	1,71	7.017,54	3,51	[111]
Tubular	13,33	9,89*	2.598,00	Fev., 2015	2,74	948,18	71,13	[112]
Pré-fabricado								
Protótipo proposto	37,50	7,03	2.336,14	Fev., 2015	2,74	852,61	22,74	Autoria própria

* Valores estimados com base aos dados fornecidos nas referências e seus respectivos gráficos de dimensões.

Fonte: Autoria própria.

5.4 OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO, SEGURANÇA E PLANOS DE CONTINGÊNCIA

No presente item são detalhadas todas as etapas que devem ser acompanhadas na hora de operar o reator, seguindo a linha de produção de biogás e os pontos de monitoramento para a segurança do processo e dos operários, assim como as possíveis operações a seguir no caso de apresentar-se algum inconveniente considerando um plano de contingências para cada situação.

5.4.1 Modo de Preparação, Carga e Descarga do Material Orgânico

Como o substrato empregado é a biomassa da microalga *Chlorella sp.*, devem-se considerar alguns passos prévios. Na primeira carga do reator, ele deve ser preenchido por completo numa proporção de 20% de substrato e 80% de água (não necessariamente potável, pode ser água de chuva, ou residual, mas tampouco com componentes que prejudiquem o processo, como sabão, cloro, ou outros similares). Segundo o autor [23], para a partida do processo não é preciso considerar o emprego de algum tipo de inóculo, mas o início da degradação será mais demorado. Em todo caso pode-se utilizar lodo de esgoto ou algum outro material orgânico majoritariamente líquido que acompanhe a mistura entre o substrato e a água, acelerando o processo de degradação, e a proporção do inóculo pode-se manter em 80% do volume útil do reator (porcentagem que foi empregada pelo autor [49], e o mesmo aplicado nos testes do presente trabalho). O inóculo somente será carregado uma vez para a partida do sistema.

A forma de carregar a biomassa é seguinte: na primeira carga de material orgânico, o registro de biogás deve estar aberto no conduto final, mas o do reservatório fechado, para que quando a biomassa preencha o reator, o ar interno deslocado não encha o reservatório, fluindo até sair no final do conduto de biogás. Para a preparação da biomassa diluída, com auxílio de um recipiente grande, devem ser misturadas as proporções de biomassa e a água (ou inóculo), e esta mistura deve ficar homogênea, para posteriormente ingressar no reator usando um balde, desde o recipiente de mistura até a câmara de carga.

Após carregar todo o material orgânico, o registro final deve ser fechado para garantir o processo anaeróbio. Uma vez que o biogás esteja sendo produzido, deve-se prestar atenção na válvula de segurança, pois o biogás exercerá pressão deslocando um pouco da água do recipiente. Esse processo pode demorar uns 10 dias aproximadamente, e o reservatório não deve ser empregado ainda. Após esse período, o conteúdo do biogás deve ser esvaziado porque provavelmente estará misturado com o oxigênio do ar que ficou no início do processo de carga, podendo produzir uma explosão por possuir um gás combustível misturado com oxigênio [113]. Desse modo, o biogás deve ser rejeitado, e só após do 15^o dia, como o sistema deverá estar livre de ar, o biogás deve ser testado no fogão; no caso de produzir uma chama de cor azul constante [92] o biogás estaria pronto para ser armazenado no reservatório, mas no caso que exista uma chama intermitente, pode indicar a saída do ar preso no conduto, e nesse caso devem-se fazer testes periódicos até que o biogás gerado forneça uma chama constante. Vale ressaltar que como todo o reator é cheio completamente na primeira carga, e o biogás gerado no tempo de retenção deve equivaler a uma quantidade aproximada para um mês de uso, enchendo completamente a câmara *headspace* e o reservatório.

Posteriormente à carga inicial e após o tempo de retenção, com o reservatório preenchido, o biogás pode ser consumido, mas para dar continuidade à produção de biogás, devem ser carregadas quantidades semanais de biomassa ao reator. Para isso, no recipiente de mistura devem ser adicionadas as quantidades correspondentes para uma semana (165 kg de biomassa úmida e 661 L de água), e essa biomassa do mesmo modo que para a carga inicial, deve ser misturada até ficar homogênea e logo em seguida ingressar ao reator, repetindo esse processo a cada 7 dias.

Assim que a biomassa ingresse ao reator semanalmente, uma quantidade proporcional líquida sairá na câmara de descarga, a qual deve ser armazenada para seu uso como fertilizante biológico. Esse bio-fertilizante segundo os autores [19,75] deve ser misturado com água numa proporção entre 1:4 até 1:10 partes de fertilizante por água. Por outro lado, segundo o autor [92] a melhor forma de empregar o efluente é durante a época de crescimento da vegetação, e esse material pode ser separado em fases líquidas e sólidas para seu posterior

armazenamento, mas como possui um alto conteúdo de nutrientes, ele não deve ser jogado diretamente nos rios [98].

5.4.2 Monitoramento da Válvula de Segurança

A válvula deve ser monitorada diariamente para manter a pressão do sistema constante e identificar um excesso na produção de biogás. No caso de existir uma baixa no nível de água do recipiente, ele deve ser repostado até chegar aos 13 (cm) em que a tubulação deve ficar mergulhada. É indispensável empregar uma garrafa plástica transparente para poder-se enxergar o nível da coluna de água, e se está ou não borbulhando o biogás. Em caso de existir um excedente na produção de biogás, ele deve ser queimado no fogão ainda que não se tenha nenhum uso nesse momento e evitar que o gás entre em contato com o meio ambiente, pelo que é muito importante realizar os monitoramentos dessa válvula contínua e periodicamente.

5.4.3 Troca da Palha de Aço

Como recomenda o autor [96], a palha de aço deve ser trocada assim que na queima do biogás na cozinha se percebe um odor ruim, mas se esse não for o caso convém realizar as trocas do material a cada seis meses como recomenda o autor [19]. O modo de troca desse material é da seguinte maneira, a junção de 40 (mm) tem dois extremos unidos ao conduto principal empregando reduções, mas na terceira saída existe uma tampa que não está fixada com cola de PVC, pelo que pode ser removida, possibilitando a entrada da palha de aço; deve-se carregar uma quantidade suficiente para encher todo o diâmetro da junção, e para a troca do material, deve ser retirada toda a palha de aço do interior da junção para colocar uma nova.

Como foi dito, esse filtro do biogás tem duas funções, uma é a de purificar o biogás retendo o sulfeto de hidrogênio e parte da água condensada que acompanha o biogás ao sair do reator, e a outra é como medida de segurança, no caso extremo de existir a entrada de fogo pela tubulação do biogás, ele evita que a chama chegue até a câmara *headspace* do reator e provoque um acidente de explosão porque a

palha de aço e o diâmetro maior da junção em relação ao conduto geram um freio à expansão do fogo, evitando danos físicos às pessoas que fiquem perto do reator.

5.4.4 Monitoramento do Sistema de Dreno

Deve-se controlar continuamente o nível de água na garrafa do dreno, por isso ela ao igual a que foi usada para a válvula de segurança deve ser também transparente, pois uma vez que esteja quase cheia o registro correspondente deve ser fechado para evitar a perda de biogás, e o recipiente do dreno deve ser retirado para esvaziar uma quantidade de água (pode ser no mesmo reator), mas deixando uma quantidade de líquido dentro da garrafa suficiente para que a tubulação do dreno esteja mergulhada nela, uma vez feito isso o registro pode ser ligado novamente.

Como o dreno se encontra localizado na parte mais baixa do conduto, a água condensada sempre descerá até lá se depositando na garrafa, por isso é importante monitorar continuamente. Assim que fique cheia pode alterar a pressão que foi regulada na válvula de segurança. Por tal motivo, no caso de existir borbulhamento do biogás na válvula de segurança, é recomendável revisar também o dreno para não existir outro ponto de saída do biogás.

5.4.5 Operação do Reservatório

O reservatório por condições de segurança fica a cinco metros do fogão, e como dito anteriormente, ele deve ser habilitado somente quando se tenha certeza que o biogás está sendo gerado com normalidade para ter a confiabilidade de armazenar o produto correto, e tomar a precaução de não existir algum conteúdo de ar dentro do mesmo, que poderia gerar uma explosão se existisse alguma fonte de combustão. Por outro lado, em caso de ter disponibilidade de um espaço dentro de um quarto ou armazém, o reservatório pode estar localizado ali, mas com os devidos cuidados e precauções de não estar perto de alguma fonte que gere fogo ou materiais que o danifiquem [19].

O reservatório é construído com uma capa dupla de lona para evitar danos na superfície (através do vinco na largura) e, além disso, tem uma estrutura que o protege contra os raios do sol, mas periodicamente deve-se verificar que ele não tenha fugas do biogás, e também é importante monitorar a cobertura da estrutura que com o tempo pode precisar ser trocada. Em caso de precisar-se mais pressão do biogás na queima, podem-se colocar contrapesos acima do reservatório [114]. Para isso, empregam-se tiras de algum tecido, mas que não danifiquem a superfície da lona, sobre as quais são colocadas pedras com a finalidade de impulsionar o biogás de dentro do reservatório com mais pressão, vale ressaltar que o peso deve ser o suficiente, porém não excessivo, pois pode forçar o gás a fugir pela válvula de segurança, ou pelo dreno.

5.4.6 Uso do Biogás

O reator como foi projetado tem a capacidade de fornecer energia calorífica a um fogão convencional de duas bocas para preparar alimentos para cinco pessoas, por um tempo de funcionamento de 5 horas ao dia. Caso existam outros requerimentos, existiria uma maior quantidade demandada de biomassa, e um reator com um dimensionamento maior ao empregado neste trabalho, porém a forma do protótipo do reator não mudaria, mas sim sua capacidade.

Vale ressaltar que o equipamento que emprega biogás deve ser adaptado para esse tipo de biocombustível. No caso de empregar-se um fogão comercial, é importante aumentar o diâmetro do injetor de gás para que fique entre 1,5 a 2 (mm), mas no caso de empregar-se um fogareiro a gás, os furos devem ser abertos até ter um diâmetro de 5 (mm) para permitir uma chama com mais estabilidade. Para as duas situações, a entrada de ar deve ser gradualmente fechada até que a chama esteja estável e com uma cor azul [19,92,114].

5.4.7 Precaução no Equilíbrio Hidrodinâmico nas Câmaras de Carga e Descarga

Para evitar a entrada de materiais indesejáveis no reator, como pedras ou outros elementos que possam entrar pela câmara de carga ou descarga durante os

dias que o reator esteja em funcionamento, devem-se colocar coberturas acima de cada câmara. Isso também as protege em caso de chuvas, por que se chega a ingressar água alheia no sistema pode provocar a saída de material orgânico pela câmara de descarga, desequilibrando o funcionamento normal do reator.

5.4.8 Risco de Fogo no Conduto que Conduz o Biogás

No caso de existir um risco deste tipo, como o reservatório está localizado a cinco metros de distância do fogão, se o fogo chega até o depósito de biogás os operários podem estar protegidos pelas paredes da cozinha, e não correm o risco de uma explosão maior devido ao filtro do biogás que freia a passagem do fogo, impedindo que ele chegue até o reator. Nesse caso, as pessoas que estejam perto devem-se proteger até que o fogo chegue ao filtro. Posteriormente, em caso de perda ou danificação do reservatório, devem-se fechar os registros e verificar a causa do acidente, para evitar riscos futuros, posteriormente devem-se avaliar as peças a serem repostas.

É importante que na proximidade ao reservatório ninguém mexa com algum tipo de elemento que gere fogo, como fósforos, cigarros, ou outros similares, para evitar riscos de explosão. Por outra parte, também vale ressaltar que ninguém acenda fogo nas cercanias da válvula de segurança em nenhum momento. Pode ser que exista uma saída de biogás na válvula não monitorada a tempo, e parte do biocombustível esteja no ambiente e provoque uma explosão ocasionando danos físicos às pessoas que estejam perto. Como foi dito anteriormente, o biogás excedente deve ser queimado até que a válvula de segurança demonstre estar estável e sem a saída do biocombustível.

Finalmente por segurança deve-se monitorar continuamente a existência de fugas de biogás no sistema, tanto na câmara *headspace* como nas uniões dos condutos e nos acessórios, e caso sejam detectados vazamentos, todos os registros devem ser fechados até vedar as fontes de fuga de biogás. Uma vez concertadas as imperfeições, os registros devem ser abertos e o biogás pode ser novamente utilizado com normalidade.

6 CONCLUSÕES

Conforme com o objetivo principal e os resultados obtidos no presente trabalho, os quais têm a ver com projetar, construir e testar um reator para geração de biogás utilizando biomassa de microalgas para seu uso e benefício nas comunidades rurais, pode-se concluir que:

1. O protótipo do reator conseguiu gerar biogás em proporção similar aos testes por outros autores validando seu funcionamento para um projeto em escala real.
2. Com base aos resultados do protótipo, foi possível dimensionar um reator que gere biogás para uma família composta por cinco pessoas que utilizem o biocombustível por 5 horas ao dia, considerando todas as variáveis e componentes relacionados para seu correto funcionamento.
3. Considerando a baixa relação de carbono e nitrogênio da biomassa de microalga de espécie *Chlorella sp.* empregada nos testes, foi elaborada uma avaliação teórica dos possíveis co-substratos, resultando, o uso de serragem de madeira para incrementar a relação C/N até 15, que é significativamente superior ao que tem a biomassa independentemente (5,68).
4. Com base na quantidade de biometano gerado, estimou-se a quantidade de biogás gerado pelos reatores em escala real, e para verificar os resultados foi necessário avaliar os níveis da DQO que foi convertida para biometano, e comparados com as quantidades obtidas, deu como resultado valores próximos entre os calculados teoricamente e os medidos, com uma variação de 10%, para o caso do reator R1 que foi o considerado como modelo para o desenho do biodigestor final em escala real.
5. Conforme aos resultados obtidos, foi evidenciado que a produção de biogás é mais eficiente considerando cargas de biomassa em períodos semanais, o qual indica que a biomassa ao ingressar periodicamente ao reator efetivamente movimenta o material orgânico no seu interior, favorecendo à

produção de biogás pelo contato do substrato com o meio líquido, e removendo as bolhas de biogás retidas entre a biomassa.

6. A quantidade da biomassa úmida de microalgas requerida para a geração de biogás é de aproximadamente 184 kg por semana, esse valor pode representar uma instalação para o cultivo de microalgas de consideráveis dimensões, mas este projeto visa num futuro no qual o cultivo de microalgas em áreas isoladas se converta numa realidade, como foi projetado nos resultados obtidos na pesquisa de cultivo de microalgas no Semi Árido Brasileiro.
7. O protótipo do reator projetado para seu uso com biomassa da microalga *Chlorella sp.*, por sua forma de funcionamento pode ser aplicado para outros tipos de materiais orgânicos (como no caso do lodo anaeróbio empregado no reator R3), sempre que eles tenham altos conteúdos de umidade, ingressando a mistura da biomassa ao reator numa fase majormente líquida. Em caso de empregar outro tipo de substrato, a depender da quantidade de biogás produzido, as dimensões podem mudar, no caso de produzir mais biogás por sólidos totais, o reator pode diminuir seu tamanho, ou incrementar-se para o caso oposto.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar testes na produção de biogás com outras espécies de microalgas, ou misturas entre espécies co-digeridas, com a finalidade de determinar novas dimensões, ou protótipos de reatores.
2. Empregar biomassa de microalgas que tenha sido submetida a processos prévios de produção de outros biocombustíveis, com o objetivo de avaliar os níveis de produção de biogás por espécie e processos prévios nos que foi submetida à biomassa visando no fornecimento energético para seu uso em áreas rurais.
3. Fazer testes com materiais orgânicos disponíveis em fazendas das áreas rurais para a co-digestão da biomassa de microalgas, e avaliar o incremento na produção de biogás em função ao aumento da relação C/N da biomassa conjunta.
4. Avaliar técnicas de pré-tratamento da biomassa de microalgas na geração de biogás que não empreguem energia externa superior à produzida.
5. Avaliar a quantidade de carga máxima de sólidos que pode suportar o protótipo do reator apresentado no presente trabalho, construindo o mesmo a uma escala de 1m³ de capacidade, com a finalidade de identificar a melhor relação entre a biomassa, e o material líquido que irá a ser alimentado ao reator.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WWI THE WORLDWATCH INSTITUTE; INSTITUTO ETHOS. *Estado do mundo 2012 rumo à prosperidade sustentável rio+20*, Editora Universidade Livre da Mata Atlântica, Brasil, p. 289, 2012.
- [2] WILLIAMSON, N. *Maternidad en la niñez enfrentar el reto del embarazo en adolescentes estado de la población mundial 2013*. Estados Unidos, 2013.
- [3] BP GLOBAL. *BP Energy Outlook 2030*. Londres, Reino Unido, 2011.
- [4] ROCKSTRÖM, J. *Planetary boundaries*. **New Perspectives Quarterly**, v. 27, p. 72-74, 2010.
- [5] ROCKSTROM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN, F.; STUART, I.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T.M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H.J.; NYKVIST, B.; DE WIT, C.A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SORLIN, S.; SNYDER, P.K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R.W.; FABRY, V.J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J.A. *A safe operating space for humanity: identifying and quantifying planetary boundaries that must not be transgressed could help prevent human activities from causing unacceptable environmental change, argue Johan Rockstrom and colleagues*. **Nature**, v. 461, n. 7263, p. 472-475, 2009.
- [6] MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE; DIRETORIA DE GEOCIÊNCIAS; COORDENAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS; COORDENAÇÃO DE GEOGRAFIA. *Indicadores de desenvolvimento sustentável 2010*. **Estudos e pesquisas**, Rio de Janeiro, Brasil, n. 7, p. 443, 2010.
- [7] BILANOVIC, D.; ANDARGATCHEW, A.; KROEGER, T.; SHELEF, G. *Freshwater and marine microalgae sequestering of CO₂ at different C and N concentrations – response surface methodology analysis*. **Energy Conversion Manage**, v. 50, p. 262-267, 2009.
- [8] VIEIRA, L.; SANTOS, A.; CARDOSO, L. *Sequestro de carbono*. **Enciclopédia Biosfera**, Brasil, n. 7, 2009.
- [9] BERBEROGLU, H.; GOMEZ, P.S.; PILON, L. *Radiation characteristics of botryococcus braunii, chlorococcum littorale, and chlorella sp. used for CO₂ fixation and biofuel production*. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, v. 110, p. 1879–1893, 2009.
- [10] PIRES, J.C.M.; ALVIM-FERRAZ, M.C.M.; MARTINS, F.G.; SIMÕES, M. *Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: engineering aspects and biorefinery concept*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3043-3053, 2012.
- [11] SKJÅNES, K.; REBOURS, C.; LINDBLAD, P. *Potential for green microalgae to produce hydrogen, pharmaceuticals and other high value products in a combined process*. **Critical Reviews in Biotechnology**, Estados Unidos, v. 33, n. 2, p. 172–215, 2013.

- [12] HANNON, M.; GIMPEL, J.; TRAN, M.; RASALA, B.; MAYFIELD, S. *Biofuels from algae: challenges and potential*. **Biofuels**, v. 1, n. 5, p. 763-784, 2010.
- [13] WILEY, P. E.; CAMPBELL, J.E.; MC KUNIN, B. *Production of biodiesel and biogas from algae: a review of process train options*. **Water Environment Research**, Estados Unidos, v. 83, n. 4, p. 326-338, 2011.
- [14] AZEVEDO, D.; KIPERSTOK, A.; ANDRADE, S.E., JORQUERA, O.; PERELO, L.W. *Microalgae growth potential in Brazilian semi-arid region*. In: EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE AND EXHIBITION, 19, 2011, Berlim, Alemanha, **Anais...** Berlim, 2011, p. 802 - 806.
- [15] PAULI, G.A. *The blue economy 10 years 100 innovations 100 million jobs report to the Club of Rome*. Estados Unidos, p. 336, 2010.
- [16] GUARDADO, J.; *Tecnología del biogás*. **Energía y tu**, n. 34, 2006.
- [17] LAKANIEMI, A.M.; TUOVINEN, O.H.; PUHAKKA J.A. *Anaerobic conversion of microalgal biomass to sustainable energy carriers a review*. **Bioresource Technology**, v. 135, p. 222–231, 2013.
- [18] INSTITUTO VIRTUAL DE INVESTIGACIONES GEOGRÁFICAS E INFORMACIÓN AMBIENTAL INGEFOR. Curso De Biogás. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/59878027/Informe-Sobre-La-Construccion-de-Digest-Ores-de-Biogas-01>>. Acesso em: 22 Maio 2013.
- [19] MARTÍ, J. *Biodigestores familiares: guía de diseño y manual de instalación*, Bolívia, 2008.
- [20] MAROZZI, M.; ÁVILA, M.; CASTRO, V.; VILLALOBOS, K.; VILLALOBOS, M. *Antología de evaluación de proyectos segunda parte*, Universidad Nacional de Costa Rica, 2006.
- [21] CAMPERO, O. *Biogás en Bolivia programa "Viviendas autoenergéticas"*. **Revista Futuros**. Bolívia, v. 5, n. 18, 2007.
- [22] KIELY, G. *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías, y sistemas de gestión*, Madrid, Espanha, 1999.
- [23] CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores Anaeróbios. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, v. 5, p. 245, 1997.
- [24] TEXTOS CIENTIFICOS. *Fermentación anaeróbica*. Disponível em: <<http://www.textoscientificos.com/energia/fermentacion>>. Acesso em: 22 Maio 2013.
- [25] MONGE, O.; CERTUCHA, M.; ALMENDARIZ, F. *Microbial biomass in batch and continuous system*. **Biomass Now - Sustainable Growth and Use**, cap. 18, p. 449-478, 2013.
- [26] ALVAREZ, J.; CANETA, L.; MOYANO, C. *Biomasa y biogás*, Argentina, 2006.
- [27] MAROZZI, M.; CORDERO, C.; HERNÁNDEZ, J.; RAMÍREZ, S.; VILLALOBOS, Z.; CHAVES, M.; GARBANZO, J.; VALERÍN, D.; BERROCAL, M.; BARNETT, C.; RAMÍREZ, H.; ARRIETA, J.; GONZÁLES, B.; ESPINOZA, A.; MENA, S.; RODRÍGUEZ, J.; SOTO, O.; VILLALOBOS, N. *Antología de evaluación de proyectos primera parte*, Universidad Nacional de Costa Rica, 2006.

- [28] HILBERT, J. *Manual para la producción de biogás*, Argentina, 2003.
- [29] BOHUTSKYI, P.; BETENBAUGH, M. J.; BOUWER, E. J. *The effects of alternative pretreatment strategies on anaerobic digestion and methane production from different algal strains*. **Bioresource Technology**, v. 155, p. 366-372, 2014.
- [30] GTZ PROYECT INFORMATION AND ADVISORY SERVICE ON APPROPRIATE TECHNOLOGY (ISAT). *Biogas - application and production development*. **Biogas Digest**, v. 2, p. 81, 2007.
- [31] JARAUTA, L. *Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos: estudio de las necesidades para la implantación en Perú*. **Energía**, Perú, 2005.
- [32] GARIBAY, A.; VÁZQUEZ, R.; SÁNCHEZ, M.; SERRANO, L.; MARTÍNEZ, A. *Biodiesel a partir de microalgas*. **BioTecnología**, México, v. 13, n. 3, p. 38-61, 2009.
- [33] Hu, Q.; SOMMERFELD, M.; JARVIS, E.; GHIRARDI, M.; POSEWITZ, M.; SEIBERT, M.; DARZINS, A. *Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances*. **The Plant journal**, v. 54, n. 4, p. 621-39, 2008.
- [34] Ho, S.-H.; Chen, C.-Y.; Lee, D.-J.; Chang, J.-S. *Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems-a review*. **Biotechnology Advances**, v. 29, n. 2, p. 189-98, 2011.
- [35] MASCARELLI, A. *Gold rush for algae*. **Nature**, v. 461, p. 460-461, 2009.
- [36] AIKAWA, S.; IZUMI, Y.; MATSUDA, F.; HASUNUMA, T.; CHANG, J.-S.; KONDO, A. *Synergistic enhancement of glycogen production in arthrospira platensis by optimization of light intensity and nitrate supply*. **Bioresource Technology**, v. 108, p. 211-215, 2012.
- [37] SINGH, J.; GU, S. *Commercialization potential of microalgae for biofuels production*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 2596-2610, 2010.
- [38] ZAMALLOA, C.; BOON, N.; VERSTRAETE, W. *Anaerobic digestibility of scenedesmus obliquus and phaeodactylum tricorutum under mesophilic and thermophilic conditions*. **Applied Energy**, v. 92, p. 733-738, 2012.
- [39] ALBARRACÍN, I. *Microalgas: potenciales productoras de biodiesel*. In: SIMPOSIO ELECTRÓNICO INTERNACIONAL - LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES CON EFICIENCIA, ESTABILIDAD Y EQUIDAD, 15, 2007, Argentina, **Anais...** Argentina, 2007, p. 16.
- [40] LAMMENS, T.M.; FRANSSEN, M.C.R.; SCOTT, E.L.; SANDERS, J.P.M.; *Availability of protein-derived amino acids as feedstock for the production of bio-based chemicals*. **Biomass and Bioenergy**, v. 44, p. 168-181, 2012.
- [41] UGGETTI, E.; SIALVE, B.; TRABLY, E.; STEYER, J.-P. *Integrating microalgae production with anaerobic digestion: a biorefinery approach*. **Biofuels Bioproducts & Biorefining**, 2014.

- [42] SCHMID-STRAIGER, U. *Algae biorefinery–concepts*. In: National German Workshop on Biorefineries 15 September 2009 Worms, 2009, Alemanha, p. 29.
- [43] ALGAE FOR FEED. *Microalgae nutritional composition*. Disponível em: <www.algae4feed.org/brief/microalgae-nutritional-composition/53>. Acesso em: 2 Dez. 2013.
- [44] BECKER, E.W. *Microalgae as a source of protein*. **Biotechnology Advances**, v. 25, p. 207-210, 2007.
- [45] RUEDA, R.A. *Efecto nutricional de tres microalgas y una cianobacteria en el cultivo del rotífero brachionusplicatilis müller: 1786*, **Ciencias Marinas**, México, v. 22, n. 3, p. 313-328, 1996.
- [46] INTELLIGENT ENERGY EUROPE. *Identificación del proyecto: cultivo y transformación de algas*, Espanha, 2011.
- [47] MUSSGNUG, J. H.; KLASSEN, V.; SCHLÜTER, A.; KRUSE, O. *Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept*. **Journal of biotechnology**, v. 150, n. 1, p. 51–56, 2010.
- [48] SIALVE, B.; BERNET, N.; BERNARD, O. *Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable*. **Biotechnology Advances**, v. 27, n. 4, p. 409–16, 2009.
- [49] EHIMEN, E.A.; CONNAUGHTON, S.; SUN, Z.; CARRINGTON, G. C. *Energy recovery from lipid extracted, transesterified and glycerol codigested microalgae biomass*. **GCB Bioenergy**, v. 1, n. 6, p. 371–381, 2009.
- [50] DE JONG, E.; AVANTIUM TECHNOLOGIES BV; VAN REE, R. *Biorefineries: adding value to the sustainable utilization of biomass IEA BIOENERGY*. Wageningen University and Research Centre the Netherlands, 2009.
- [51] WAHAL, S.; VIAMAJALA, S. *Maximizing algal growth in batch reactors using sequential change in light intensity*. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 161, p. 511–522, 2010.
- [52] HOSSAIN, A.B.M.; SALLEH, A.; BOYCE, A.N.; CHOWDHURY, P.; NAQUIDDIN, M. *Biodiesel fuel production from algae as renewable energy*. **American Journal of Biochemistry and Biotechnology**, v. 4, n. 3, p. 250–254, 2008.
- [53] GRIFFITHS, M. J.; HARRISON, S. T. L. *Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production*. **Journal of Applied Phycology**, v. 21, n. 5, p. 493–507, 2009.
- [54] SINGH, N. K.; DHAR, D. W. *Microalgae as second generation biofuel a review*. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 31, n. 4, p. 605–629, 2011.
- [55] YEN, H.-W.; HU, I.-C.; CHEN, C.-Y.; HO, S.-H.; LEE, D.-J.; CHANG, J.-S. *Microalgae based biorefinery from biofuels to natural products*. **Bioresource Technology**, v. 135, p. 166–174, 2013.
- [56] HARUN, R.; SINGH, M.; FORDE, G. M.; DANQUAH, M. K. *Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products*.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 1037–1047, 2010.
- [57] HO, S-H.; HUANG, S-W.; CHEN, C-Y.; HASUNUMA, T.; Kondo, A.; Chang, J-S. *Bioethanol production using carbohydrate-rich microalgae biomass as feedstock*. **Bioresource Technology**, v. 135, p. 191-198, 2013.
- [58] MELIS, A.; ZHANG, L.P.; FORESTIER, M.; GHIRARDI, M.L.; SEIBERT, M. *Sustained photobiological hydrogen gas production upon reversible inactivation of oxygen evolution in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii**. **Plant Physiology**, v. 122, p. 127–135, 2000.
- [59] SPOLAORE, P.; JOANNIS-CASSAN, C.; DURAN, E.; ISAMBERT, A. *Commercial applications of microalgae*. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 101, n. 2, p. 87–96, 2006.
- [60] UM, B.H.; KIM, Y.S. *Review: a chance for Korea to advance algal-biodiesel technology*. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 15, n.1, p. 1–7, 2009.
- [61] VIJAYARAGHAVAN, K.; HEMANATHAN, K. *Biodiesel production from freshwater algae*. **Energy Fuels**, v.23, n. 11, p. 5448–5453, 2009.
- [62] SCHENK, P.; THOMAS-HALL, S.; STEPHENS, E.; MARX, U.; MUSSGNUM, J.; POSTEN, C.; KRUSE, O.; HANKAMER, B. *Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production*. **Bioenergy Research**, v. 1, n. 1, p. 20–43, 2008.
- [63] WIJFFELS, R.H. *Potential of sponges and microalgae for marine biotechnology*. **Trends in Biotechnology**, v. 26, n. 1, p. 26-31, 2008.
- [64] CHISTI, Y. *Biodiesel from microalgae*. **Biotechnology Advances**, v. 25, n. 3, p. 294–306, 2007.
- [65] EHIMEN, E.A.; SUN, Z. F.; CARRINGTON, C. G.; BIRCH, E. J.; EATON-RYE, J. J. *Anaerobic digestion of microalgae residues resulting from the biodiesel production process*. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3454–3463, 2011.
- [66] IMPRESSÃO DIGITAL 126; OFICINA DE JORNALISMO DIGITAL (COM 126) FACOM; UFBA; LABORATÓRIO DE BIOENERGIA E CATÁLISE. *Microalgas são alternativa para a produção de biodiesel*, Disponível em: <<http://impressaodigital126.com.br/?p=13479>>, Acesso em: 27 Dez. 2014.
- [67] SHEEHAN, J.; DUNAHAY, T.; BENEMANN, J.; ROESSLER, P. *A look Back at the U.S. department of energy's aquatic species program: biodiesel from algae*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado Estados Unidos, p. 328, 1998.
- [68] AMON, T.; AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; MACHMÜLLER, A.; HOPFNER-SIXT, K.; BODIROZA, V.; HRBEK, R.; FRIEDEL, J.; PÖTSCH, E.; WAGENTRISTL, H.; SCHREINER, M.; ZOLLITSCH, W. *Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations*. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 17, p. 3204–3212, 2007.
- [69] WEILAND, P. *Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany*. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 109, p. 263–274, 2003.

- [70] RAMOS-SUÁREZ, J. L.; CARRERAS, N. *Use of microalgae residues for biogas production*. **Chemical Engineering Journal**, v. 242, p. 86–95, 2014.
- [71] GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, C.; SIALVE, B.; BERNET, N.; STEYER, J. P. *Impact of microalgae characteristics on their conversion to biofuel part II: focus on biomethane*. **Biofuels Bioproducts & Biorefining**, v. 6, p. 205–218, 2012.
- [72] PERELO, L.W.; SOUSA, L.L.; HORA, D.S. *Crescimento da microalga *Nannochloropsis* sp. em água salina do semi-árido com adição de esgoto doméstico como fonte de nutrientes*. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2, 2012, Feira de Santana, **Anais...** Feira de Santana, 2012, p. 6.
- [73] SAMAYOA, S.; BUESO, C.; VÍQUEZ, J. *Guía implementación de sistemas de biogestión en ecoempresas*, Honduras, p. 69, 2012.
- [74] DOERR, B.; LEHMKUHL, N. *Digestores de metano*, **ECHO Technical Note**, n. 44, p. 1-7, 2008.
- [75] VIEIRA, Y.; GONÇALVES, M.; MALLET-GUY, S. *Energia economia rotas tecnológicas textos selecionados*. Brasil, p. 330, 2010.
- [76] SCHWEDE, S.; REHMAN, Z; GERBER, M; THEISS, C; SPAN, R. *Effects of thermal pretreatment on an aerobic digestion of nannochloropsis salina biomass*. **Bioresource Technology**, v 143, p. 505-511, 2013
- [77] APHA, AWWA and WEF. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION AND WATER ENVIRONMENT FEDERATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, Washington, 2012.
- [78] ALLEN, D. *Diseño y construcción de un digestor anaerobio de flujo pistón que trate los residuos generados en una explotación ganadera de la localidad de Loja, Ecuador, empleando tecnologías apropiadas*, 2010, 279p. Projeto de Formatura, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha.
- [79] CAMPOS, B. *Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino*. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 20, n. 2, p. 37-41, 2011.
- [80] HUERTA, N. *Degradación anaerobia de residuos de restaurantes de ciudad universitaria*, 2010, 157p. Projeto de Formatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [81] LÓPEZ, C.; LÓPEZ, O. *Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias químicas de la universidad Veracruzana*, 2009, 100p. Projeto de Formatura, Facultad de Ciencias Químicas Campus Coatzacoalcos, Universidad Veracruzana, México.
- [82] CARRILLO, L. *Energía de biomasa fotosíntesis biomasa conversión por microorganismos biogas etanol biodiesel*. Jujuy, Argentina, 2004, p. 83.
- [83] DOMINGUEZ, D.; GRANJA, J.; GUACHAGMIRA, R.; ROBALINO, L. *Manual de construcción y operación de biodigestor tipo hindú y flujo continuo*, Ecuador, 2010. p. 44.

- [84] RAMÓN, J.; ROMERO, L.; SIMANCA, J. *Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo*. **Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo**, v.1, n.1, p.15-23, 2006.
- [85] JEGEDE, A. *Anaerobic digestion of cyanobacteria and chlorella to produce methane for biofuel*. **Int J Agric&BiolEng**, v. 5, n. 3, p. 1-8, 2012.
- [86] SALERNO, M.; NURDOGAN, Y.; LUNDQUIST, T. 2009. *Biogas production from algae biomass harvested at wastewater treatment ponds*. In: 2009 Bioenergy Engineering Conference Sponsored by ASABE Hyatt Regency Seattle, 2009, Washington, **Anais...** Washington, 2009, p. 5.
- [87] DIVAKARAN, R.; SIVASANKARA, V.N. *Flocculation of algae using chitosan*. **Journal of Applied Phycology**, v. 14, p. 419-422, 2002.
- [88] NEVES, V.T.C. *Digestão anaeróbia da biomassa residual de microalgas pós-extração de lipídios*. 2014, 91p. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia.
- [89] EHIMEN, E.A.; HOLM-NIELSEN, J.-B.; POULSEN, M.; BOELSMAND, J.E. *Influence of different pre-treatment routes on the anaerobic digestion of a filamentous algae*. **Renewable Energy**, v. 50, p. 476-480, 2013.
- [90] ALZATE, M.E.; MUÑOZ, R.; ROGALLA B, F.; FDZ-POLANCO, F.; PÉREZ, S.I. *Biochemical methane potential of microalgae biomass after lipid extraction*. **Chemical Engineering Journal**, v. 243, p. 405-410, 2014.
- [91] AQUINO, S.; CHERNICHARO, C.A.L.; FORESTI, E. FLORÊNCIO, M.; MONTEGGIA, L.O. *Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios*. **Eng. Sanit. Ambient**, v. 12, n. 2, p. 192-201, 2007.
- [92] VARNERO, M.T. *Manual de biogás*, Chile, 2011, p. 120.
- [93] TURDERA, M.E.V.; DANILO Y. *Estudo da viabilidade de um biodigestor no município de dourados*. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100062&script=sci_arttext>. Acesso em: 12 Jan. 2015.
- [94] SEIXAS, J.; FOLLE, S.; MARCHETTI, D. *Construção e funcionamento de biodigestores*, Circular técnica número 4 EMBRAPA centro de pesquisa agropecuária dos cerrados (CPAC), Brasil, 1981, p. 63.
- [95] ALVERANGA, F. *Ensino não formal da diminuição da carga poluidora de dejetos animais a partir da produção de biogás e biofertilizante em pequenas propriedades rurais*. 2013, 70p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- [96] MATTOS, L.; FARÍAS, M. *Manual do digestor Sertanejo*, Projeto Dom Helder Camara, Recife, Brasil, 2011, p. 55.
- [97] BENAVIDEZ, L.; DE LA ROCHA, J. *Proyecto de factibilidad para el desarrollo de biogás municipio de Sapahaqui proyecto ulupica APVSA AAC*. 2009, 283p. Projeto de Formatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés, Bolívia.

- [98] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. *Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión documento ANC-0603-19-01 guía para la implementación de sistemas de producción de biogás*, Colômbia, 2003. p. 47.
- [99] BAJGAIN, S. *Nepal biogas plant construction manual*. Disponível em: <http://journeytoforever.org/biofuel_library/methane_nepal.html>. Acesso em: 15 Jan. 2015.
- [100] BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Conversão de moedas*. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>>. Acesso em: 5 Fev. 2015
- [101] INSUCONS: *Análisis de precios unitarios, presupuestos de obra y materiales de construcción APU (Cimiento de Ho Ao)*, Disponível em: <<http://www.insucons.com/analisis-precio-unitario>>. Acesso em: 5 Fev. 2015.
- [102] INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO DA ARQUITETURA FORUM DA CONSTRUÇÃO: *Melhorando a qualidade do concreto feito em obra*, Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=31&Cod=41>>. Acesso em: 5 Fev. 2015.
- [103] SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL SINAPI; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE. *Preços de insumos*, Salvador, Bahia, Brasil, 2014. p. 107.
- [104] REGISTRON AUTOMAÇÃO COMERCIAL: *Seladoras*, Disponível em: <http://www.registron.com.br/seladoras-seladora-manual-m175_186?utm_source=buscape&utm_medium=buscape&utm_campaign=buscape>. Acesso em: 5 Fev. 2015.
- [105] BRASUTIL: *Abraçadeira de aço*, Disponível em: <<http://www.brasutil.com/produto/Abraçadeira+Rosca+sem+Fim++18+a+32M M++Eccofer/9597>>. Acesso em: 5 Fev. 2015.
- [106] PISO SALARIAL: *Tabela Salarial de serviços de janeiro de 2015*, Disponível em: <<http://www.pisosalarial.com.br/servicos/tabela-salarial-de-servicos-de-janeiro-de-2015/>>. Acesso em: 5 Fev. 2015.
- [107] CHAGAS G. *Gás gerado com material orgânico*. **Jornal UNESP**, São Paulo, p. 6, Jun. 2006.
- [108] ESPERANCINI, M.S.T.; COLEN, F.; DE C. BUENO, O.; PIMENTEL, A.E.B.; SIMON, E.J. *Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do estado de São Paulo*. **Eng. Agríc. Jaboticabal**, v. 27, n. 1, p. 110-118, 2007.
- [109] ECODEBATE CIDADANIA & MEDIO AMBIENTE, *Biodigestor beneficia famílias rurais do Brasil e evita extração de madeira da mata nativa*, Disponível em: <<http://www.ecodebate.com.br/2014/10/31/biodigestor-beneficia-familias-rurais-do-brasil-e-evita-extracao-de-madeira-da-mata-nativa/>>. Acesso em: 11 Fev. 2015.
- [110] DIACONIA BRASIL, *Versão Completa - Biodigestor: um jeito inteligente de cuidar do meio ambiente*, Disponível em:

- <https://www.youtube.com/watch?v=v3D8BP8I_L0>. Acesso em: 11 Fev. 2015.
- [111] INSTITUTO BRASIL AMBIENTE. *Geração de energia a partir de resíduos digestores para dejetos 2010*, Disponível em: <<http://www.brasilambiente.com.br/biodigestores.pdf>>. Acesso em: 11 Fev 2015.
- [112] RECOLAST AMBIENTAL: *Biodigestor tubular 3000*, Disponível em: <<http://recolast.lojavirtualfc.com.br/ListaProdutos.asp?IDLoja=6669&IDProduto=1174542&q=biodigestor-tubular-3000>>. Acesso em: 5 Fev. 2015.
- [113] DE PAULA, A.; DE ANDRADE, A.; GUSMÃO, D.; EVERETT, R. *Manual de treinamento em biodigestão*, Brasil, 2008, p. 23.
- [114] INSTITUTO PARA UMA ALTERNATIVA AGRARIA, UNIVERSITAT POLITÉCNICA DE CATALUNYA. *Manual de instalación de um biodigestor familiar tipo manga para zonas alto-andinas guía para Yachachiq*, Perú, [2007], p. 39.

UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA
CEP: 40.210-630
Telefone: (71) 3283-9800
E-mail: pei@ufba.br
Home page: <http://www.pei.ufba.br>

