



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO AMBIENTAL E SOCIOECONÔMICA DE UMA
UNIDADE RURAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO MUNICÍPIO DE MONTEIRO –
PB**

EMANUELLE MARIA CABRAL AVELINO SILVA

LINHA DE PESQUISA: Qualidade de Sistemas Ambientais

CAMPINA GRANDE

2017

EMANUELLE MARIA CABRAL AVELINO SILVA

**AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO AMBIENTAL E SÓCIOECONÔMICA DE UMA
UNIDADE RURAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO MUNICÍPIO DE MONTEIRO -
PB**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento aos requisitos necessários para obtenção do título de mestre.

ORIENTADOR: PROF. DR. RUI DE OLIVEIRA

**CAMPINA GRANDE
2017**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

S586a Silva, Emanuelle Maria Cabral Avelino.
Avaliação da contribuição ambiental e socioeconômica de uma unidade rural de produção de biogás no município de Monteiro – PB [manuscrito] / Emanuelle Maria Cabral Avelino Silva. - 2017.
64 p. : il. color.

Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Rui de Oliveira, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental".

1. Biodigestores 2. Biomassa 3. Biofertilizante. 4. Biogás. I.
Título.

21. ed. CDD 662.88

EMANUELLE MARIA CABRAL AVELINO SILVA

**AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO AMBIENTAL E SÓCIOECONÔMICA DE
UMA UNIDADE RURAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO MUNICÍPIO DE
MONTEIRO - PB**

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 31/08/2017

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento aos requisitos necessários para obtenção do título de mestre.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Rui de Oliveira

(Orientador – Universidade Estadual da Paraíba - UCPB)



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira

(Examinador interno – Universidade Estadual da Paraíba - UEPB)



Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura

(Examinador externo – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

"Todas as vitórias ocultam uma abdicação"

(Simone de Beauvoir)

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, por me permitir chegar até aqui me dando forças para continuar a caminhada.

A minha família, em especial ao meu esposo Nilton Silva pela ajuda na realização desse projeto, pelo companheirismo ao longo dos anos e por acreditar que eu sempre posso chegar mais longe de onde quero chegar. Aos meus filhos Willian Gabriel e Anne Beatriz pelas horas que passamos juntos e por me ensinarem o verdadeiro sentido da palavra amor. Como é bom tê-los ao meu lado, eu amo demais vocês.

A minha mãe Vera Lucia Cabral por sempre acreditar no meu potencial, por me ajudar em tudo que preciso, sempre me motivando, amo você. Ao meu pai pelo apoio e incentivo, aos meus irmãos Franklin, Daniele e Mirella pelos momentos compartilhados com muito amor, a vida sem vocês não seria a mesma.

Ao Prof. Dr. Rui de Oliveira por ter me aceitado como orientanda, pelo apoio, paciência e contribuição ao longo desses dois anos.

Aos colegas de turma do mestrado, em especial a Érica Bento e Virginia Albuquerque. Dividimos grandes experiências que ficarão sempre guardadas na memória.

As amigas Geovânia Cordeiro e Virgínia Albuquerque, são presentes que eu ganhei na graduação e no mestrado. Obrigada pelo companheirismo de ambas, pelo apoio, incentivo e ajuda ao longo da batalha, sem vocês eu não teria concluído essa etapa da minha vida.

A Ângela Nogueira pela ajuda nas análises, você foi sem dúvida um apoio indispensável. Minha gratidão por toda vida.

Ao PPGCTA, através do seu corpo docente e seu secretariado, por terem me ajudado a esclarecer dúvidas e questionamentos.

Ao Laboratório de Saneamento da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil e ao Laboratório de Química de Biomassa (LQB) da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, pela disponibilização para a realização das análises.

A CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

A busca de tecnologias adaptadas à realidade do homem do campo situado no semiárido é uma das vertentes da atualidade, uma vez que a inserção de novos conhecimentos contribui para melhoria e eficiência das atividades produtivas em propriedades da zona rural. Dentre as várias tecnologias existentes, a biodigestão de resíduos agrícolas vem sendo uma aplicação com vantagens importantes para propriedades rurais. Além de inserir uma contribuição ambiental, com o tratamento de resíduos, os biodigestores fornecem o biogás, que pode ser usado como fonte de combustível, e o biofertilizante, que é um adubo orgânico rico em nutrientes de reposição para o solo. Nesse contexto, o presente estudo tem por finalidade avaliar as principais contribuições ambientais e socioeconômicas de um sistema de produção de biogás em uma unidade rural localizada no município de Monteiro-PB. O biodigestor projetado e instalado na propriedade foi do tipo sertanejo, devido ao baixo custo de construção e manutenção. O mesmo foi projetado para uma capacidade energética equivalente a 7 botijões de gás de cozinha por mês, mostrando ser uma das principais contribuições socioeconômicas. A sua estrutura é constituída por um fermentador de 16 m³ e gasômetro de 5 m³. No intuito de avaliar a biomassa disponível foram realizados experimentos em bancada, buscando caracterizar e avaliar a produção de biogás, sendo verificada a redução da matéria orgânica a partir do parâmetro DQO (demanda química de oxigênio). Três tipos de amostras de biomassa foram avaliados, sendo tais amostras puras de esterco suíno e bovino, e a terceira com mistura de 50% cada, ou 1:1. Com monitoramento de 45 dias de digestão, os melhores resultados de produção de biogás foram da mistura de 1:1, com redução na DQO de 69 %. Por sua vez, a principal contribuição ambiental do biodigestor na propriedade é a utilização de uma barreira sanitária no criadouro de suínos, sendo os resíduos tratados, reduzindo a presença de vetores e transmissores de doenças.

Palavras-chave: biodigestores, biomassa, biofertilizante.

ABSTRACT

The search for technologies adapted to the reality of the rural man located in the semi-arid is one of the current trends, since the insertion of new knowledge contributes to the improvement and efficiency of productive activities in rural properties. Among the several existing technologies, biodigestion of agricultural waste has been an application with important advantages for rural properties. In addition to entering an environmental contribution to the treatment of waste, biogas digesters provide, which can be used as a fuel source, and the bio-fertilizer, which is a rich organic fertilizer in replacement of nutrients to the soil. In this context, the present study aims to evaluate the main environmental and socioeconomic contributions of a biogas production system in a rural unit located in the city of Monteiro-PB. The biodigester designed and installed in the property was of the sertanejo type, due to the low cost of construction and maintenance. The same was designed for an energy capacity equivalent to 7 cookware per month, showing to be one of the main socioeconomic contributions. Its structure is composed of a fermenter of 16 m³ and a gasometer of 5 m³. In order to evaluate the available biomass, experiments were carried out in the laboratory, in order to characterize and evaluate the biogas production. The organic matter reduction was verified using the COD (Chemical Oxygen Demand) parameter. Three types of biomass samples were evaluated, such samples being pure swine manure and bovine, and the third with 50% each, or 1: 1. With monitoring of 45 days of digestion, the best biogas production results were of the 1: 1 mixture, with COD reduction of 69%. In turn, the main environmental contribution of the biodigester in the property is the use of a sanitary barrier in the pig farm, where waste is treated, reducing the presence of vectors and disease transmitters.

Key words: biodigestors, biomass, biofertilizers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases detalhadas da digestão anaeróbia.....	17
Figura 2 – Rotas de formação do biogás em função do tipo de compostos orgânicos	22
Figura 3 – Representação do modelo de biodigestor Indiano.	26
Figura 4 – Representação do modelo de biodigestor Chinês.....	27
Figura 5 – Representação do modelo de biodigestor tipo marinha.	28
Figura 6 – Representação simplificada de um biodigestor do tipo Canadense.....	28
Figura 7 – Representação simplificada de um biodigestor do tipo Alemão.....	29
Figura 8 – Representação simplificada de um biodigestor sertanejo.	30
Figura 9 – Diagrama simplificado dos produtos de um biodigestor do tipo sertanejo.	35
Figura 10 – Proposta global da unidade de geração e distribuição de biogás.	36
Figura 11 – Localização e extensão da propriedade de instalação do sistema de biodigestão com certa de 135.000,00 m ² (13,5 hectares)	37
Figura 12 – Localização da área de cultivo e das instalações da propriedade	38
Figura 13 – Geometria do biodigestor sertanejo instalado na comunidade rural, sítio mocó, no município de Monteiro – PB.....	40
Figura 14 – Vista do topo do biodigestor sertanejo (a) instalado e em (b) operação na unidade rural do município de Monteiro – PB.....	41
Figura 15 – Unidade de purificação, compressão e distribuição do biogás.....	42
Figura 16 – Sistema fotovoltaico para acionamento do Compressor.	43
Figura 17 – Sistema para biodigestão (biorreatores com coletores de biogás).....	44
Figura 18 – Experimento das fontes de biomassa	45
Figura 19 – Sistema de armazenamento de biogás	46
Figura 20 – Unidade de criação de suínos.	49
Figura 21 – Sistema de biodigestão.	50
Figura 22 – Acompanhamento da produção de biogás no experimento	53
Figura 23 – Acompanhamento da produção acumulada de biogás	54
Figura 24 – Acompanhamento da produção acumulada de biogás	55
Figura 25 – Composição aparente de metano no intervalo de 10 semanas do biogás produzido no biodigestor instalado no sítio Mocó, Monteiro- PB.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição percentual típica do biogás.....	15
Tabela 2 – Comparação entre 1 m ³ de biogás e outros combustíveis	24
Tabela 3 – Capacidade de geração de 1 m ³ de biogás	25
Tabela 4 – Valores de energia equivalente correspondente à produção de 7,05 m ³ dia de biogás.....	39
Tabela 5 – Valores de construção dos principais componentes da unidade rural de produção de biogás e suas respectivas capacidades.	47
Tabela 6 – Balanço econômico anual para construção e produção de 7,05 m ³ de biogás/dia.....	48
Tabela 7 – Concentração de sólidos totais, fixos e voláteis	51
Tabela 8 – Alcalinidade e ácidos graxos voláteis das amostras.....	51
Tabela 9 – Concentração de Carbono orgânico e Nitrogênio total.....	52
Tabela 10 – Valores de DQO resultantes da biodigestão em bancada.....	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 GERAL	13
2.2 ESPECÍFICOS	13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 Tecnologias alternativas que contribuem com o saneamento ambiental	14
3.2 Digestão anaeróbia.....	15
3.3 Microbiologia da digestão anaeróbia	16
3.3.1 Hidrólise.....	18
3.3.2 Acidogênese	19
3.3.3 Acetogênese.....	20
3.3.4 Metanogênese	21
3.3.5 Rotas reacionais e degradação da biomassa	21
3.4 Biogás.....	23
3.5 Tipos de biodigestores.....	25
4 METODOLOGIA	35
4.1 Localização da propriedade e instalação do biodigestor	36
4.2 Levantamento estrutural da unidade	38
4.3 Monitoramento do experimento de bancada.....	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 Avaliação econômica.....	47
5.2 Contribuição ambiental	48
5.3 Caracterização da biomassa.....	50
5.4 Monitoramento do experimento de bancada	52
5.5 Monitoramento da unidade instalada no campo.....	56
6 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais é visível a necessidade de utilizar energias alternativas que contribuam com o saneamento ambiental e mitiguem as consequências das mudanças climáticas. A criação de tecnologias de baixo custo e de fácil aplicação, no âmbito da obtenção de energia, com o aproveitamento de materiais, antes, sem valor, vem se mostrando uma alternativa bastante promissora. Uma dessas criações é a obtenção de energia a partir de matéria orgânica, tais como esterco de animais, esgoto e/ou resíduos vegetais, com os quais são produzidos biogás e fertilizante orgânico, aplicando um processo anaeróbio em um biodigestor (SILVA et al., 2012).

Além da economia nos custos com energia e os ganhos ambientais, os biodigestores também possuem outra vantagem, pois os resíduos, depois de tratados, se transformam em um eficiente fertilizante natural, o biofertilizante, que pode ser usado na própria propriedade, buscando a correção do solo nos ciclos de cultivos, ou até mesmo podendo ser comercializado.

Um biodigestor é um equipamento que além de tratar resíduos gerados nas atividades agrícolas e agropecuárias, possibilita a geração de biofertilizante e bioenergia. Seus principais produtos podem ser uma alternativa ao desenvolvimento ambiental e socioeconômico de propriedades rurais. Portanto, este trabalho de pesquisa tem como finalidade avaliar as contribuições no ciclo produtivo de uma unidade rural com a implantação de um sistema de produção de biogás.

O princípio do funcionamento de um biodigestor é a biodigestão anaeróbia. Por sua vez, é um processo natural no qual a matéria orgânica é degradada por microrganismos (bactérias). Esse processo permite além da produção do biogás e do biofertilizante líquido e sólido, a redução de patógenos e propagação de doenças, ao qual pode ser caracterizado como uma barreira sanitária.

O biofertilizante, produto natural obtido concomitantemente ao biogás, é um adubo orgânico com qualidades nutricionais significativas para a melhoria do solo permitindo ajustar as características físicas, químicas e biológicas do mesmo, tornando seu rendimento mais eficaz e realizando um papel de proteção das plantas contra pragas e doenças (OLIVER, 2008; SILVA, 2007).

Por sua vez, o biogás pode ser utilizado para gerar energia térmica e elétrica. A energia térmica é gerada pela queima direta do biogás, enquanto a energia

elétrica é produzida a partir de grupos motogeradores, nos quais a taxa de conversão para energia elétrica é relativamente baixa (AMARAL, 2011). Contudo, a importância da cogeração de energia elétrica ou térmica a partir do biogás pode contribuir para melhorias significativas em atividades rurais onde tais energias são necessárias.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar as principais contribuições ambientais e socioeconômicas de um sistema de produção de biogás em uma unidade rural localizada no município de Monteiro-PB.

2.2 ESPECÍFICOS

- i. Descrever a instalação do sistema de produção de biogás na propriedade;
- ii. Levantar os procedimentos de operação do sistema;
- iii. Avaliar o sistema de produção de biogás instalado na propriedade;
- iv. Quantificar a matéria prima e os produtos obtidos com o sistema;
- v. Avaliar os principais destinos e aplicações do biofertilizante e biogás na unidade rural;
- vi. Identificar as principais melhorias ambientais e socioeconômicas na unidade rural.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Tecnologias alternativas que contribuem com o saneamento ambiental

A busca por tecnologias agregadas a processos produtivos tais como agricultura, suinocultura, bovinocultura e avicultura, são de grande interesse às necessidades da nova ordem socioambiental. Um bom exemplo dessas tecnologias são os biodigestores, os quais têm a capacidade de tratar resíduos orgânicos aliada à geração de energia, além de contribuir para a redução da propagação de patógenos.

Nas últimas duas décadas, estudos sobre a utilização da biodigestão vêm sendo desenvolvidos, destacando a contribuição socioeconômica e ambiental dessa tecnologia. Ranzi e Andrade (2004) realizaram o estudo da viabilidade de transformação de esterqueiras e bioesterqueiras para dejetos suínos em biodigestores rurais visando o aproveitamento do biofertilizante e do biogás. Os autores apresentaram o potencial energético a partir da produção de biogás equivalente a 0,5 botijão de cozinha por mês, e um retorno do investimento em 2,5 a 3 meses.

Barbosa e Langer (2011) realizaram estudos sobre o uso de biodigestores em propriedades rurais, como alternativa para alcançar a sustentabilidade ambiental. De acordo com os autores, o uso adequado dos resíduos gerados no campo apresenta vantagens e benefícios com a utilização do biogás para gerar energia renovável e a produção de biofertilizante para o uso em pastagens e lavouras. No estudo, os mesmos relatam que o aproveitamento dos resíduos com o uso de biodigestores traz ganho significativo para o produtor e o meio ambiente.

O uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais na microrregião de Santa Rosa-RS foi objeto de pesquisa por Barichello et al. (2015). Os autores realizaram o levantamento do perfil das propriedades que possuíam os equipamentos para o tratamento de resíduos rurais e produção de biogás. Na pesquisa, foi revelado que cerca de 30 % dos equipamentos instalados encontravam-se desativados. Por sua vez, o estudo mostra que dificuldades com a operação e manutenção de biodigestores são os principais obstáculos ao uso dessa tecnologia.

Os biodigestores vêm sendo uma das principais tecnologias voltadas ao reaproveitamento do resíduo rural, possibilitando a obtenção de produtos contribuintes para a sustentabilidade da cadeia produtiva rural. O potencial da capacidade ambiental dessas tecnologias pode ser aumentado com a utilização de outras fontes de energia renováveis como a energia solar (SILVA et al., 2016).

3.2 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico natural que consiste na degradação de matéria orgânica, por microrganismos, na ausência de oxigênio. A partir de reações químicas e bioquímicas, a partir da ação de microrganismos, eles são capazes de realizar modificações de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples, onde os componentes químicos principais são o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), sendo esses compostos os principais constituintes do comumente denominado biogás (LIANHUA et al., 2010). Além desses dois compostos, existem outros em menores quantidades. A Tabela 1 apresenta as faixas típicas de composição aproximada desses compostos no biogás.

Tabela 1 – Composição percentual típica do biogás

Elemento	Quantidade (%)
Metano (CH ₄)	50 a 70
Dióxido de carbono (CO ₂)	30 a 40
Nitrogênio (N ₂)	0 a 10
Hidrogênio (H ₂)	0 a 5
Oxigênio (O ₂)	0 a 1
Gás sulfídrico (H ₂ S)	0 a 1

Fonte: SITORUS et al. (2012)

A digestão anaeróbia é um processo conhecido há milênios, tem sido utilizado por assírios no Século 10 antes de Cristo e no século 16, na Pérsia, sendo a primeira instalação em larga escala montada em Bombaim, na Índia em 1859 (ABBASI et al. 2012).

Mueller (2007) apresenta conhecimentos sobre o processo anaeróbio, destacando as melhorias nas técnicas, e nos equipamentos. O autor aponta que as

principais contribuições técnicas foram a transferência da biodigestão para tanques fechados, aquecimento e equipamento de mistura para melhorar o processo. Antes o processo era realizado em lagoas anaeróbias e hoje esses tanques fechados são denominados de biorreatores.

A digestão anaeróbia é encontrada no meio ambiente de forma natural como, por exemplo, nos sedimentos anaeróbios de lagos e pântanos e também no trato digestivo dos animais, os ruminantes. Esse processo pode ser reproduzido através de biorreatores, os quais utilizam os microrganismos encontrados no meio ambiente e realizam o mesmo processo em um ambiente fechado e de maneira controlada, obtendo dessa maneira o biogás e o fertilizante (HORNUNG, 2014).

3.3 Microbiologia da digestão anaeróbia

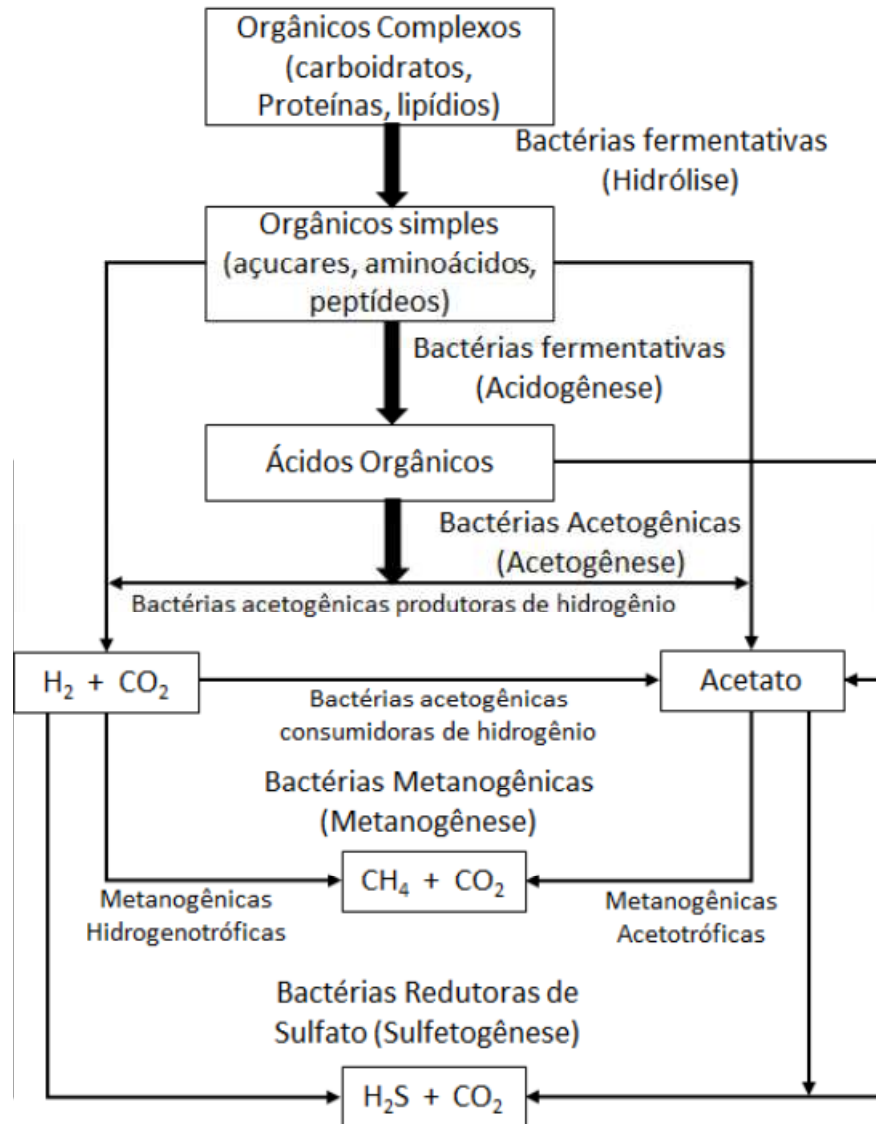
A digestão anaeróbia é um processo em que ocorre a degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio, sendo a biomassa transformada em biogás. A conversão da matéria orgânica em meio aquoso é realizada em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, que geram produtos diferentes, os quais podem, subsequentemente, servir de substrato para as fases seguintes, finalizando com o biogás (CHEN et al., 2008; YENIGUN & DEMIREL, 2013) e a matéria não degradada de biofertilizante.

Cada fase da biodigestão anaeróbia utiliza grupos distintos de microrganismos, que usam enzimas intracelulares e/ou extracelulares para quebrar os compostos da biomassa. O substrato inserido no biorreator tem a finalidade de favorecer o metabolismo anaeróbio, o fornecimento de energia e crescimento celular. Se o crescimento de qualquer comunidade de microrganismos em uma determinada fase é inibido o equilíbrio das populações é deslocado dentro do processo, isso pode ter impacto sobre a taxa global e a eficiência da digestão, podendo gerar até a falha do processo (HORNUNG, 2014).

As fases da digestão anaeróbia podem ser estruturadas em um diagrama como ilustrado na Figura 1. Em um biodigestor/biorreator as quatro etapas ocorrem ao mesmo tempo no equilíbrio, que pode ser afetado por variações de temperatura, pH, diluição, taxa de carregamento, tempo de detenção hidráulica, toxicidade, mistura/agitação, patógenos e sólidos residuais/lodo. A relação carbono/nitrogênio é

um dos parâmetros que podem reduzir a eficiência da digestão anaeróbia. Uma forma de estimar a produção de biogás é a partir dos sólidos voláteis, ou seja, os sólidos orgânicos que poderão ser convertidos pela biodigestão.

Figura 1 – Fases detalhadas da digestão anaeróbia

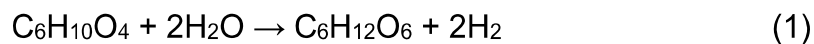


Fonte: Guimarães e Nour (2001).

De acordo com a Figura 1 observa-se cada fase corresponde à ação de tipos específicos de bactérias e suas respectivas conversões de compostos. Por sua vez, cada fase tem sua importância no processo de digestão, e o entendimento reacional se faz necessário para a busca de melhorias nesse processo.

3.3.1 Hidrólise

A hidrólise divide-se em duas etapas, sendo a primeira representada pela quebra de partículas de carboidratos, proteínas e lipídios da matéria orgânica e na segunda ocorre a conversão desse material, por meio das enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias em monossacarídeos, aminoácidos e ácidos de cadeia longa, ou seja, as proteínas se degradam para formação de aminoácidos, os carboidratos em açúcares (mono e dissacarídeos e os lipídios em ácidos graxos de cadeia longa (C15 a C17) e glicerina. A reação¹ representa o que ocorre nessa fase (HAANDEL e LETTINGA, 1994).



As bactérias hidrolíticas mais comuns que se destacam no processo anaeróbio são as bactérias que produzem a enzima lipase responsáveis pela degradação dos lipídios que são as dos gêneros *Clostridium*, *Micrococcus* e *Staphylococcus*; como também as produtoras de enzimas protease para degradação das proteínas, dos gêneros *Bacteroides*, *Butyvirio*, *Clostridium*, *Fusobacterium*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Proteus*, *Peptococcus* e *Bacillus*; e as dos gêneros *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Acetivirio* e *Eubacterium*, produtoras de amilases para degradação de polissacarídeos. A composição e o tipo de bactérias presentes são reflexos do tipo de substrato presente no sistema (ANDERSON et al., 2003).

Dependendo do material utilizado, a fase de hidrólise é limitante da velocidade de todo o processo, pois em situações em que o material orgânico apresenta alta complexidade, tais como material que apresenta predominantemente proteínas, gorduras e celulose, pode resultar em uma baixa velocidade de hidrólise, tornando-a a etapa limitante de todo o processo de digestão; quando isso ocorre o processo exige uma etapa de pré-tratamento (HORNUNG, 2014).

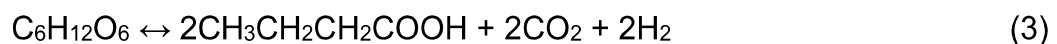
3.3.2 Acidogênese

Na fase acidogênica, segunda etapa do processo, os compostos que foram formados na etapa anterior serão absorvidos nas células das bactérias fermentativas acidogênicas, e, a partir dessas bactérias, ocorre a produção de compostos menores: ácidos graxos voláteis (AGV) de cadeia curta, álcoois, ácido láctico e compostos inorgânicos, CO₂, H₂, NH₃, H₂S, etc (MARKOU, 2015).

A biota da fase acidogênica é composta, em sua maior parte, por bactérias anaeróbias, mas apresenta uma pequena quantidade de espécies facultativas, as quais são de grande importância para o processo, pois as mesmas são capazes de metabolizar o material orgânico pela via oxidativa utilizando oxigênio molecular (O₂) como aceptor de elétrons, removendo, eventualmente, resíduos de oxigênio dissolvido no sistema e, dessa forma, eliminando qualquer efeito tóxico aos microrganismos estritamente anaeróbios, dentre eles, as arqueias metanogênicas, as quais são as principais responsáveis pela produção de metano no processo (HAANDEL e LETTINGA, 1994).

Outro fator importante é com relação a uma quantidade elevada de produção de ácidos graxos voláteis, pois o mesmo leva a um processo de acidificação, podendo, dessa forma, inibir as fases seguintes e, conseqüentemente, a perda de todo o processo.

Uma das reações que ocorrem nessa etapa é a quebra da glicose em ácido acético e butírico, representada nas Reações 2 e 3.



Dentre os gêneros de bactérias acidogênicas mais comuns em reatores anaeróbios estão *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia* (HAANDEL e LETTINGA, 1994).

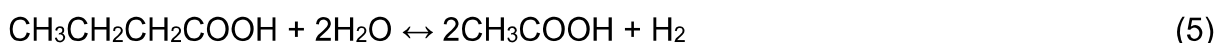
3.3.3 Acetogênese

Assim como nas etapas anteriores essa terceira fase transforma compostos em produtos os quais servirão para próxima fase, formando dessa maneira uma ligação entre a acidogênese e metanogênese. As bactérias acetogênicas utilizam os produtos da acidogênese, e realizam a oxidação, transformando-os em ácido acético, dióxido de carbono, hidrogênio e água.

A acetogênese autotrófica utiliza a mistura de hidrogênio e dióxido de carbono (CO₂) servindo como a fonte de carbono para a síntese celular. A acetogênese heterotrófica, por outro lado, usa substratos orgânicos, por exemplo, o ácido fórmico e o metanol, como fonte de carbono enquanto produzem o acetato como o produto final (KHANAL, 2008).

Outra forma de classificar a biocenose bacteriana da fase acetogênica é em dois grupos os quais são divididos com base no metabolismo, sendo o primeiro constituído por bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio obrigatórias que produzem ácido acético, CO₂ e H₂ a partir de uma grande variedade de substratos, dentre eles: ácidos graxos intermediários (propionato e butirato), álcoois ou outros ácidos orgânicos maiores (valerato, isovalerato, palmitato). O segundo grupo é formado pelas homoacetogênicas, que são estritamente anaeróbias, catalisando a formação de acetato, a partir de CO₂ e H₂. Os gêneros mais conhecidos de bactérias homoacetogênicas são *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium*, *Clostridium* e *Pelobacter* (MARA e HORAN, 2003).

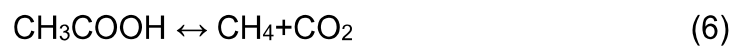
As Reações 4 e 5 representam a formação do ácido acético a partir de propionato e butirato de etila respectivamente.



3.3.4 Metanogênese

A última fase do processo, a metanogênese, é caracterizada por apresentar microrganismos metanogênicos que transformam o ácido acético, em metano, dióxido de carbono e água. Essa fase ocorre por duas vias principais:

- Metanogênese acetoclástica na qual o acetato é convertido em metano e água, como representado na Reação 6;



- Metanogênese hidrogenotrófica, na qual o hidrogênio e o dióxido de carbono são convertidos em metano e água, como representado na reação 7;



A via acetoclástica é responsável por cerca de 70% da produção de metano do processo e a outra via os outros 30%. Dois importantes gêneros responsáveis pela metanogênese acetotrófica são o *Methanosarcinae* e o *Methanosaeta* (MARA e HORAN, 2003).

3.3.5 Rotas reacionais e degradação da biomassa

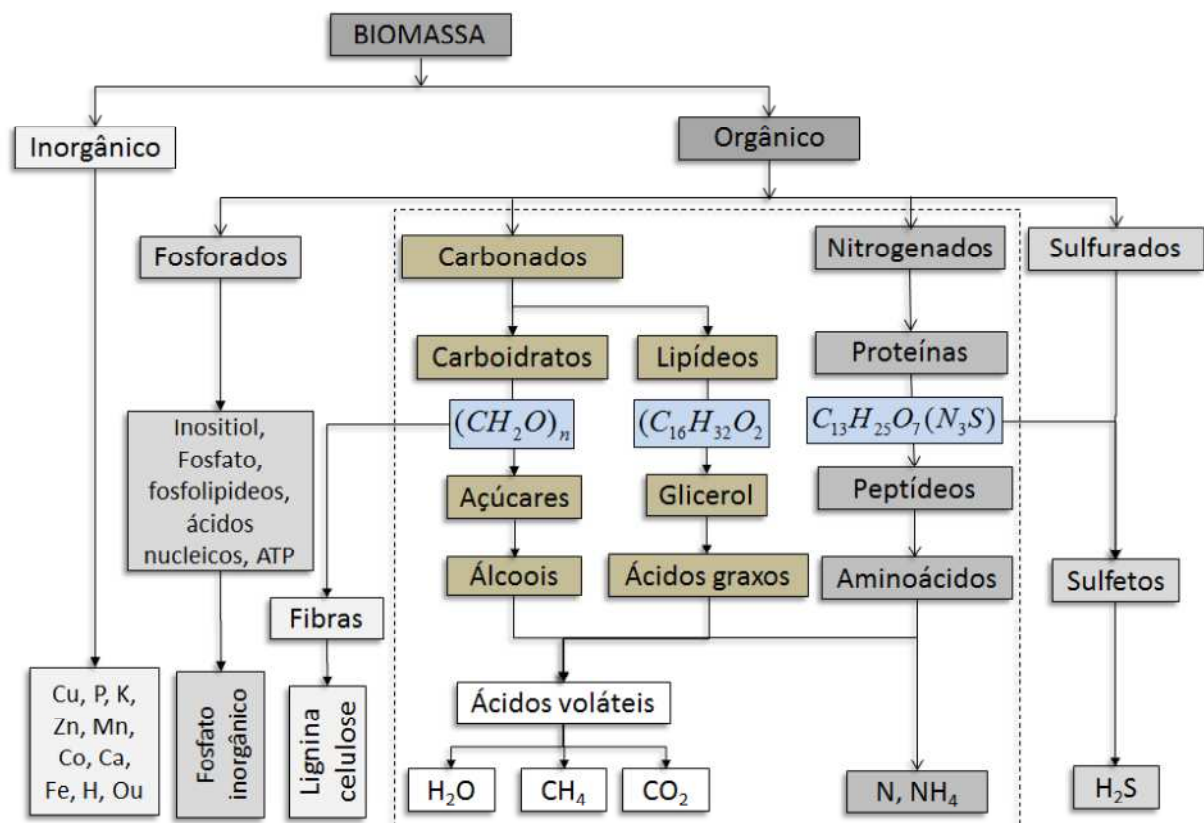
A biomassa é formada por compostos orgânicos e inorgânicos. A degradação ocorre dependendo da presença dos tipos de compostos orgânicos que, por sua vez, a presença de sais inorgânicos pode contribuir, servindo como catalisador, ou inibir, em função da concentração, uma vez que os sais fazem parte da nutrição bacteriana (RUIZ, 1992). No diagrama da Figura 2 apresentam-se as rotas de formação do biogás em função do tipo de compostos orgânicos.

Os compostos orgânicos podem estar presentes na biomassa na forma de fosforados, nitrogenados, carbonados e sulfurados. No entanto os contribuidores diretos para a formação dos componentes do biogás são os nitrogenados e os carbonados. Por sua vez, o balanço da presença desses dois tipos de compostos irá influenciar na eficiência de formação do metano.

Os nitrogenados são compostos basicamente formados por proteínas, que por sua vez apresentam nitrogênio, oxigênio e enxofre na cadeia hidrocarbônica. As proteínas são reduzidas a peptídeos, aminoácidos que são em seguida convertidos em ácidos voláteis, amônia e nitrogênio livre, e sulfetos.

Os carbonados são compostos formados por carboidratos e lipídeos. Cada tipo desses compostos segue rotas de formação de açúcares e de glicerol, seguido por álcoois e ácidos graxos, paralelamente. Ao final, resultam em ácidos voláteis que em seguida são convertidos nos componentes do biogás.

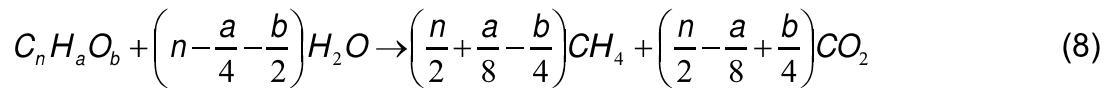
Figura 2 – Rotas de formação do biogás em função do tipo de compostos orgânicos



Fonte: própria (2017)

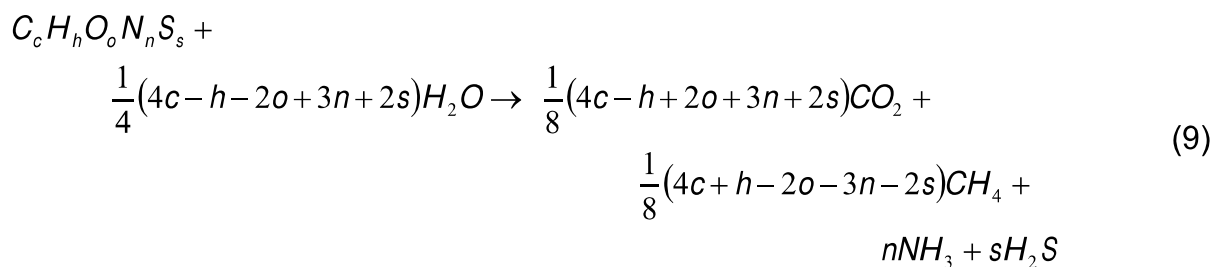
A partir da caracterização da biomassa é possível estimar a quantidade teórica de metano formado. As duas técnicas iniciais para formação teórica do biogás foram propostas por Buswell e Hatfield (1936) e Buswell (1952). Apesar de serem desenvolvidas a muitos anos, ainda hoje são consideradas como base para o cálculo teórico da formação do biogás.

A primeira técnica de determinação teórica de biogás tem como base a composição monomérica do carboidrato $(CH_2O)_n$, Reação 8, considerando apenas a presença de carboidrato em meio aquoso resultando na formação de metano e dióxido de carbono.



onde a, b e n são os coeficientes de ajuste ao tipo de carboidrato presente na fonte de biomassa.

A segunda técnica de determinação teórica de biogás tem como base a fórmula mínima, $C_c H_h O_o N_n S_s$, Reação 9, de compostos com carbonados e nitrogenados. Essa técnica permitiu inserir a correção na formação do biogás em substrato que contenha a presença de proteínas.



onde c, h, o, n e s são os coeficientes de ajuste aos compostos carbonados e nitrogenados presentes na fonte de biomassa.

3.4 Biogás

O biogás é uma mistura gasosa proveniente da decomposição anaeróbia de material orgânico, composto principalmente por dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). A matéria orgânica pode ser obtida de esterco animal, resíduos sólidos urbanos, lodo de esgoto, restos de alimentos e restos de matadouros. A digestão anaeróbia tem a finalidade de remover matéria orgânica, formar biogás e produzir biofertilizantes (ABASSI, 2012), sendo outro resultado a redução de patógenos presentes.

O biogás pode ser usado como alternativa energética renovável. Com teor de metano entre 50 e 70%, o biogás pode apresentar um poder calorífico entre 4,95 e 7,92 kWh.m⁻³. Este fator deve-se principalmente ao CH₄ que, puro e em condições normais de pressão e temperatura, tem poder calorífico de aproximadamente 9,9 kWh.m⁻³. A energia gerada pelo biogás pode ser aproveitada de várias formas, entre elas pode-se destacar o aproveitamento para aquecimento, refrigeração, iluminação, cozimento, geradores de energia elétrica, misturadores de ração, entre outras utilidades. Na Tabela 2 estão apresentadas as principais equivalências energéticas entre a quantidade de 1 m³ de biogás comparado a outros combustíveis.

Tabela 2 – Comparação entre 1 m³ de biogás e outros combustíveis

Combustível	Quantidade equivalente
Gasolina	0,613 L
Querosene	0,579 L
Óleo diesel	0,553 L
Gás liquefeito (GLP)	0,454 kg
Etanol	0,790 L
Lenha	1,538 kg
Energia elétrica	1,428 kwh
Álcool hidratado	0,790

Fonte: Barrera (1993)

O processo de digestão anaeróbia tem como maior interesse a produção do biogás, no qual o desempenho desse processo é medido pela quantidade de biogás gerada. Uma das relações realizadas para medir a quantidade de gás se refere à entrada de massa, sólidos voláteis (SV) ou demanda química de oxigênio (DQO), por exemplo, o volume de CH₄ produzido por unidade de DQO, a 35°C, é equivalente a 0,35L (HORNUNG, 2014).

Um metro cúbico de biogás gerado em um biodigestor operando adequadamente pode ser obtido pela quantidade de resíduos comuns gerados em propriedades rurais, de acordo com a Tabela 3. Assim a produção de 1m³ de biogás requer 25 kg de dejetos bovinos. Para um bovino que produz cerca de 10 kg de dejetos/dia, são necessários cerca de 3 animais para a produção de 30 kg/diários de dejetos, com conseqüente produção aproximada de 1m³ de biogás/dia.

O biogás apresenta características distintas comparadas às de outras formas de energia, uma vez que se trata de um combustível relativamente limpo. Além de

apresentar tecnologias de processo de baixa sofisticação, a produção do biogás representa um avanço importante no sentido da solução do problema da disponibilidade de combustível no meio rural e, por conseguinte, interessa a toda a população nele residente gerando renda e economia para o meio ambiente (DUARTE NETO et al. 2010).

Como exemplo do interesse nesse produto, outros países pertencentes à União Europeia, em especial Alemanha e Itália, a produção de biogás tem se desenvolvido muito nas últimas décadas, principalmente nas regiões agrícolas, com a finalidade de produzir energia por meio da digestão anaeróbia e, dessa forma, realizando um desenvolvimento sustentável através do biogás e aproveitamento dos resíduos (ORZI et al., 2015).

Tabela 3 – Capacidade de geração de 1 m³ de biogás

Material	Quantidade, kg
Esterco fresco bovino	25
Esterco suíno	12
Esterco seco de galinha	5
Resíduos vegetais	25
Lixo orgânico	20

Fonte: Barrera (1993)

3.5 Tipos de biodigestores

Um biodigestor é o equipamento utilizado para a realização da digestão anaeróbia e captura do biogás, o qual possui compartimentos isolados e lacrados para que não ocorra a presença de oxigênio no meio. Historicamente, os primeiros modelos de biodigestores utilizados mais conhecidos foram os modelos Indiano e Chinês, os quais foram amplamente difundidos (ABBASI et al., 2012)

Segundo Hachmann et al. (2014) a estrutura de um biodigestor consiste em uma câmara de digestão e um gasômetro. A câmara de digestão é onde ocorre a degradação da matéria orgânica, possuindo regiões divisórias, que favorecem a hidrodinâmica e eficiência do processo. O gasômetro encontra-se sobre a câmara de digestão e é onde o biogás fica retido para seu posterior uso.

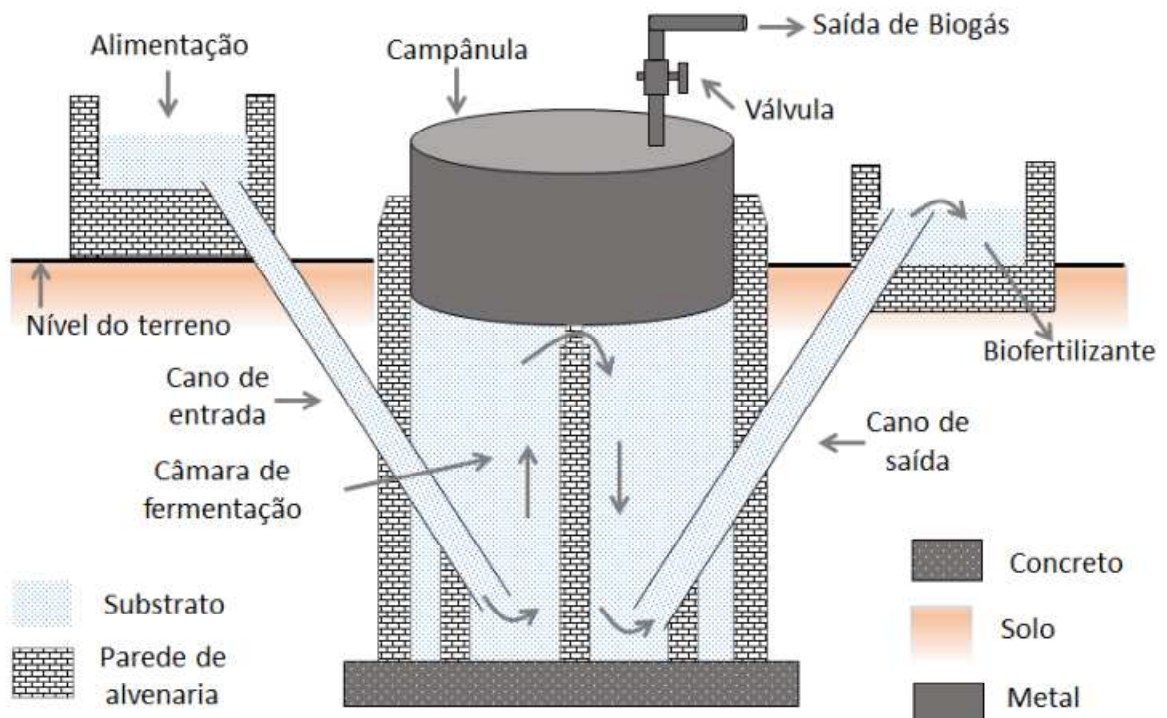
Os biodigestores podem ser classificados sob diversos aspectos, tais como: teor de sólidos, forma de alimentação, número de estágios e pela quantidade de resíduo orgânico tratado. Além disso, pode ser classificado também quanto à forma

de abastecimento, podendo ser em batelada ou contínuo. Nos modelos contínuos os biodigestores são construídos para que sejam abastecidos diariamente, fazendo com que tenha a entrada de substrato orgânico para ser processado e a saída do material já tratado.

O modelo Indiano é formado por uma campânula flutuante (gasômetro), uma parede central, a qual é responsável pela divisão do biodigestor em duas câmaras, fazendo com que todo o material percorra, de forma homogênea, todo o biodigestor. A Figura 3 ilustra todas as partes do modelo Indiano.

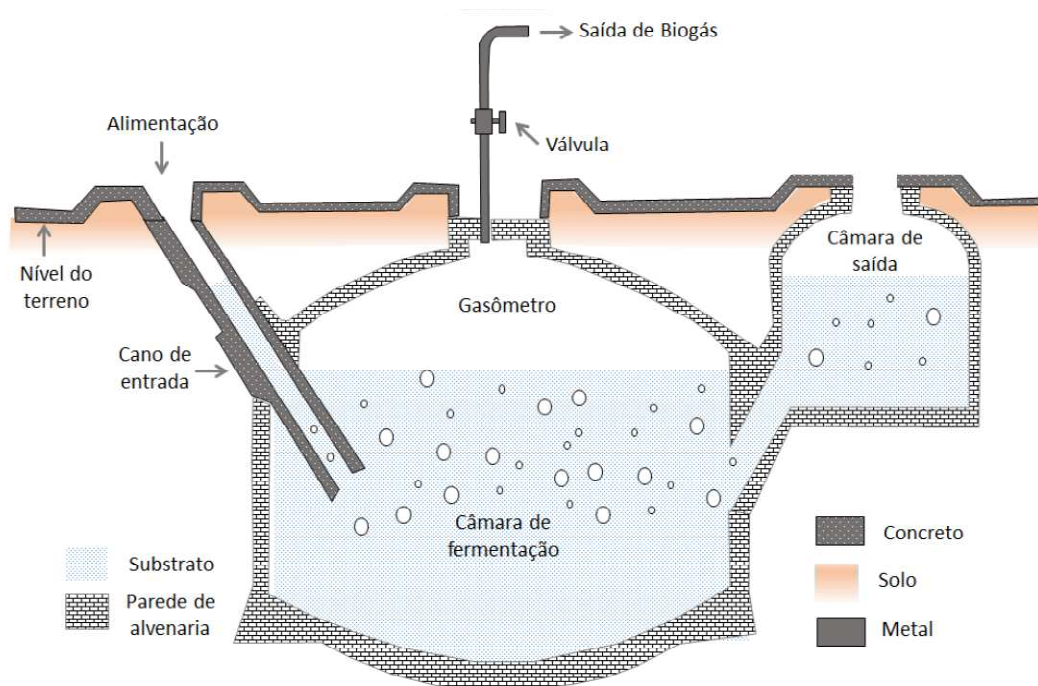
O modelo chinês é diferente do Indiano por não possuir uma campânula móvel, sendo construído praticamente todo em alvenaria, possuindo uma única câmara cilíndrica. Como ilustra a Figura 4, este biodigestor funciona com base no princípio de prensa hidráulica, de modo que aumentos de pressão em seu interior, devido ao acúmulo de biogás, resultarão em deslocamentos do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre descompressão.

Figura 3 – Representação do modelo de biodigestor Indiano.



Adaptado de ABBASSI et al., (2012)

Figura 4 – Representação do modelo de biodigestor Chinês.



Adaptado de ABBASSI et al., (2012)

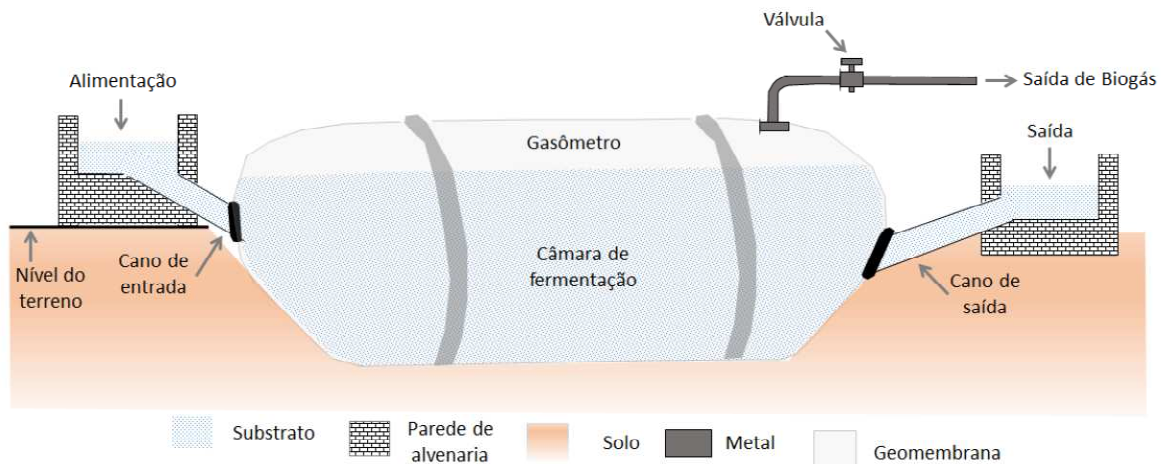
Um tipo de biodigestor adaptado a partir dos modelos clássicos Indiano e Chinês, e de baixo custo, é o modelo marinha, como apresenta a Figura 5, consistindo o mesmo em uma estrutura bem mais simples, onde a caixa de entrada é construída de alvenaria e recoberto por geomembranas, ou outro tipo de material que suporte a formação da câmara de digestão.

Outro modelo adaptado, que vem sendo utilizado no Brasil, é a versão ampliada do biodigestor marinha, conhecido também por biodigestor canadense (BARRERA, 2003). Como mostra a Figura 6, é um equipamento do tipo horizontal, com largura maior que a profundidade, o que permite maior exposição solar que os demais biodigestores apresentados. A cúpula pode ser de geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) ou plástico maleável de PVC. O biogás tem sua saída no topo do gasômetro.

O trabalho de Calza et al. (2015) avaliou os custos envolvidos na construção de modelos de biodigestores (indiano, chinês e canadense), com o levantamento dos custos de energia a partir do biogás produzido por dejetos de caprinos, bovinos e suínos. Por sua vez, segundo os autores, o biodigestor canadense demonstrou ter o menor preço de construção e operação, sendo a opção mais viável para a produção de energia a partir do biogás. A produção de energia foi semelhante para

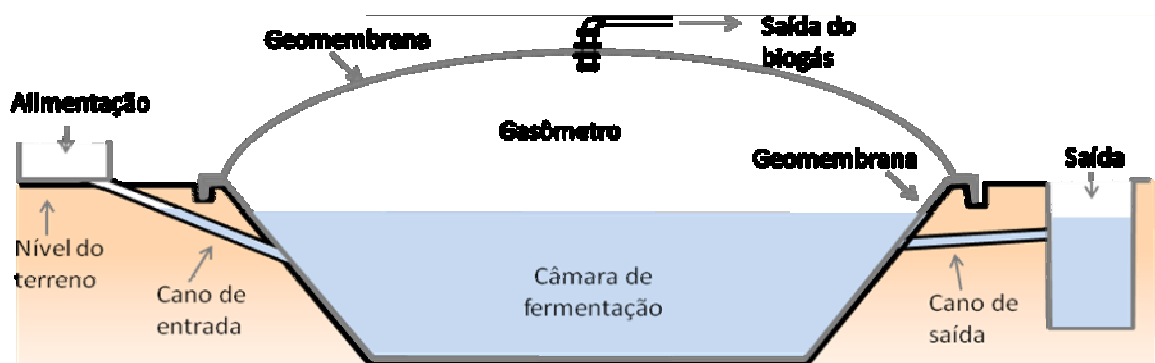
os três tipos de biodigestores, sendo utilizadas as três fontes de biomassas referidas.

Figura 5 – Representação do modelo de biodigestor tipo marinha.



Fonte: própria (2016)

Figura 6 – Representação simplificada de um biodigestor do tipo Canadense.



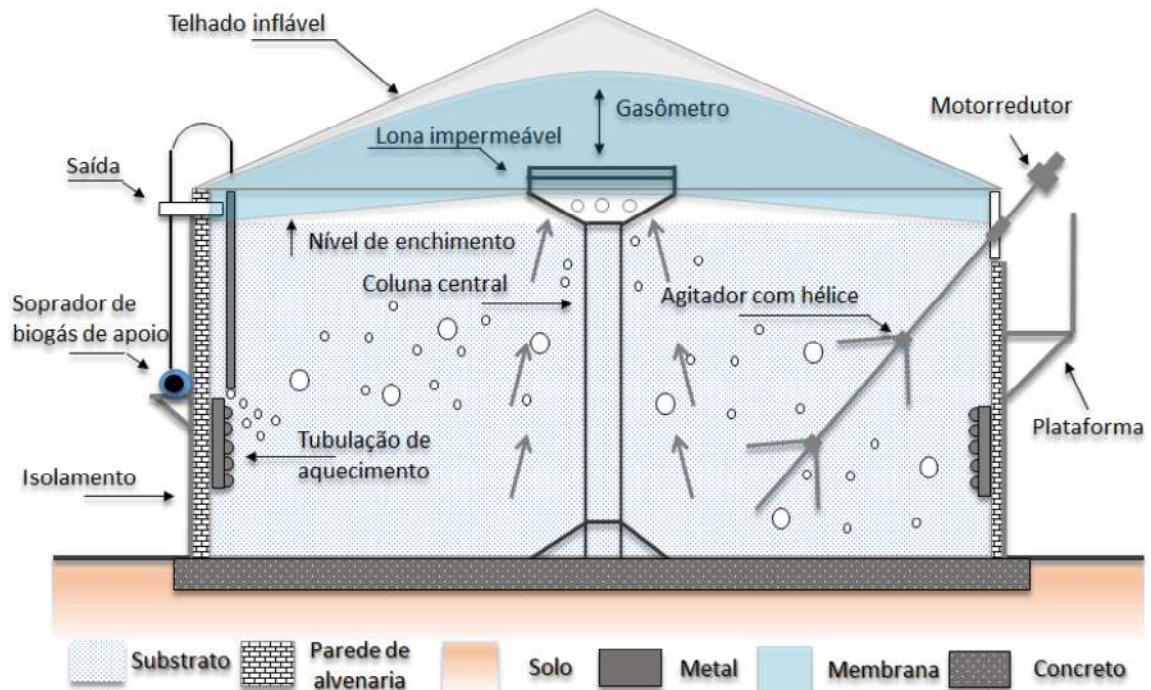
Fonte: Nogueira et al., (2016)

Versões industriais dos biodigestores vêm sendo utilizadas, buscando, com a digestão anaeróbia, uma alternativa para a geração de energia em média e larga escalas. Além da versão do biodigestor canadense, que vem sendo utilizada no Brasil, na Europa vêm sendo desenvolvidas tecnologias que aperfeiçoam o processo de digestão anaeróbia a partir de resíduos agrícolas.

Um tipo de biodigestor industrial utilizado em plantas de bioenergia é o biorreator Alemão (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008), como ilustra a Figura 7.

Segundo Deublain e Steinhauser (2008), esse tipo de biodigestor é um equipamento com capacidade de tratamento de altas quantidades, acima de 300 m³ de substrato. O nível de automação permite um maior aproveitamento da conversão da biomassa em biogás.

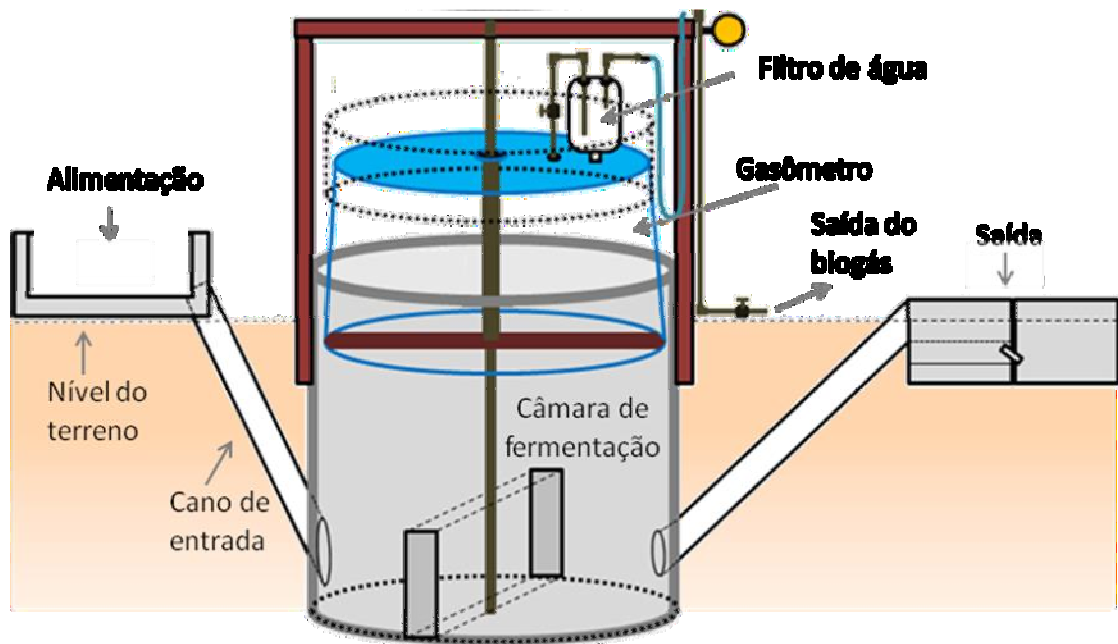
Figura 7 – Representação simplificada de um biodigestor do tipo Alemão.



Fonte: (SCHULZ e EDER, 2006)

Outro tipo de biodigestor que vem sendo utilizado em propriedades rurais de pequeno e médio portes é o biodigestor sertanejo. Mattos e Júnior (2011) propõem a versão desse tipo de biodigestor para o semiárido, devido à facilidade de sua construção e acesso dos componentes construtivos. Como mostra a Figura 8, o equipamento é constituído por estrutura de alvenaria na câmara de fermentação. Para constituir o gasômetro vem sendo utilizada caixa de fibra de vidro ou outro material polimérico. Apesar de simples, esse tipo de biodigestor apresenta os mesmos componentes principais dos demais biodigestores. As principais motivações de utilização em pequenas propriedades são o baixo custo e a facilidade de manutenção.

Figura 8 – Representação simplificada de um biodigestor sertanejo.



Fonte: própria (2016)

Nas seções seguintes serão tratados os aspectos de dimensionamento do biodigestor sertanejo, assim como os equivalentes energéticos para o biogás.

3.6 Dimensionamento de biodigestor tipo sertanejo

O dimensionamento de um biodigestor do tipo sertanejo tem como ponto de partida a quantidade de biomassa disponível por dia. A quantidade diária de biomassa estimada, considerando a quantidade média diária por animal, pode ser determinada pela Equação 1.

$$m_{\text{biomassa dia}} = \sum n_{i,\text{animal}} f_{i,\text{biomassa animal dia}} \quad (1)$$

onde m , é a quantidade de biomassa por dia (kg/dia); n_i , quantidade do tipo de animal i , e f , o coeficiente de produção de biomassa (esterco) produzida por animal (kg/animal).

Cada tipo de animal produz um esterco com potencial de produção de biogás diferente, devido ao tamanho e qualidade da alimentação (COLATTO e LANGER, 2011). A produção de biogás estimada é definida em função do valor médio de produção de biogás para cada tipo de produto animal (Equação 2).

$$V_{\text{biogás/dia}} = \sum n_{i,\text{animal}} g_i, \text{m}^3/\text{animal/dia}, \quad (2)$$

onde V, é a quantidade de biogás produzido por dia (m³/dia); n_i, quantidade do tipo de animal i, e g, o coeficiente de produção de biogás produzida por animal/dia (m³/animal/dia).

A carga diária do biodigestor é um parâmetro importante para definição do volume do biodigestor. Por sua vez, a biomassa deve ser adicionada a uma quantidade de água a qual permitirá uma melhor movimentação convectiva dentro do biodigestor, como também o desenvolvimento dos microrganismos. O cálculo da carga diária pode ser definido pela Equação 3.

$$Q_{\text{biomassa/dia}} = \frac{m_{\text{biomassa/dia}}}{\rho_{\text{Biomassa}}} + \frac{m_{\text{água/dia}}}{\rho_{\text{água}}}, \quad (3)$$

onde Q, é a quantidade de biomassa adicionada por dia no biodigestor (m³/dia); m_j, massa diária (kg/dia) de biomassa e água, e ρ_j, massa específica (kg/m³) para biomassa e água.

O tempo de residência é o tempo necessário para que a matéria orgânica possa ser convertida completamente em adubo, liberando o biogás produzido. O volume requerido para o biodigestor é uma função da carga de biomassa diária e o tempo de residência, dado pela Equação 4.

$$V_{\text{Biodigestor}} = Q_{\text{Substrato/dia}} \tau_{\text{residência}} \quad (4)$$

onde V, volume requerido para o biodigestor (m³); Q, carga de biomassa diária (m³/dia) e τ tempo de residência (dia).

Quanto à geometria do biodigestor do tipo sertanejo, o formato cilíndrico de alvenaria facilita sua construção. Uma vez definido o volume requerido, definindo um diâmetro, a altura pode ser obtida de acordo com a Equação 5.

$$h_{Biodigestor} = 4 \frac{V_{Biodigestor}}{\pi(D_{Biodigestor})^2} \quad (5)$$

onde h , altura do biodigestor (m); V , volume do biodigestor (m^3) e D , diâmetro do biodigestor (m).

As caixas de entrada e saída do biodigestor fazem parte do sistema de alimentação e retirada do biodigestor. A Equação 6 expressa a altura da caixa de entrada considerando uma geometria cilíndrica, enquanto a Equação 7, expressa a altura da caixa de saída de base retangular. A partir dessas equações têm-se a geometria para o biodigestor, em função da carga diária.

$$h_{1,caixa\ de\ entrada} = 4 \frac{Q_{biomassa}}{\pi(D_{caixa\ de\ entrada})^2} \quad (6)$$

$$h_{2,caixa\ de\ saída} = \frac{Q_{biomassa}}{l_1 C_1} \quad (7)$$

onde h_i , altura da caixa de entrada/saída do biodigestor (m); Q , volume de biomassa diária (m^3) e D , diâmetro da caixa de entrada (m), comprimento (m) e l , largura da caixa de saída do biodigestor (m).

Definida a capacidade de produção de biogás do biodigestor, uma estimativa da energia equivalente pode ser realizada. Do volume diário de biogás, a quantidade equivalente em eletricidade pode ser calculada de acordo com a Equação 8. A massa e o número de botijões de gás liquefeito de petróleo (GLP) podem ser estimados pelas Equações 9 e 10, respectivamente. O mesmo procedimento pode ser realizado quanto à equivalência de biogás em gasolina, Equação 11.

$$E_{Elétrica} = V_{biogás\ dia} f_{1kWh/m^3} \quad (8)$$

$$m_{GLP/dia} = V_{biogás\ dia} f_{2kgGLP/m^3} \quad (9)$$

$$n_{botijõesGLP/mês} = m_{GLP/dia} f_{3botijãd/kgGLP} 30 \text{ dias/mês} \quad (10)$$

$$V_{Gasolina\ dia} = V_{biogás\ dia} f_{4gasolina\ m^3} \quad (11)$$

onde E, energia elétrica equivalente (kWh); V, volume diário de biogás; f, fator de conversão; n, número de botijões, e V, volume de gasolina (L).

Dessa forma, as equações de projeto permitem o dimensionamento do biodigestor sertanejo partindo da produção de biogás a partir da biomassa escolhida. Além disso, a operação e manutenção do mesmo, de baixa complexidade, são as principais características que motivam a utilização dessa tecnologia (MATTOS E JÚNIOR, 2011).

3.7 Estudos socioeconômicos e ambientais de diferentes tipos de biodigestores

Diversos estudos têm sido realizados no intuito de verificação da viabilidade econômica e contribuição social e ambiental com a utilização de biodigestores em propriedades rurais (GASPAR, 2003; BONTURI e VAN DIJK, 2012; BARBOSA e LANGER, 2011).

Bonturi e van Dijk (2012) avaliaram a construção de um biodigestor em um assentamento rural no município de Itaberá, São Paulo, sendo os produtos e subprodutos aproveitados pelo pequeno produtor, com um possível aumento de renda da propriedade, com um custo mínimo já que os insumos para a produção do biogás são produzidos pela propriedade. Os autores apresentam resultados com a implementação de um biodigestor Indiano, com capacidade de produção de 8,93 m³ de biogás/dia. Tal capacidade possibilitou a utilização nos gastos diários com cozinha, iluminação, geladeira e banho quente.

A sustentabilidade ambiental do uso de biodigestores em propriedades rurais tem sido abordada por Barbosa e Langer (2011). Os autores enfatizam que o aproveitamento de dejetos de animais apresenta benefícios para o meio ambiente e para a saúde dos moradores locais, como também ganhos ambientais mediante a redução de gases de efeito estufa. Os autores destacam os ganhos socioeconômicos com a produção de energia e biofertilizantes, assim como a possibilidade da venda de créditos de carbono.

Gaspar (2003) realizou estudos sobre utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais na região de Toledo-PR. O biodigestor

estudado pela autora foi o do tipo chinês, com capacidade de 4,2 m³ de biogás por dia, a partir da fonte de biomassa de esterco de suínos. As principais contribuições apontadas pelo estudo foram: diminuição da poluição por dejetos suínos, utilização do biogás e fertilizante na propriedade.

Apesar da aplicação da tecnologia de biodigestão estar atualmente bem desenvolvida, a utilização da mesma é um desafio cultural quando apresentado ao morador da zona rural. Mas a integração dessa tecnologia para a melhoria das práticas de produção agrícola vem possibilitando realizar a transferência de tecnologia para o pequeno e médio produtor rural.

4 METODOLOGIA

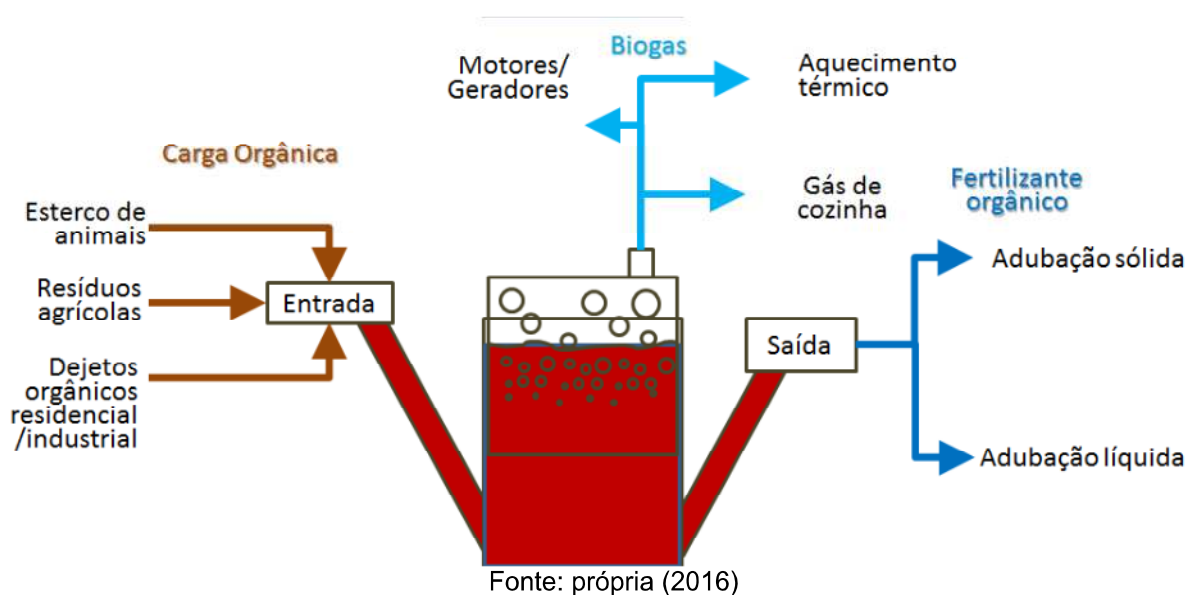
As análises necessárias para o acompanhamento do processo foram realizadas no Laboratório de Saneamento da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil e no Laboratório de Química de Biomassa (LQB) da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.

As análises foram realizadas de acordo com os métodos padrões descritos no Standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2012).

O sistema de biodigestão anaeróbia deste estudo (Figura 9) encontra-se instalado e operando no sítio Mocó situado a oeste do município de Monteiro-PB, com as seguintes coordenadas (latitude 7°50'14,6" e longitude 37°10'59,5"). O mesmo faz parte de uma unidade experimental desenvolvida pelo Programa de Estudos e Ações para o Semiárido – PEASA, da Universidade Federal de Campina Grande, em parceria com os Departamentos de Engenharia Química e Engenharia Civil.

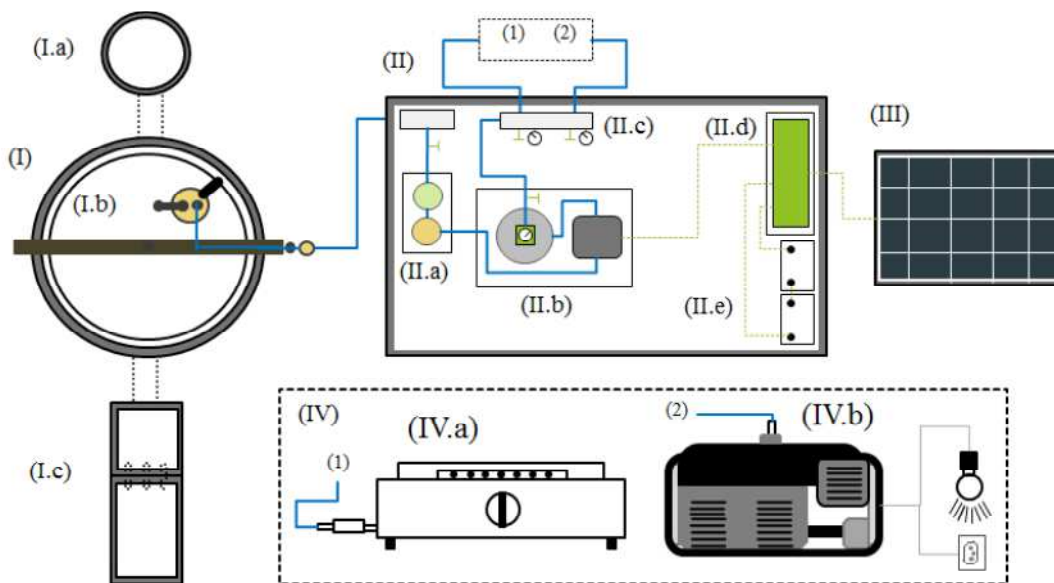
O biodigestor sertanejo, projetado com capacidade de 16 m³ e 5m³ de gasômetro, tem previsão de produção de energia, pela produção de biogás, equivalente a sete botijões por mês. O mesmo serve de laboratório experimental para a realização demonstrativa do processo de biodigestão, como também de propagação da tecnologia para os diversos interessados no sistema.

Figura 9 – Diagrama simplificado dos produtos de um biodigestor do tipo sertanejo.



A proposta do sistema, diz respeito a uma unidade de produção e distribuição de biogás de acordo com o fluxograma global mostrado na Figura 10. A mesma tem como subunidades o biodigestor (I), a unidade de purificação e distribuição (II), unidade fotovoltaica (II-III) e os equipamentos de cogeração de energia térmica e elétrica (IV). A intenção dessa unidade é desenvolver um sistema sustentável buscando integrar as necessidades da propriedade rural, melhorando seus efeitos ambientais e socioeconômicos.

Figura 10 – Proposta global da unidade de geração e distribuição de biogás.

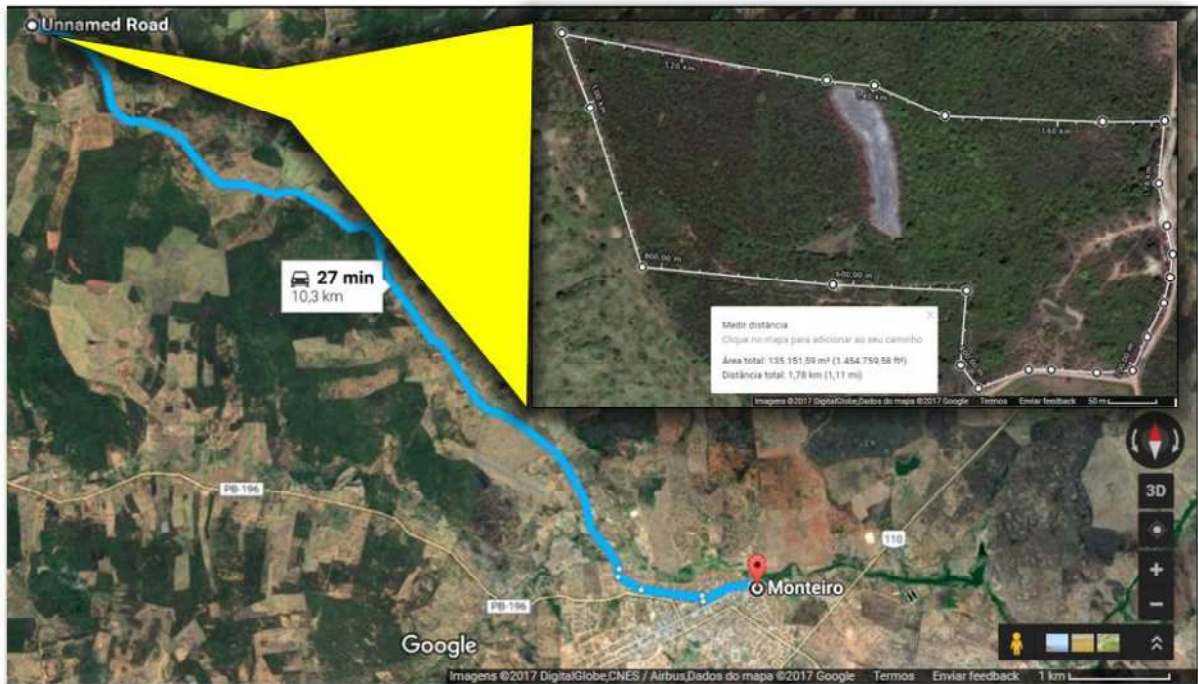


Fonte: SILVA et al. (2016)

4.1 Localização da propriedade e instalação do biodigestor

No sistema de biodigestão proposto pelo PEASA/UFCG, a área da propriedade corresponde a uma extensão aproximada de 13,5 hectares, como pode ser observado na Figura 11. Na mesma há uma barragem para armazenamento de água de chuva que serve para atender as atividades existentes na propriedade.

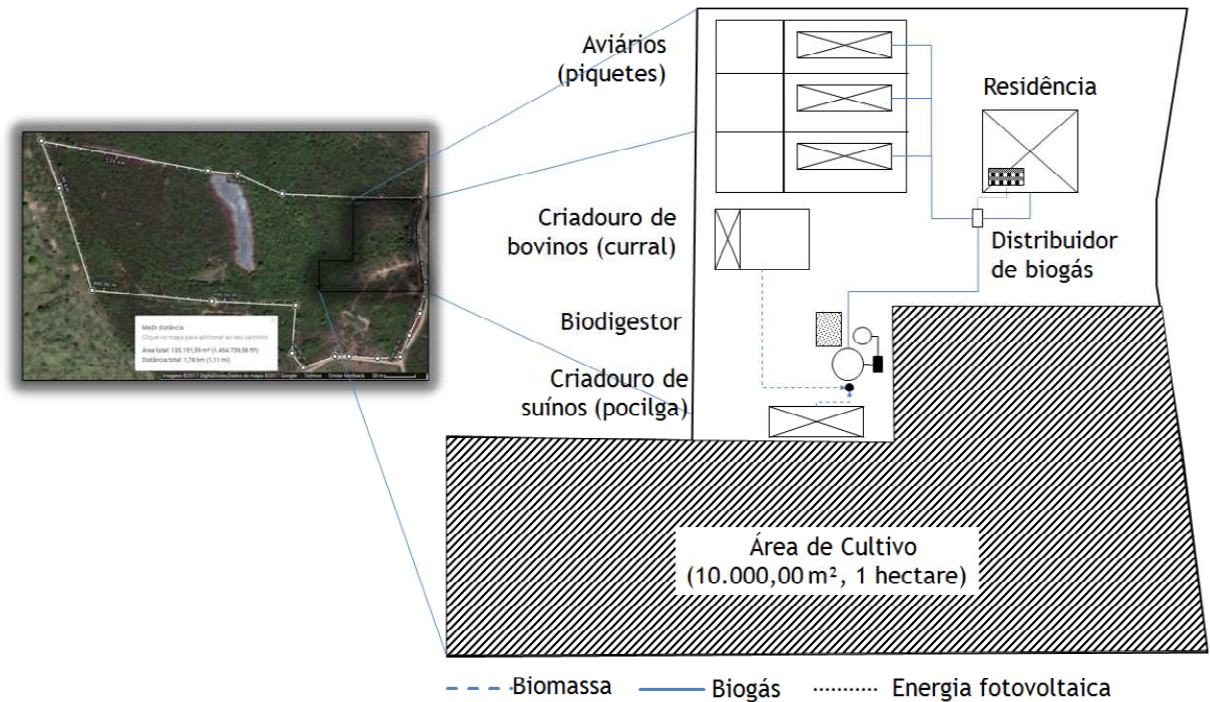
Figura 11 – Localização e extensão da propriedade de instalação do sistema de biodigestão com certa de 135.000,00 m² (13,5 hectares)



Fonte: Googlemaps, (2017)

As instalações da propriedade correspondem à área residencial, aviários, criadouros bovinos e suínos, biodigestor e área de cultivo, como mostra a Figura 12. A proposta do sistema de biodigestão é integrar as atividades realizadas na propriedade rural, onde o biodigestor recebe resíduos rurais e os converte em biogás e biofertilizante.

Figura 12 – Localização da área de cultivo e das instalações da propriedade



Fonte: própria (2017)

Como pode ser observado no diagrama da Figura 12, o biodigestor recebe resíduos dos dois criadouros de suínos e bovinos. Seguindo após a biodigestão o biogás é direcionado para a residência e para os aviários. A distribuição do biogás é realizada por um sistema de compressão acionado por energia solar, adequando a pressão do sistema para melhor queima nas campanulas dos aviários e no fogão de cozinha. O biofertilizante resultante da biodigestão pode ser separado em duas partes, sendo elas líquida e sólida. A parte sólida pode ser armazenada em uma área apropriada de alvenaria, enquanto a parte líquida em um tanque de 3 mil litros. Ambos podem ser utilizados nas atividades de cultivo, com correção do solo ou complemento de irrigação das plantas.

4.2 Levantamento estrutural da unidade

O levantamento da geometria estrutural do biodigestor está representado na Figura 14, sendo o diâmetro do biodigestor de 2,60 m e o da caixa de fibra de vidro de 5000L (gasômetro) de 2,40 m. Essa diferença de diâmetros é importante para

permitir a folga necessária para a movimentação vertical do gasômetro instalado. Para a caixa de entrada do substrato, foram obtidas as seguintes dimensões: altura de 0,5 m, diâmetro de 1,14 m, caixa de saída, altura de 0,5 m, comprimento de 1,5 m e largura de 0,8 m.

Com base nas medições do diâmetro de 2,40 m e da profundidade de 2,7 m, o volume útil do tanque de fermentação foi de 12,21 m³. Esse volume é, portanto, suficiente para a biodigestão da biomassa oriunda dos resíduos gerados nos currais de confinamento de 20 suínos e 10 bovinos da propriedade, considerando a relação de biomassa e água de 1:1, o tempo de residência de 27 dias e o volume de substrato afluente de 450 L por dia.

A partir dos dados levantados da geometria da unidade e da biomassa disponível a produção de biogás estimada foi de 7,05 m³/dia, de acordo com as Equações de 1 a 11, implementadas em planilha Excel®, disponível no anexo I. Por sua vez, a capacidade equivalente em número de botijões foi de 7,3 botijões por mês, ou de 10 kWh em energia elétrica.

Na Tabela 4 são apresentados valores de energia equivalente para a produção de biogás estimada. Tais resultados e notação permitem informar o produtor rural, de forma compreensível e contextualizada.

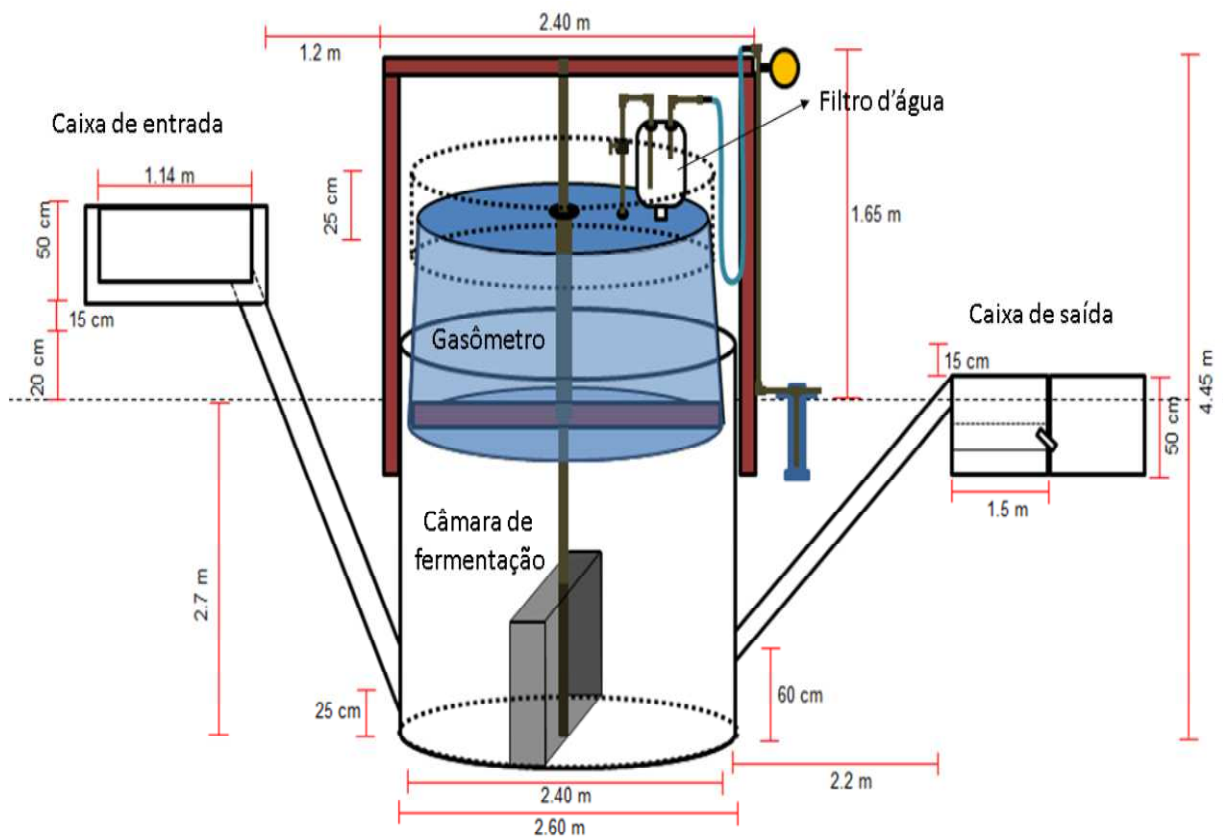
Tabela 4 – Valores de energia equivalente correspondente à produção de 7,05 m³ dia de biogás.

Tipo de energia equivalente	Equivalência	Quantidade	Unidade
Eletricidade	(1 m ³ <=> 1,43 kWh)	10,08	kWh/dia
GLP	(1m ³ <=> 0,45kg)	3,17	kg/dia
Botijões/mês	(1 bot. <=> 13 kg)	7,3	Botijões/mês
Gasolina	(1m ³ <=> 0,61L)	4,30	L/dia

Fonte: própria (2016)

A Figura 13 mostra o biodigestor instalado, a geometria do biodigestor sertanejo instalado na comunidade rural, sítio mocó, no município de Monteiro – PB.

Figura 13 – Geometria do biodigestor sertanejo instalado na comunidade rural, sítio mocó, no município de Monteiro – PB



Fonte:própria (2016)

A Figura 14 mostra o biodigestor instalado, sendo a Figura 14.a logo após a instalação, e a Figura 14.b, com o sistema em pleno funcionamento.

Figura 14 – Vista do topo do biodigestor sertanejo (a) instalado e em (b) operação na unidade rural do município de Monteiro – PB



(a)



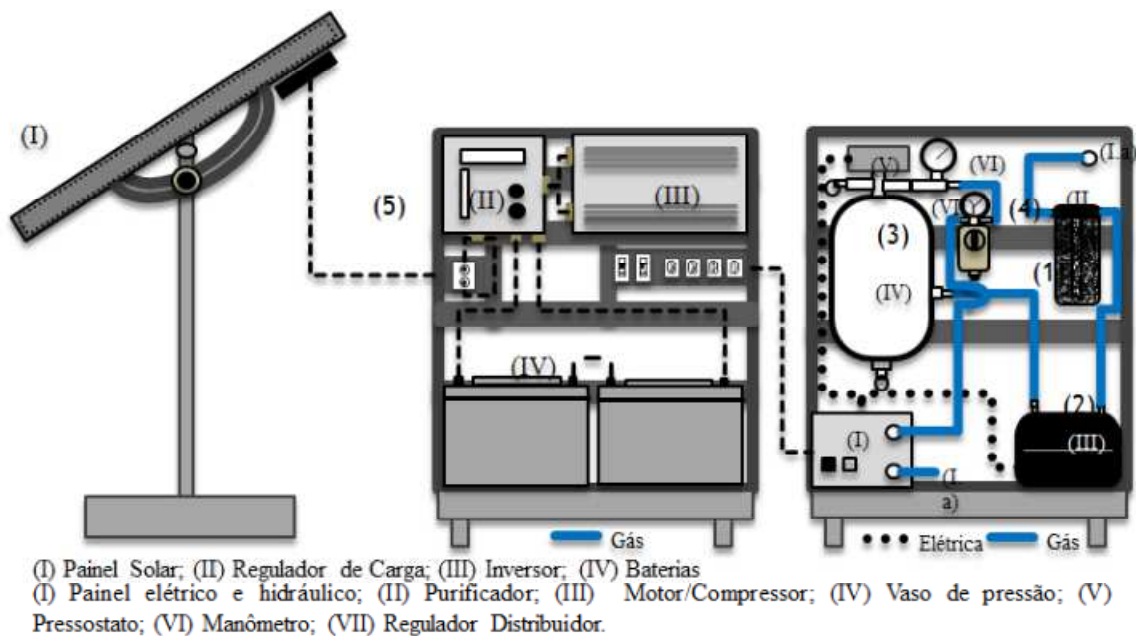
(b)*

Legenda: * o filtro primário de água no topo do gasômetro foi deslocado para o lado do biodigestor
Fonte: própria (2017)

Na Figura 15 está apresentado o diagrama representativo da unidade de purificação, compressão e distribuição de biogás instalada, sendo o gás, inicialmente, purificado em (II). Após a purificação, o sistema de pressurização do biogás está ajustado para a pressão no sistema, em torno de 40 a 120 psi. O

sistema contém um compressor de baixa potência (III) de 1/4 cavalo vapor (cv), ou 184 watts, aproximadamente, com capacidade de compressão de até 300 psi, que possibilita a distribuição para a residência, distante do biodigestor. A purificação do biogás, antes de ser distribuído para os equipamentos de compressão, consiste na remoção de gás sulfídrico (H_2S), permitindo uma maior durabilidade dos equipamentos que utilizam o biogás evitando a corrosão dos metais (MAINIER et al., 2007). Nesse sistema tem sido utilizada palha de aço para remoção do gás sulfídrico.

Figura 15 – Unidade de purificação, compressão e distribuição do biogás.



Fonte: própria (2016)

No projeto original da unidade, buscando manter a natureza renovável da unidade de produção de biogás, um sistema fotovoltaico está previsto para atender à demanda de energia necessária ao compressor do sistema de compressão. O sistema fotovoltaico é constituído de duas placas solares, um regulador de carga, duas baterias estacionárias e um inversor de tensão (Figura 16). Sendo a potência do compressor 184 W, as placas solares utilizadas apresentam potência nominal de 300 watts. No entanto, o inversor tem uma potência de 300 W, para que possa compensar as perdas nas conversões. As baterias foram projetadas para durar até 36 h sem recarga.

Figura 16 – Sistema fotovoltaico para acionamento do Compressor.



Fonte: própria (2017)

O sistema fotovoltaico foi projetado para utilização e acionamento do compressor da unidade de purificação e armazenamento do biogás. Tal sistema permitirá realizar a distribuição do biogás para fogões e geradores, podendo também ser utilizado para distribuição de duas ou mais residências em localidades da zona rural.

A unidade de biodigestão, formada por três subsistemas, encontra-se em fase final de instalação, estando em operação o biodigestor e o sistema de compressão. Uma avaliação da eficiência da unidade foi realizada a partir dos aspectos dimensionais do projeto da unidade, os quais permitirão comparar a capacidade teórica com a de operação. Em seguida, a unidade foi monitorada no intuito de avaliar as principais contribuições ambientais e socioeconômicas para a propriedade rural. Dessa forma, além do detalhamento do sistema, foram levantadas informações sobre a propriedade rural, tais como tamanho, local, vegetação e clima. Tais informações serão necessárias para o melhor entendimento das contribuições da unidade experimental.

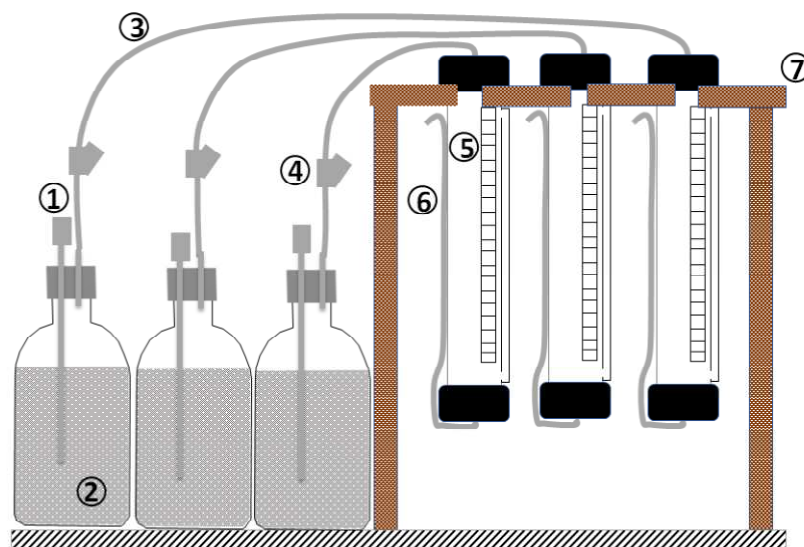
As contribuições ambientais foram avaliadas quanto aos aspectos: das condições sanitárias, da condição da vegetação, da condição do solo e da área produtiva. As contribuições socioeconômicas foram avaliadas quanto à quantidade de pessoas, a infraestrutura, a potência instalada, investimento e retorno econômico, a área produtiva, a agricultura e pecuária.

4.3 Monitoramento do experimento de bancada

Durante a realização dos experimentos de bancada, fez-se o acompanhamento do volume de biogás produzido nos 45 dias, em condições ambientes, com temperatura variando de 25 a 35 °C, utilizando o sistema piloto de biodigestão. Em seguida foi analisada a biomassa e o acompanhamento da produção de biogás para verificação da eficiência do sistema de biodigestão instalado na propriedade rural.

O sistema foi monitorado por um período de 3 meses, no intuito de quantificar a matéria prima e produtos gerados com esse sistema. Os experimentos foram realizados em triplicatas. Foram realizadas análises de caracterização da biomassa (sólidos voláteis e totais, pH, alcalinidade total, nitrogênio total, carbono total e DQO), e do biogás (estimativa do volume de metano), utilizando o sistema de biodigestão como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Sistema para biodigestão (biorreatores com coletores de biogás)



1 – Sonda para amostragem; 2 – Biodigestor; 3 – Tubulação de biogás; 4 – Conector de borracha para coleta de biogás; 5 – Reservatório de gás; 6 – Tubulação de líquido de vedação e descarga; 7 – Suporte de madeira;

Fonte: própria (2017)

As fontes de biomassa para o biodigestor foram provenientes dos criadouros de suínos e bovinos. Para adequar a melhor relação de alimentação do sistema em função da relação de carbono e nitrogênio foram realizadas análises de sólidos totais, sólidos voláteis, carbono total, alcalinidade total, nitrogênio total e DQO.

Para um melhor acompanhamento da biodigestão foram realizadas avaliações das fontes de esterco suíno e esterco bovino separadamente, assim como uma mistura de 50 % de cada uma das fontes. Como mostra a Figura 18, foram verificadas a condição inicial de fermentação e a composição de sólidos solúveis como parâmetro da biodigestão.

Figura 18 – Experimento das fontes de biomassa

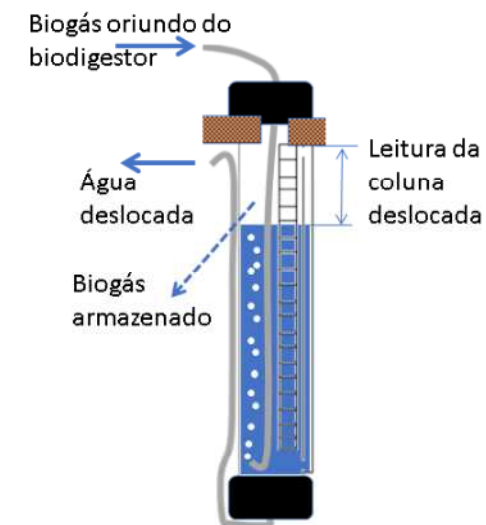


Fonte: própria (2017)

A composição do biogás foi analisada considerando uma medição aparente do metano (CH_4), no qual foi utilizado o teor quantificado pelo deslocamento de volume de líquido de uma solução alcalina (NaOH), com a absorção do CO_2 da mistura do biogás baseado na técnica clássica *Orsat* para análises de gases de combustão (KREISINGER e OVITZ, 1915). A análise do biogás foi realizada a partir de amostras coletadas da câmara de armazenamento do biogás, como mostra a

Figura 19. Devido a presença da coluna de água, e o borbulhamento do biogás, o mesmo pode ter sofrido uma pré-purificação, com a absorção do CO_2 , e dessa forma aumentando a concentração de CH_4 , por sua vez foi denominado de metano aparente.

Figura 19 – Sistema de armazenamento de biogás



Fonte: própria (2017)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação econômica

O custo principal da unidade de geração e distribuição do biogás está relacionado ao investimento inicial, uma vez que as tecnologias foram dimensionadas com materiais alternativos. Os custos de investimento e construção das unidades se encontram na Tabela 5 e foram obtidos considerando os componentes alternativos para cada sistema de forma individual. Por sua vez, os valores expressos dizem respeito aos custos dos equipamentos, sem considerar a mão de obra e o custo do projetista, sendo considerado o cenário no qual a construção foi realizada pelos proprietários beneficiados.

Tabela 5 – Valores de construção dos principais componentes da unidade rural de produção de biogás e suas respectivas capacidades.

Sistema da Unidade	Investimento e Construção (R\$)	Capacidade
Biodigestor	2.700,00	15,4m ³ +5m ³ gasômetro
Purificador	650,00	8 m ³ /dia
Sistema fotovoltaico	2.100,00	300 W
Pressurizador e distribuidor	800,00	20 L 150 psi, 184 W
Total	6.250,00	

Fonte: própria (2017)

Apesar de ser um investimento relativamente alto para comunidades rurais, o mesmo pode ser justificado quando uma avaliação do tempo e a taxa interna de retorno são realizadas. Na Tabela 6 encontram-se os valores referentes ao balanço econômico realizado. O baixo custo de manutenção e a não existência de custo operacional torna o sistema viável e sustentável economicamente.

Tabela 6 – Balanço econômico anual para construção e produção de 7,05 m³ de biogás/dia.

Parâmetros		Valores	Unidade
Investimento e construção	Capital de Investimento	6250,00	R\$
Filtro de palha de aço	Custo anual	135,00	R\$/ano
Manutenção	Custo anual	250,00	R\$/ano
Botijão de gás	Lucro Anual	5271,24	R\$/ano
Rendimento anual:	Lucros – Custos	4886,24	R\$
Taxa interna de retorno (TIR)	Renda/Capital de Invest.	78,18	%/ano
Tempo de retorno de investimento (TRI)	100/TIR	1,28	Anos

Fonte: própria (2017)

Deve ser observado que a tomada de decisão para avaliação do lucro anual foi baseada na situação em que o proprietário da unidade não compre mais o botijão GLP e que o restante do biogás não utilizado possa ser comercializado.

A partir da avaliação econômica apresentada será possível levantar o custo de produção do metro cúbico de biogás, como também a eficiência do sistema a partir do monitoramento do sistema.

5.2 Contribuição ambiental

Um dos problemas ambientais identificados na propriedade diz respeito aos resíduos produzidos pelo criadouro de suínos (pocilga). O criadouro tem capacidade para confinar 30 suínos, nos estágios de crescimento e engorda. A quantidade de excremento estimada está na faixa de 2 a 3 kg por animal/dia. Assim a produção média de esterco é em torno de 75 kg/dia.

O descarte dos resíduos nas proximidades do criadouro de suínos provocava a liberação de cheiro desagradável, além de favorecer a proliferação de microrganismos, moscas, podendo até prejudicar as condições sanitárias da criação de suínos, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Unidade de criação de suínos.



Fonte: própria (2017)

A instalação do biodigestor resolveu o problema de acúmulo de resíduo nas proximidades do criadouro de suínos, a partir do direcionamento dos resíduos por tubulação até a entrada do biodigestor, como mostra a Figura 21(a) e a Figura 21(b). A caixa de entrada do biodigestor tem um volume nominal de 285 L, o permite receber os resíduos gerados no criadouro.

Uma função sanitária do biodigestor, Figura 21(c), é reduzir possíveis microrganismos patogênicos, servindo como barreira sanitária, impedindo a proliferação de possíveis doenças causadas por vetores transmissores como mosca, ratos, mosquitos etc., impulsionados pelo acúmulo de resíduos orgânicos no meio ambiente. Dessa forma, a saída do biodigestor, Figura 21(d) e (e), serão produzidos biofertilizantes com baixo potencial de patógenos, e com auto valor nutricional mineral e orgânico.

Figura 21 – Sistema de biodigestão.



Legenda: (a) tubulação de saída do criadouro, (b) alimentação do biodigestor, (c) biodigestor, (d) tanque de saída e acumulador de biofertilizante sólido e (e) tanque de saída e acumulador de biofertilizante líquido.

Fonte: própria (2017)

Os produtos líquidos e sólidos que saem do biodigestor podem ser utilizados no cultivo de plantas, podendo ser utilizados nas fazes do plantio, ou na reposição de nutrientes nas entressafras. O biofertilizante líquido pode ser armazenado em tanques, onde poderá também, ser utilizado para realimentar o biodigestor, enquanto o biofertilizante sólido pode ser armazenado em sacos, ou em áreas destinadas a conservação do material.

5.3 Caracterização da biomassa

Os resultados do percentual de sólidos totais e voláteis estão mostrados na Tabela 7. A amostra B (100%), correspondente à fonte de biomassa bovina apresentou um teor de sólidos totais voláteis maior que a fonte de biomassa suína S (100%), sendo tal resultado podendo estar associada a diferença na alimentação dos animais. Por sua vez, a combinação S(50%) B(50%) propiciou um aumento no teor de sólidos totais voláteis, o que pode beneficiar a produção de biogás, uma vez

que os sólidos voláteis dizem respeito à parte da biomassa que irá ser convertida em biogás.

Tabela 7 – Concentração de sólidos totais, fixos e voláteis

Amostra	Sólidos Totais (mgL⁻¹)	Sólidos Totais Fixos (mgL⁻¹)	Sólidos Totais Voláteis (mgL⁻¹)
B(100%) - Bovino	42.094,23	5.501,12	36.593,11
S(100%) - Suíno	43.096,81	11.738,05	31.358,76
S(50%)B(50%)	49.906,89	10.446,18	39.460,71

Fonte: própria (2017)

Os valores de ácidos graxos voláteis (AGV) e de alcalinidade total (AT), como mostra a Tabela 8, foram acima de 1200 mg CaCO₃/L, como esperado, o que não limita as atividades dos microrganismos da digestão anaeróbia. Assim como a temperatura, o pH é um fator importante para o processo anaeróbio, por influenciar a velocidade das reações bioquímicas, e a manutenção do pH entre 6 e 7, indicam a natureza tampão da biodigestão. Os ácidos graxos voláteis (AGV) dizem respeito a uma medida dos ácidos orgânicos de cadeia simples produzidos na etapa acidogênica e, que em seguida, através da etapa acetogênica, são transformados em ácido acético, H₂ e CO₂.

Tabela 8 – Alcalinidade e ácidos graxos voláteis das amostras

Amostra	At em CaCO₃/L	AGV	pH	AGV/AT
B(100%)	4.600,00	489,6	6,3	0,1063
S(100%)	6.606,67	714	6,2	0,1084
S(50%)B(50%)	4.933,33	724,2	6	0,1469

Fonte: própria (2017)

A capacidade tampão do sistema, pela presença de reguladores de pH, contribui para a estabilidade do processo anaeróbio. O parâmetro da relação AGV/AT em sistemas anaeróbios fornece indicação sobre o estado de equilíbrio dinâmico da biodigestão, sendo valores abaixo de 0,5 uma indicação dessa condição de equilíbrio (LEITE et al.,2004).

A alcalinidade é um importante parâmetro no monitoramento da biodigestão, que deve ter mantido o pH do sistema dentro da faixa requerida pela população metanogênica. A digestão de substratos complexos resulta na produção de ácidos orgânicos que precisam ser tamponados.

Além dos parâmetros apresentados, uma informação importante para o início da biodigestão é a razão carbono/nitrogênio (C/N). Se a razão C/N da biomassa é muito elevada, significa que há um déficit de nitrogênio, fundamental à fase fermentativa. Por sua vez, sendo a razão baixa, poderá ocorrer a degradação do substrato com a formação de amônia em quantidades elevadas, o que poderá ter um efeito tóxico, podendo inibir o desenvolvimento microbiano.

Na Tabela 9 mostram-se os valores resultantes das análises de carbono orgânico total e de nitrogênio total *kjeldahl*. O indicado para uma digestão eficiente é uma razão C/N entre 20 e 30. Por sua vez, a amostra B(100%) apresentou valor acima de 30, enquanto a amostra S(100%), um valor abaixo de 20. Um valor de C/N igual a 37,94, significa dizer que a biomassa apresenta 37,94 de C para 1 de N, ou seja, existe uma quantidade muito maior de carbono do que de nitrogênio. Por outro lado, um valor C/N de 12 significa que a quantidade de C é de 12 para 1 N. Comparando as amostras B (100%) e S (100%), a amostra B (100%) tem uma quantidade de nitrogênio menor do que a amostra S (100%).

Tabela 9 – Concentração de Carbono orgânico e Nitrogênio total

Amostra	COT (mg/L)	NTK (mg/L)	C/N
B(100%)	20.329,5	535,5	37,94
S(100%)	17.003,6	1.417,5	12,00
S(50%)B(50%)	21.922,6	1.015,0	21,60

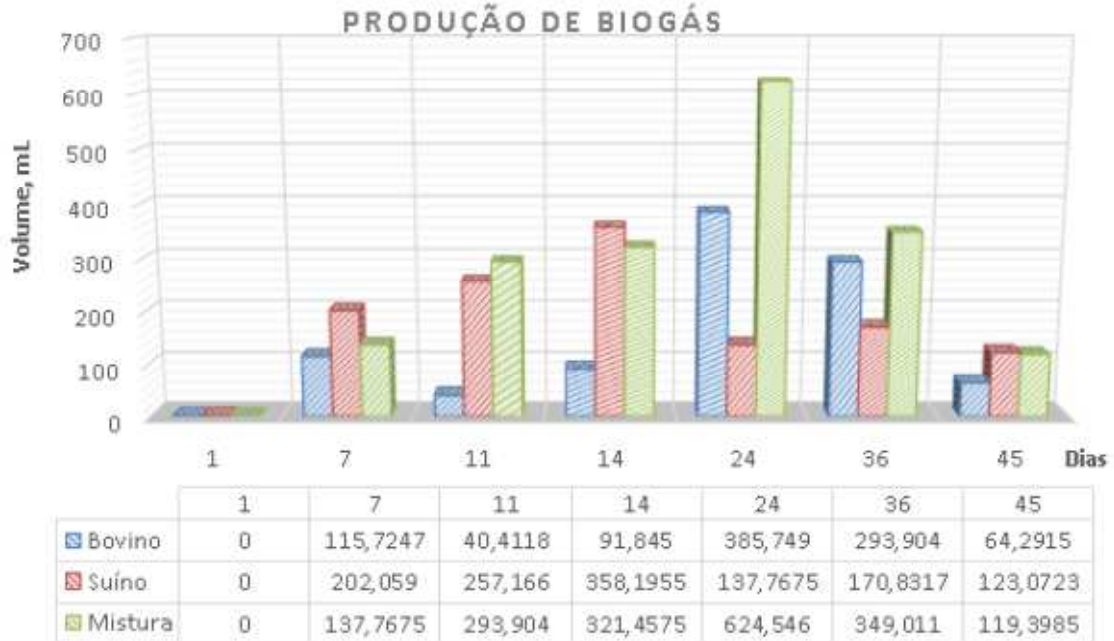
Fonte: própria (2017)

Ainda na Tabela 9, pode-se verificar que a amostra formada pela mistura de 50% de cada uma das fontes de biomassa gerou uma razão média de C/N, com valor de 21,60, dentro da faixa adequada para a biodigestão. Pode-se observar que o percentual da amostra B pode ser aumentado, devido à folga até a razão C/N de valor 30.

5.4 Monitoramento do experimento de bancada

Os resultados de produção de biogás das amostras de biomassa bovina (100 % - biomassa de esterco bovino), suíno (100 % - biomassa de esterco suíno) e mistura (esterco com 50 % - bovino e 50% - suíno), estão apresentados na Figura 22. Os valores correspondem aos respectivos intervalos nos dias observados.

Figura 22 – Acompanhamento da produção de biogás no experimento

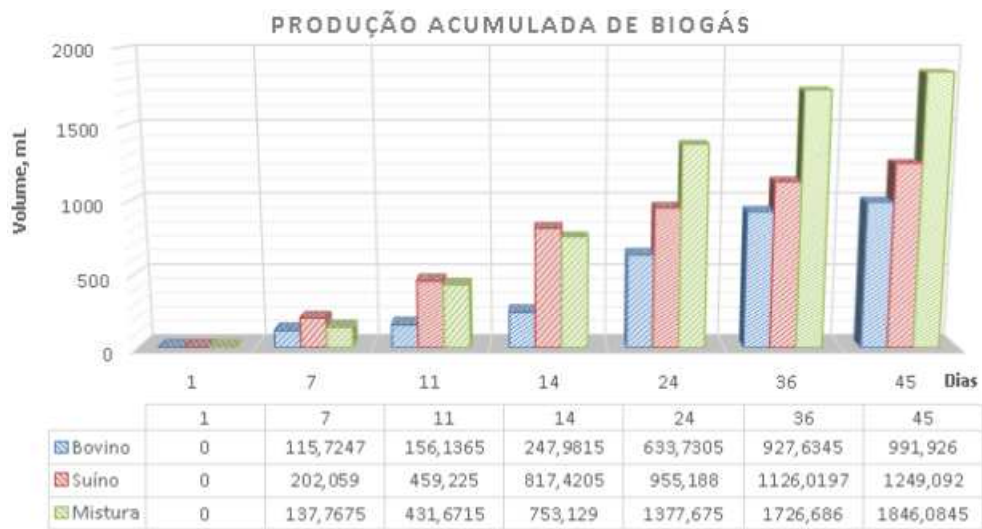


Fonte: própria (2017)

Ainda na Figura 22, pode-se observar que o maior pico de produção foi obtido no intervalo do dia 14 ao dia 24, onde a produção de biogás para a amostra mistura apresentou um valor de 624,5 mL de biogás produzido. O mesmo comportamento foi observado para a amostra de substrato bovino. No entanto, a amostra de substrato suíno apresenta comportamento inicial de alta produção, quando comparado às demais amostras. Tal comportamento pode ser explicado devido a amostra de biomassa de esterco suíno ter fonte de alimento diferenciada da alimentação bovina, uma vez que tem origem de fácil digestão, com baixa composição de celulose.

A produção acumulada de biogás foi avaliada, como apresentada na Figura 23, observando-se que a amostra mistura apresentou maior produção, alcançando um total de 1846,08 mL. Tal comportamento era esperado, uma vez que a amostra mistura é composta com frações de 50% de esterco suíno e de esterco bovino. No entanto, o valor da produção acumulada da amostra mistura foi menor do que a soma da produção acumulada das amostras Bovino e Suíno.

Figura 23 – Acompanhamento da produção acumulada de biogás

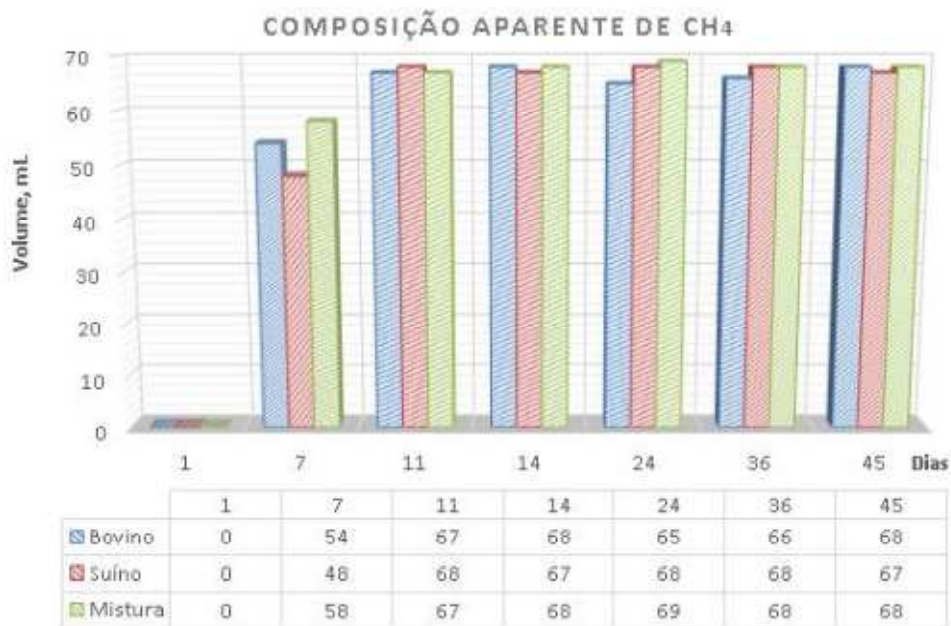


Fonte: própria (2017)

Os resultados do acompanhamento da composição aparente de metano estão apresentados na Figura 24. Nos primeiros 7 dias, observa-se uma composição aparente de metano levemente abaixo do valor médio para os demais dias. Esse comportamento pode ser explicado devido à presença de ar atmosférico inicial na câmara de fermentação, assim como outros possíveis gases gerados pela presença de oxigênio inicial.

Ainda com relação à Figura 24, observa-se que o teor de metano aparente esteve no valor médio de 68 % para as amostras. Lembrando que, tais valores foram obtidos por uma técnica de absorção de CO₂ e deslocamento de líquido, podendo tais valores serem ainda validados por técnica de cromatografia ou analítica com melhor precisão. No entanto, a técnica *Orsat* é uma das técnicas de análise de gases ainda utilizada para análise de biogás.

Figura 24 – Acompanhamento da produção acumulada de biogás



Fonte: própria (2017)

Um dos parâmetros utilizados para verificação da redução da matéria orgânica é a DQO (Demanda Química de Oxigênio). Os resultados obtidos neste estudo estão apresentados na Tabela 10. Observa-se que a maior redução na DQO foi na amostra composta de biomassa oriunda de metade de S (suíno) e de metade B (bovino), com valor médio de 68,71 %. Por sua vez, as amostras puras de S (suíno) e B(bovino), alcançaram valores no mesmo patamar, entre 35 e 40 %.

Tabela 10 – Valores de DQO resultantes da biodigestão em bancada

Amostra	DQO _{inicial} (mg/L)	DQO _{final} (mg/L)	DQO _{inicial} - DQO _{final}	ΔDQO (%)
B (100%) - Bovino	25.122,6	16.161,6	8.961,0	35,67
S (100%) - Suíno	45.465,7	27.399,0	18.066,7	39,74
S (50%) B (50%)	77.083,3	24.116,2	52.967,1	68,71

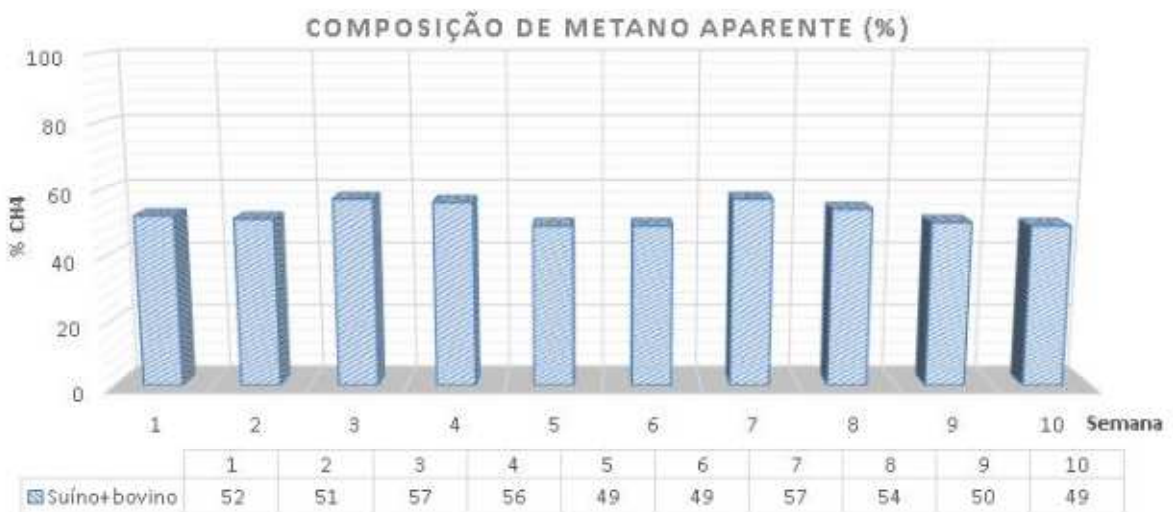
Fonte: própria (2017)

Ainda na Tabela 10, os valores de DQO resultantes estão de acordo com a produção de biogás obtido, indicando a maior redução da DQO com a maior produção de biogás obtido no experimento.

5.5 Monitoramento da unidade instalada no campo

A unidade encontra-se instalada e operando. A mesma vem sendo monitorada junto ao Programa de Estudos e Ações para o Semiárido – PEASA, que vem acompanhando o teor de metano aparente (determinado pela técnica *Orsat*) (KREISINGER e OVITZ, 1915). Para esse trabalho, o teor de metano foi quantificado no intervalo de 10 semanas. A Figura 25 apresenta os resultados obtidos com o monitoramento.

Figura 25 – Composição aparente de metano no intervalo de 10 semanas do biogás produzido no biodigestor instalado no sítio Mocó, Monteiro- PB



Fonte: própria (2017)

Com relação aos resultados do teor percentual de metano medido no período de 10 semanas, observa-se um valor médio de 52,4 %. Tal valor justifica-se pelo uso de fonte de biomassa em maior quantidade de resíduos suínos, uma vez que a maior fonte de biomassa para o substrato do biodigestor é oriunda do criadouro de suínos.

6 CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos pode-se concluir que:

- A partir do levantamento dos custos dos equipamentos do sistema, foi possível realizar uma avaliação teórica da viabilidade econômica representativa, expressa em um tempo de retorno econômico de menos de 2 anos;
- O projeto do sistema tem sua contribuição ambiental inicial expressa pela característica renovável em seu ciclo operacional, devido à utilização do sistema solar fotovoltaico na compressão do biogás;
- A principal contribuição ambiental do biodigestor na propriedade é a utilização de uma barreira sanitária no criadouro de suínos, onde os resíduos são tratados, reduzindo a presença de vetores e transmissores de doenças;
- A mistura dos resíduos provenientes dos criadouros de suínos e bovinos, a partir da proporção de 50 % de cada, permitiu adequar a fonte de biomassa para a razão de C/N para a faixa de 20-30, podendo o percentual da fonte bovina ser aumentado.

REFERÊNCIAS

- ABASSI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABASSI, S. A. Biogás Energy. New York: Spring, p187, 2012.
- AMARAL, R. G. Viabilidade Econômica da Implantação de um Sistema de Geração de Energia Elétrica a Partir de Biogás Gerado em um Abatedouro de Aves. Trabalho de Diplomação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2011.
- ANDERSON, K., SALLIS, P., UYANIK, S. Anaerobic treatment processes. In: MARA, D.; HORAN, N. (Ed.) The handbook of water and wastewater microbiology. Academic Press. p.391-396, 2003.
- APHA; AWWA; WPCF; Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation: Washington, 2012.
- BALMANT, W. Concepção, construção e operação de um biodigestor e modelagem matemática da biodigestão anaeróbia / Wellington Balmant – Curitiba – PR, UFPR, 2009.
- Barbosa, G., Langer, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. Unoesc e Ciência – ACSA, Joaçaba, v. 2, n. 1, p. 87-96, jan/jun. 2011.
- Barichello, R., Hoffmann, R., Silva, S. O. C. da, Filho, N. C., O uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região noroeste do Rio Grande do Sul. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá (PR), v. 8, n. 2, p. 333-35, 2015.
- Barrera, P. – Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para zona rural, 2003.
- BARRERA, Paulo. Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. São Paulo: Ícone, 1993.
- Bonturi, G. de L., Van Dijk, M., INSTALAÇÃO DE BIODIGESTORES EM PEQUENAS PROPRIEDADES RURAIS: ANÁLISE DE VANTAGENS SOCIOAMBIENTAIS. Revista Ciências do Ambiente. OnLine. 2012.
- CALZA, L. F, Lima, C. B, Nogueira, C. E. C., Siqueira, J. A. C., Santos, R. F. et al. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. Eng. Agríc., vol.35, n.6, pp.990-997. 2015.
- CHEN, Y., CHENG, J.J., CREAMER, K.S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. Bioresour. Technol. v.99, p.4044–4064, 2008.
- COLATTO, L.; LANGER, M. Biodigestor – resíduo sólido pecuário para produção de energia. Unoesc e Ciência – ACET, Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 119-128, jul/dez. 2011.
- DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, Biogas from waste and renewable resources: an introduction Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim, Germany (2008).

DUARTE NETO, E.D.D.; ALVARENGA, L.H.; COSTA, L.M.; Implementação e Avaliação de um Biodigestor de Produção Descontínua. Revista eletrônica E-xacta, vol. 3, n. 2, p. 36-43, 2010.

GASPAR, R. M. B. L., Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo - PR. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis 2003.

GUIMARÃES, J. R.; NOUR, E. A. A. Tratando nossos esgotos: processos que imitam anatureza. Química nova na escola, edição especial, p. 21, 2001.

HAANDEL, A.C.V.; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente. Campina Grande: Epgraf. 1994, p.208.

HACHMANN, T.L. et al. Resíduos de aves e suínos: Potencialidades. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 8, n. 5, p. 59-65, 2014.

HORNUNG, A. Transformation of Biomass; Theory to Practice. John Wiley, p.371, 2014.

KHANAL, S.K. Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and applications. Cingapura: Wiley-Blackwell, 2008.

KREISINGER, H.; OVITZ, F. K.; Sampling and Analyzing Flue Gas, Bulletin 97. Washington, 1915.

LEITE, V.D.; LOPES, W.S.; SOUSA, J.T. & PRASAD, S. Tratamento Anaeróbio de Resíduos Orgânicos com Baixa Concentração de Sólidos. Revista de Engenharia sanitária e ambiental, 2004.

LIANHUA L.; DONG, L.; YONGMING, S.; LONGLONG, M.; ZHENHONG, Y.; 2010.

MAINIER, F. B.; SANDRES, G. C.; TAVARES, S. S. M. Corrosão por Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) e Suas Implicações no Meio Ambiente e na Segurança Industrial. In: 8º Congresso Ibero americano de Engenharia Mecânica, Cusco, 2007.

MARA, D.; HORAN, N. Handbook of Water and Wastewater Microbiology. Academic press, p. 832, 2003.

MARKOU, G. Improved anaerobic digestion performance and biogas production from poultry litter after lowering its nitrogen content. Bioresource Technology, v.196, p.726-730, 2015.

Mattos, L. C., Júnior, M. F. Manual do Biodigestor Sertanejo. Projeto Manejo sustentável. Edição do Projeto Dom Helder Camara, Recife, 2011.

MUELLER, C. Anaerobic Digestion of Biodegradable Solid Waste in Low- and Middle- Income Countries. Swiss Federal Institute of Aquatic Science (EAWAG), Department of Water and Sanitation in Developing Countries (SANDEC), 2007.

NGES, I. A. e LIU, J. Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions. *Renewable Energy*, v. 35, p. 2200 – 2206, 2010.

OLIVER, A. P. M. et al. Manual de treinamento em biodigestão. 2 ed. Salvador: WINROCK INTERNACIONAL, 2008, 16 p.

ORZI, V., SCAGLIA, B., LONATI, S., RIVA, C., BOCCASILE, G., ALBORALI, G. L., ADANI, L. The role of biological processes in reducing both odor impact and pathogen content during mesophilic anaerobic digestion. *Science of the Total Environment*, .526, p.116- 126,2015.

PRATI, L. Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores. Monografia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Pg. 20, 2010.

RANZI, Tiago Juruá Damo, ANDRADE, Marcio Antonio Nogueira. Estudo de viabilidade de transformação de esterqueiras e bioesterqueiras para dejetos de suínos em biodigestores rurais visando o aproveitamento do biofertilizante e do biogás. In *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, 2004, Campinas (SP) [online]. 2004.

RIBEIRO, D. S, et al. Determinação das Dimensões de um Biodigestor em Função da Proporção Gás/Fase Líquida . *Revista Holos*, ano 27, vol. 1. 2011.

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

SCHULZ, H.; EDER, B.: *Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiel*. 2ª edição revista e ampliada, Editora Ökobuch, Staufen bei Freiburg, 2006.

SILVA, A. E. M. C.; CAVALCANTI, M. T.; ALMEIDA, R. R.; SILVA, J. N. Projeto de unidade rural de geração e distribuição de biogás. In: Giovanni Seabra. (Org.). *Educação Ambiental & Biogeografia*. Iled. Ituiutaba-MG: Barlavento, v. Vol. 2, p. 1663-1673, 2016.

SILVA, A. F., et al. Preparo e Uso de Biofertilizantes Líquidos. Comunicado Técnico da Embrapa Semi-Árido, maio 2007.

SILVA, Wilton Tadeu Lopes da et al. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbico para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. *Quím. Nova*, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 35-40, 2012.

Sitorus, B., Sukandar, Panjaitan, S. D., Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit -vegetable wastes. *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*. *Energy Procedia* 32 176 – 182, 2013.

TasneemAbbasi, Tauseef, S.M., Abbasi, S.A.. *Biogas Energy Springer Briefs in Environmental Science Volume 2*, 2012.

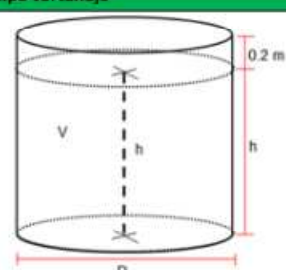

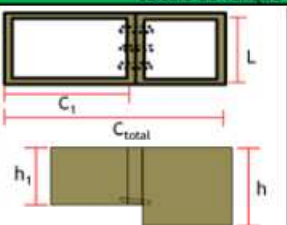
Van HAANDEL, A. C., Lettinga, G. *Tratamento Anaeróbico de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente*, Epgraf, Campina Grande, 240 p, 1994.

WAYNE, J. P. Application of the adm1 model to advanced anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, v.96, p.1832-1842, 2005.

XIAOYING. Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of rice straw in South China. *International Journal of Hydrogen Energy*, v.35, p. 7261-7266, 2010.

ANEXO I

Figura I – Planilha de cálculo do biodigestor

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Cálculo do volume de Carga por dia												
2	Tipo de Animal	Biomassa por animal (A) (Kg/dia)(Suínos, Bovinos)		Quant. de animais: B	Quant. de animais: B	Total de biomassa: C = B x A (kg/dia)							
3	BOVINO	10		10		100							
4	SUÍNO	2,3		20		46							
5	Volume de biomassa (m³/dia) (1000kg(=) 1m³):		Relação biomassa/água (entre 30- 60%): E (=)(80-160g/L-1)		Volume de água (m³/dia):		F = C*E						
6	0,146		50		0,29								
7	Volume da carga(m³/dia):						G = D+F		0,44				
8	Cálculo de Equivalência de energia												
9	Tipo de Animal	Biogás por animal: (H) m³/animal/dia)			Produção de Biogás (m³/dia) I = H x B								
10	BOVINO	0,36			3,6								
11	SUÍNO	0,1725			3,45								
12	ENERGIA ELÉTRICA (kWh) (1m³(=) 143 kWh)	GLP(kg) (1m³(=) 0,45kg)	Número de Botijões/mês (1bot. (=) 13 kg)		Gasolina(L) (1m³(=) 0,61L)	Poder Calorífico (kW) (60% CH4(=) 5140kcal/m³)							
13	10,0815	3,1725	7,3		4,3005	36.237,00							
14	Cálculo do volume do Biodigestor em função do Tempo de Retenção e da Carga												
15	TRH (dias) =	27		VC (m³/dia) =		0,44		Obs.: VB = volume do biodigestor (m³); VC = volume da carga diária (dejetos + água) (m³/dia) TRH = Tempo de retenção hidráulica (dias)		$VB = VC \times TRH$			
16	VB (m³) =						11,826						
17	Cálculo do número de Biodigestores do tipo sertanejo												
18	Volume de uma unidade:												
19	V _{unidade} = 14,34						V _{unidade} >= VB						
20	V = volume do biodigestor (m³);		h (m) =		2,7		0,2 m						
21	h = profundidade (m);		D (m) =		2,6		h						
22	D = diâmetro (m);		Vcaixa (m³) =		5		D						
23													
24	Número de unidades												
25	Obs.:												
26	Se o volume necessário for menor que nxVunidade												
27	será aproximado sempre para o número maior.												
28													
29	Nº de Unidades =						1						
30	Cálculo do Tanque de alimentação												
31	h(m) =	0,5				h , definir altura; V , volume desejado; $V = A \times h$, $A = \pi(D/2)^2$ $D = \frac{\sqrt{4V}}{\pi h}$							
32	V (m³/dia) =	0,44											
33	D(m) =	1,06											
34	Cálculo do Tanque de saída												
35	h(m) =	0,80				h , definir altura; L , definir largura; V_{total} , volume desejado; $V = A \times h = V_1 + V_2$ $A_{total} = A_1 + A_2 = C_1 L + (C_{total} - C_1) L$ $A_1 = C_1 L$, $V_1 = A_1 h$, $V_2 = A_2 h$ $h = 0,75 h$, $C_1 = 0,75 C_{total}$ $V_{total} = V_1 + V_2 = 0,75 C_{total} L * 0,75 h + (C_{total} - 0,75 C_{total}) L * h$ $= L h (0,75 * 0,75 + 1 - 0,75) * C_{total}$ $C_{total} = \frac{V_{total}}{L h (0,75 * 0,75 + 1 - 0,75)}$							
36	L(m) =	1,20											
37	V (m³/dia) =	0,44											
38	Ctotal(m) =	0,56											
39	C1(m) =	0,42											
40	h1(m) =	0,60											
41													
42													
43													
44													
45													
46													
47													
48													
49													
50													
51													
52													
53													

