

GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE BIOGÁS PROVENIENTE DE ESTERCO  
BOVINO: ESTUDO DE CASO NA FAZENDA ATERRADO.

Sérgio Luís Coelho Diniz Junqueira

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

---

Prof. Marcelo José Colaço, DSc

---

Prof. Albino José Kalab Leiróz, PhD

---

Prof. Gustavo César Rachid Bodstein, PhD

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2014

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

(Leonardo da Vinci)

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar condições de estar aqui nesse momento.

Agradeço também aos meus pais, que me tornaram a pessoa que sou hoje e sempre me incentivaram e apoiaram, fazendo o possível para que eu continuasse crescendo.

Ao meu irmão que sempre esteve ao meu lado nas horas boas e ruins sempre me botando para cima.

Aos meus familiares que me ajudaram na realização do sonho de ser engenheiro.

A minha namorada que me incentiva e me apoia, sempre ao meu lado com muito companheirismo.

Aos meus amigos que me ajudaram ao longo do curso me ensinando e que viveram comigo tantos momentos para serem lembrados por toda a vida.

Aos meus professores que me passaram um pouco de seu conhecimento e experiência ao longo dos anos de graduação, em especial ao meu orientador que me ajudou na conclusão desse projeto.

## Sumário

1. Introdução .....	1
2. O Biogás .....	2
2.1. A História do Biogás.....	2
2.2. Formação do Biogás .....	3
2.3. Propriedades Físico-Químicas .....	6
3. Biodigestor.....	7
3.1. Biodigestor Batelada.....	7
3.2. Biodigestor Contínuo .....	9
3.2.1. Modelo Indiano.....	10
3.2.2. Modelo Chinês .....	13
3.2.3. Comparação entre os modelos Chinês e Indiano.....	15
3.2.4. Modelo Canadense .....	15
3.3. Dimensionamento de biodigestores .....	17
3.4. Instalação do biodigestor .....	21
3.5. Materiais para construção de um biodigestor.....	22
3.6. Operação do biodigestor.....	22
4. Estudo de caso .....	23
4.1. Local do estudo .....	23
4.2. Dimensionamento .....	24
4.3. Produção de biogás.....	28
4.4. Seleção do gerador.....	28
4.5. Geração de energia.....	35
4.6. Análise econômica.....	37
4.6.1. Custos de instalação.....	37
4.6.2. Manutenção.....	38
4.6.3. Análise econômica.....	38
5. Conclusão .....	40
6. Referências Bibliográficas.....	42

## Lista de Figuras

Figura 1 - Efetivo de bovinos no Brasil entre 2001 e 2011 .....	1
Figura 2 - Fluxograma do processo de digestão anaeróbia .....	3
Figura 3 - Biodigestor tipo batelada em corte .....	8
Figura 4 - Biodigestor tipo indiano.....	11
Figura 5 - Biodigestor tipo indiano em corte .....	12
Figura 6 - Biodigestor tipo chinês .....	13
Figura 7 - Biodigestor tipo chinês em corte.....	14
Figura 8 - Biodigestor tipo canadense .....	16
Figura 9 - Seção transversal do biodigestor tipo canadense .....	19
Figura 10 - Esquema do sistema de biodigestor a ser instalado na propriedade	27
Figura 11 - Plaqueta do motor da ordenhadeira mecânica .....	30
Figura 12 - Filtro de biogás .....	33

## Lista de Tabelas

Tabela 1- Produção de biogás para diferentes tipos de substrato .....	6
Tabela 2 - Composição típica do biogás .....	6
Tabela 3 - Comparação entre biogás e outros combustíveis .....	7
Tabela 4 - Comparação entre os biodigestores chinês e indiano .....	15
Tabela 5 - Tabela de cálculo do volume de carga diária .....	19
Tabela 6 - Equações para cálculo das dimensões do biodigestor .....	20
Tabela 7 - Cálculo da carga diária .....	24
Tabela 8 - Dimensões calculadas do biodigestor.....	26
Tabela 9 - Produção de biogás na propriedade.....	28
Tabela 10 - Potência dos equipamentos instalados.....	32
Tabela 11 - Especificações técnicas do motor do conjunto motogerador .....	35
Tabela 12 - Capacidade de operação do motogerador .....	37
Tabela 13 - Custos do projeto.....	37
Tabela 14 - Planos de manutenção.....	38
Tabela 15 - Economia de energia gerada .....	39

## Lista de Fotos

Foto 1 – Biodigestor canadense utilizado na Estação Experimental de Caraíbas	17
Foto 2 - Vista aérea da propriedade .....	23
Foto 3 - Ordenhadeira mecânica.....	29
Foto 4 - Picadeira de capim.....	29
Foto 5 - Tanque de resfriamento de leite .....	30
Foto 6 - Plaqueta do motor da picadeira de capim.....	32
Foto 7- Motogerador selecionado.....	34

## **Lista de Símbolos**

atm – Atmosfera (unidade de pressão);

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada;

CH<sub>4</sub> – Metano;

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono;

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

g – Grama;

GEE – Gases de Efeito Estufa;

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo;

H<sub>2</sub> – Hidrogênio;

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística ;

kg – Quilograma;

L – Litro;

m<sup>3</sup> – Metro Cúbico;

m<sup>3</sup>/dia – Metro Cúbico por dia;

m<sup>3</sup>/kg – Metro Cúbico por Quilograma;

N – Nitrogênio;

O<sub>2</sub> – Oxigênio;

P – Fósforo;

PIB - Produto Interno Bruto;

PVC – Cloreto de Polivinila (do inglês Polyvinyl Chloride)

RJ – Rio de Janeiro;

% - Porcentagem;

°C – Graus Celsius.

## **Resumo**

Ao longo da história do Brasil, a indústria agropecuária apresenta forte influência na economia brasileira. Portanto esse é um mercado que deve ser estimulado e que continua apresentando um potencial de aprimoramento muito grande. Visto isso, e com o intuito de buscar fontes renováveis de energia que possam substituir o petróleo o biogás vem sendo utilizado em diversas aplicações como combustível para geração de energia. Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um biodigestor como fonte de geração de energia para um propriedade rural, bem como sua análise de viabilidade econômica.

## **Abstract**

Throughout the history of Brazil, the agricultural industry has strong influences on the Brazilian economy. So this is a market that should be nurtured and still showing a very large improvement potential. Seen that, and with the intention of seeking renewable energy sources that can replace oil, biogas has been used in several applications as fuel for power generation. This work has as objective the development of a bio-digester as a source of power generation for a rural property, as well as its analysis of economic feasibility.

## 1. Introdução

No cenário mundial dos dias de hoje, com o aquecimento global em cena, a busca por fontes renováveis de energia vem sendo um tema cada vez mais recorrente. Por conta disso, alternativas como a que será apresentada neste trabalho vem se tornando mais atrativas.

O Brasil apresenta um setor agropecuário muito forte. Segundo o Censo Agropecuário Brasileiro de 2006, temos em nosso país 5,1 milhões de estabelecimentos rurais, ocupando 333 milhões de hectares.

Falando mais especificamente da pecuária bovina, dados do IBGE mostram que o Brasil apresentava em 2011 mais de 200 milhões de cabeças de gado, conforme apresentado na figura 1.

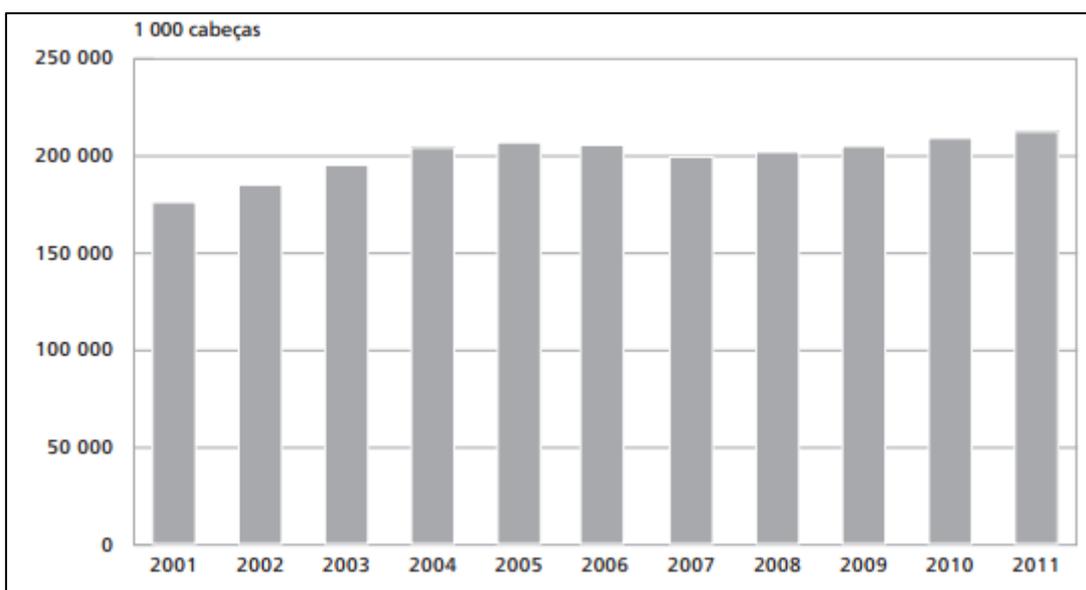


Figura 1 - Efetivo de bovinos no Brasil entre 2001 e 2011 (Fonte: Agência Internacional de Energia)

Com esse número tão expressivo de animais, grandes quantidades de dejetos são produzidas diariamente nas propriedades rurais. Sendo assim, o uso de biodigestores para tratamento dessa matéria orgânica, diminuindo assim o impacto ambiental da decomposição *in natura* desses dejetos, e produção de biogás, tornando-se uma fonte de energia limpa, aparece como uma opção bastante interessante.

## **2. O Biogás**

### **2.1. A História do Biogás**

O biogás foi descoberto, como “gás dos pântanos” em 1667 (CLASSEN; *et al*, 1999), e, somente um século depois, em 1776, Alessandro Volta reconheceu novamente a presença de metano no gás dos pântanos. Já no século XIX, Ulysse Graynon, um aluno de Louis Pasteur, conseguiu obter 100 litros de gás por m<sup>3</sup> de matéria, ao realizar a fermentação anaeróbia de uma mistura de estrume e água, a 35°C (NOGUEIRA, 1986). Pasteur apresentou os trabalhos de seu aluno à Academia das Ciências em 1884 e considerou que esse gás poderia ser uma fonte de aquecimento e iluminação.

Nas décadas de 50 e 60, Índia e China desenvolveram seus próprios modelos de biodigestor e começaram a utilizar mais intensamente o processo de biodigestão como fonte de energia (NOGUEIRA,1986).

Ao longo dos anos outros países, geralmente de terceiro mundo, também desenvolveram seus biodigestores, e esse processo vem se difundindo cada vez mais.

Atualmente o crescimento desse processo vem acontecendo por virtude da busca de fontes renováveis que possam substituir o petróleo e o biogás, que até pouco tempo era visto como um subproduto da decomposição de resíduos de diversas fontes, vem se tornando economicamente viável para encarar a alta dos preços dos combustíveis fósseis.

O primeiro relato da coleta de biogás proveniente de um processo de biodigestão anaeróbia é de 1895, na Inglaterra, em uma estação de tratamento de efluentes municipais. Porém somente em 1941, na Índia, apareceu o primeiro estudo de aproveitamento de biogás gerado através de estrume e outros materiais em uma pequena planta. Esse foi o início do desenvolvimento do processo de biodigestão

anaeróbia para tratamento de resíduos industriais, agrícolas e municipais (ROSS e DRAKE, 1996).

## 2.2. Formação do Biogás

O biogás é uma mistura de gasosa composta principalmente por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ). É produzido pela digestão anaeróbia, que é um processo fermentativo que tem a finalidade de remover matéria orgânica, formar biogás e produzir biofertilizantes. Os biofertilizantes são o que resta da biomassa após a fermentação. Ele apresenta teores de nitrogênio (N), entre 1,5 e 2,0%, de fósforo (P), entre 1,0 e 1,5%, e de potássio (K), entre 0,5 e 1,0%, sendo um adubo orgânico com alta qualidade.

Na figura 2, abaixo, podemos ver o esquema desse processo.

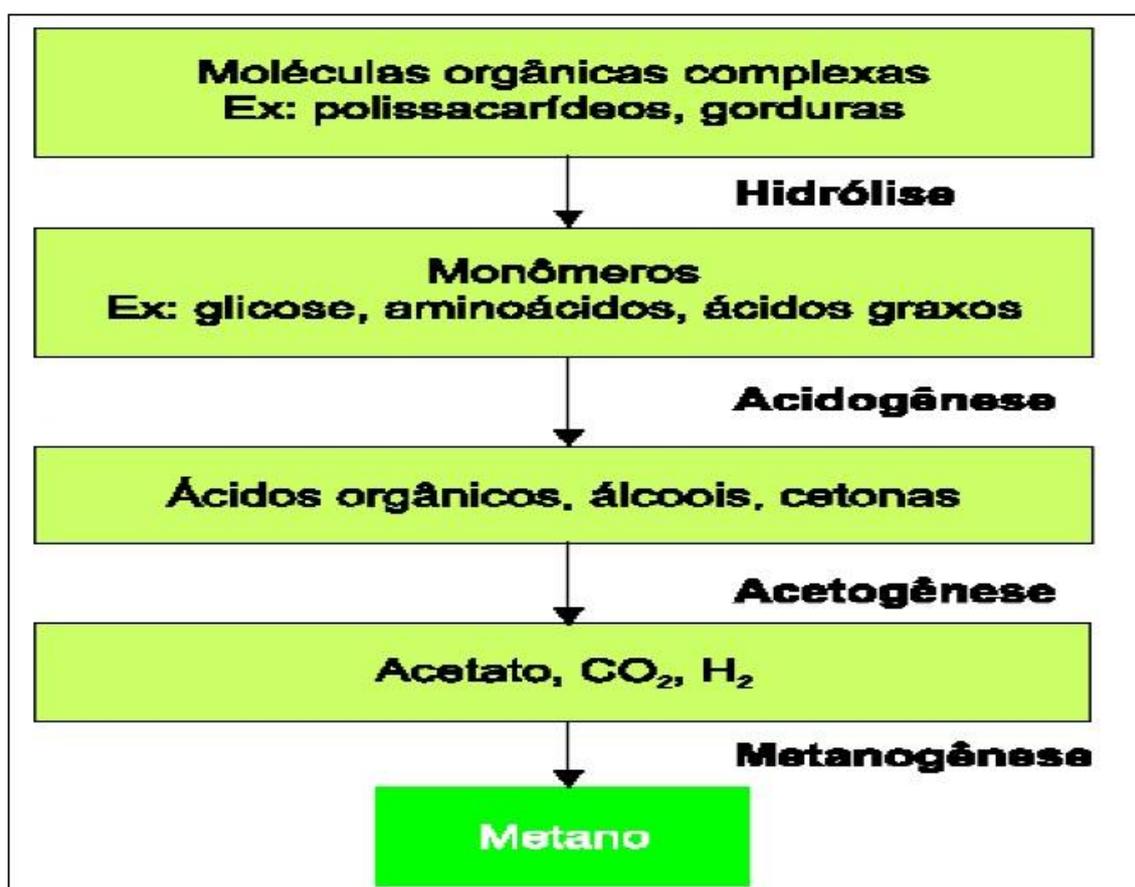


Figura 2 - Fluxograma do processo de digestão anaeróbia (Fonte: Aquino e Chernicharo, 2005)

Sua formação ocorre de forma espontânea em alguns ambientes na natureza, onde as concentrações de oxigênio são baixas, como pântanos e lamas escuras, porém sua produção também é possível a partir da fermentação de diversos resíduos orgânicos como esterco animal, resíduos agrícolas, lixo urbano, efluentes industriais, entre outros. Podemos então aproveitar essa mistura gasosa como combustível realizando a digestão anaeróbia em biodigestores.

Esse processo é influenciado por alguns parâmetros. Segundo Arruda *et al.* (2002), os parâmetros importantes para a produção mais eficiente do biogás, são:

a) Composição da matéria

Quanto maior a porcentagem de material orgânico presente no resíduo, maior é o potencial de geração de metano. Para a formação de biogás é necessário que exista uma relação entre 20:1 e 30:1, de carbono para nitrogênio. O excesso de nitrogênio pode levar a má produção de biogás, com formação de compostos nitrogenados como a amônia ( $\text{NH}_3$ ).

b) Teor de água

O teor de água deve estar ao redor de 90% do conteúdo total de biomassa, de acordo com a origem da mesma. A diluição deve estar em torno de 1:1 e 1:2 de água para substrato. O excesso de água pode atrapalhar a hidrólise, exigindo uma elevada carga de biomassa, e a falta d'água pode causar o entupimento da tubulação de carga do biodigestor.

c) pH

As bactérias envolvidas no processo são afetadas por alterações do pH no interior do biodigestor. A média de valores está entre 6,0 e 8,0, tendo o pH 7,0 como ponto ótimo. Esses valores são respeitados quando o processo acontece em condições normais.

#### d) Temperatura

As atividades enzimáticas das bactérias dependem da temperatura, e alterações bruscas causam desequilíbrio nas culturas, principalmente nas bactérias formadoras de metano. Em torno de 10°C a atividade é muito reduzida e acima de 65°C as enzimas são destruídas. Deve-se procurar sempre manter a temperatura de 35 a 45 °C, sendo esta a ótima temperatura para a biodigestão. Para conter a variação da temperatura no interior do biodigestor, a maior parte do sistema se encontra enterrado no solo, pois a variação de temperatura ali é muito menor do que na atmosfera. A temperatura ideal, no entanto, dependerá do tipo de bactéria a ser utilizada, ou seja, se forem termofílicas, mesofílicas ou psicrófilicas, além das condições locais.

#### e) Tempo de retenção

O tempo de retenção pode variar de reação para reação, porém normalmente leva de 30 a 45 dias para a formação do biogás. Entretanto, em algumas situações, na primeira semana de retenção hidráulica, já é possível verificar a existência de biogás em menores proporções. Essa variação é mais fácil de ser observada em biodigestores do tipo contínuo.

#### f) Concentração de sólidos voláteis

Quanto maior a concentração de sólidos voláteis da biomassa, maior será a produção de biogás, já que são os que serão fermentados para produzir o biogás. Comastri Filho (1981) recomenda pelo menos 120 g de sólidos voláteis por Kg de matéria seca, sendo o teor de sólidos voláteis presentes no esterco bovino variado entre 80 e 85%.

Portanto, vemos que podemos produzir biogás a partir de qualquer tipo de substrato orgânico, desde que tenhamos as condições necessárias para o desenvolvimento das bactérias envolvidas no processo. Porém, diferentes matérias orgânicas, nos darão diferentes produções de biogás, o que pode ser visto na tabela 1, abaixo.

Tabela 1- Produção de biogás para diferentes tipos de substrato (Fonte: Lucas Júnior (2005) e Quadros *et al.* (2007))

Espécie	m <sup>3</sup> de biogás/kg de esterco	m <sup>3</sup> de biogás/ 100 kg de esterco
Caprino/ovino	0,040 – 0,061	4,0 – 6,1
Bovinos de leite	0,040 – 0,049	4,0 – 4,9
Bovinos de corte	0,040	4,0
Suínos	0,075 – 0,089	7,5 – 8,9
Frangos de corte	0,090	9,0
Poedeiras	0,100	10,0
Codornas	0,49	4,9

### 2.3. Propriedades Físico-Químicas

As propriedades do biogás dependem principalmente da concentração de metano presente. A composição típica do biogás de esterco bovino é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Composição típica do biogás (Fonte: Walsh Jr. *et al.*, (1998) e Breton *et al.* (1994))

Elemento	Quantidade (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 a 70
Dióxido de Carbono (CH <sub>2</sub> )	30 a 40
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0 a 10
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0 a 5
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0 a 1
Gás Sulfídrico	0 a 1
Vapor d'água	0,3

Segundo Coldebela (2004), o uso do biogás como alternativa energética, com teor de metano entre 50 e 80%, terá um poder calorífico entre 4,95 e 7,92 kWh/m<sup>3</sup>. Este fator deve-se principalmente ao CH<sub>4</sub>, que puro e em condições normais de pressão e temperatura, pode obter poder calorífico de aproximadamente 9,9 kWh/m<sup>3</sup>. A utilização dessa energia produzida pelo biogás pode ser aproveitada para aquecimento, refrigeração, iluminação, cozimento, geradores de energia elétrica, misturadores de ração, entre outras utilidades.

A tabela 3 abaixo mostra a equivalência energética entre 1 m<sup>3</sup> de biogás comparado a outros combustíveis. Podemos notar que o biogás equivale a menos de 1 litro dos derivados de petróleo, porém a mais de 1 kg de lenha.

Tabela 3 - Comparação entre biogás e outros combustíveis (Fonte: Deganutti *et al* (2002))

Combustível	Quantidade Equivalente
Gasolina	0,61 L
Querosene	0,57 L
Óleo Diesel	0,55 L
Gás Liquefeito	0,45 Kg
Etanol	0,79 L
Lenha	1,538 Kg
Energia Elétrica	1,428 kwh

### 3. Biodigestor

Biodigestores são compartimentos fechados, com seu interior protegido do contato com o ar atmosférico, para que toda biomassa contida em seu interior, sofra o processo de fermentação através da atividade de bactérias anaeróbias. Os produtos finais da digestão anaeróbia dessa biomassa serão o biogás e também o fertilizante.

Existem diversos tipos de biodigestores, cada um com suas vantagens e desvantagens e características próprias de operação. A escolha de qual modelo utilizar depende das condições locais, o tipo de substrato utilizado e da relação custo versus benefício apresentado, porém todos eles levarão aos mesmos produtos finais.

A seguir veremos os principais modelos utilizados atualmente e suas principais características.

#### 3.1. Biodigestor Batelada

No sistema do tipo batelada, a matéria prima é inserida no biodigestor fechado, totalmente sem ar, para que seja realizada a fermentação anaeróbica do material. O gás inserido é armazenado num gasômetro acoplado no próprio recipiente ou permanece no biorreator servindo de digestor. Após o término da produção de biogás, o biodigestor é aberto e os resíduos são retirados. A seguir, é feita a limpeza do sistema e é inserida uma nova quantidade de substrato, reiniciando o processo (Comastri Filho, 1981).

Os biodigestores tipo batelada é um sistema simples de fácil operação. É necessária apenas uma carga inicial para que possamos produzir biogás. Por sua produção não ser contínua, geralmente é utilizado em propriedades onde exista sazonalidade na produção de biomassa, como por exemplo granjas avícolas de corte, onde o esterco é removido quando ocorre a limpeza do galpão após a venda das aves. Na figura 3 vemos o esquema de um biodigestor do tipo batelada.

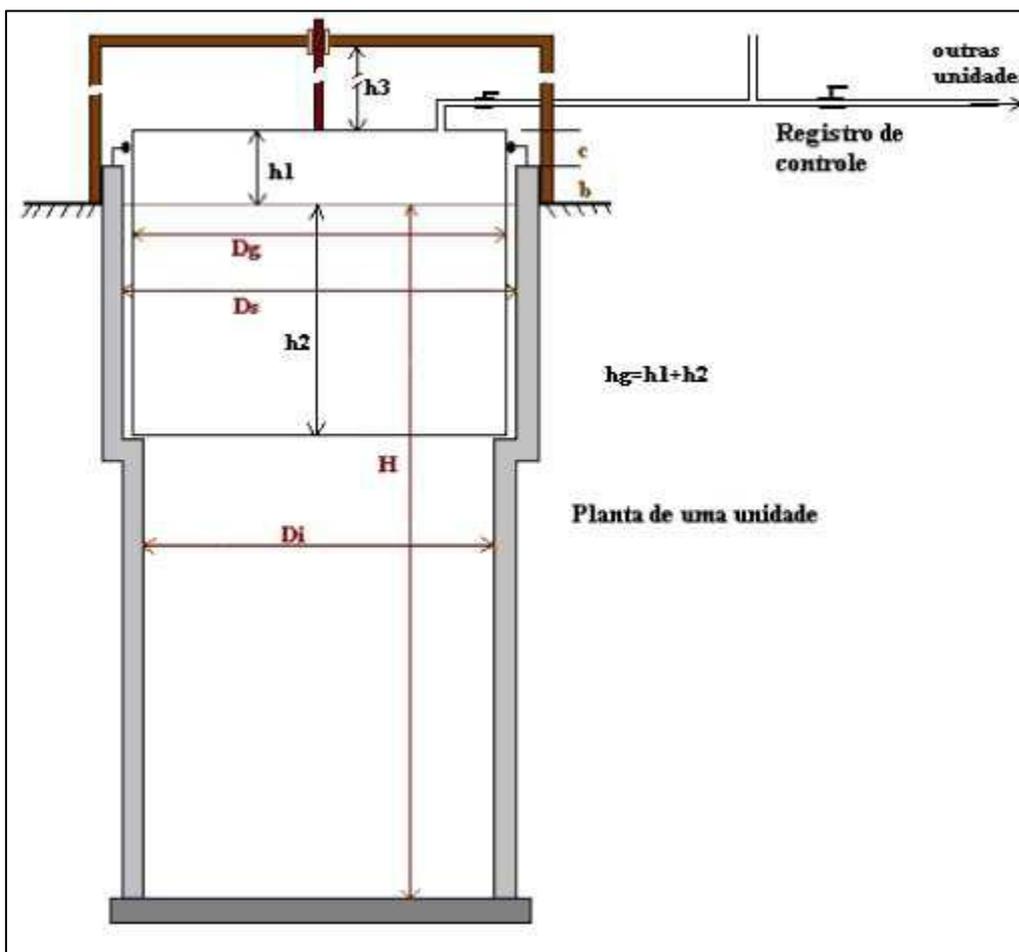


Figura 3 - Biodigestor tipo batelada em corte (Fonte: EMBRAPA Meio Ambiente (2012))

Nesta figura temos:

$D_i$  = diâmetro interno do biodigestor;

$D_s$  = diâmetro interno da parede superior;

$D_g$  = diâmetro do gasômetro;

$H$  = altura do nível do substrato;

$h_1$  = altura ociosa do gasômetro;

$h_2$  = altura útil do gasômetro;

$h_3$  = altura útil para deslocamento do gasômetro;

$b$  = altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato;

$c$  = altura do gasômetro acima da parede do biodigestor.

### **3.2. Biodigestor Contínuo**

Nos biodigestores do tipo contínuo, ao contrário do tipo batelada, a produção de biogás e biofertilizante, enquanto o mesmo for alimentado com substrato, nunca cessa. Esse tipo de biodigestor é alimentado continuamente com um substrato que seja de fácil degradação e disponível abundantemente no local através de dutos de alimentação, enquanto o biogás é extraído por tubulação na parte superior e o biofertilizante é removido através de dutos de saída.

Os biodigestores contínuos são divididos em horizontais e verticais, de acordo com seu posicionamento no solo, sendo que esses dois ainda são subdivididos em outras classificações quanto ao modelo.

Os biodigestores contínuos verticais são compostos de tanques cilíndricos de alvenaria, na maioria das vezes com sua maior parte enterrada no solo. A alimentação desse tipo de biodigestor é feita pela parte inferior, enquanto o biogás sai pela parte superior. Quando esse tipo de biodigestor é utilizado, é necessária atenção para não contaminação de lençóis freáticos, visto que eles apresentam certa profundidade escavada na terra.

Os biodigestores contínuos horizontais tem sua altura menor que seu comprimento e largura, podendo assumir quaisquer formas. Eles podem ou não estarem submersos,

o que faz com que os mesmos sejam recomendados em áreas onde existem lençóis freáticos, com baixos riscos de contaminação. A alimentação de biomassa é realizada por um dos lados do biodigestor, enquanto do outro lado retira-se o biofertilizante.

Os modelos mais utilizados de biodigestores contínuos são o Indiano, o Chinês e o Canadense. Esses três tipos de biodigestores serão apresentados a seguir.

### **3.2.1. Modelo Indiano**

No biodigestor do modelo Indiano, existe uma campânula flutuante como gasômetro, sendo que ela pode estar inserida sobre a biomassa em fermentação ou em um selo d'água externo, e uma parede central que divide o tanque em duas câmaras, para que o material circule de maneira homogênea por todo o seu interior.

O modelo Indiano possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, aumentando o volume deste, portanto, mantém a pressão em seu interior constante (DEGANUTTI *et. al.*, 2002).

Esse modelo de biodigestor apresenta fácil construção, porém o gasômetro de metal pode encarecer o custo final e inviabilizar o projeto de instalação do mesmo.

O resíduo utilizado para alimentar o biodigestor Indiano, deve apresentar uma concentração de ST (sólidos totais) não superior a 8%, para facilitar a circulação do resíduo pelo interior da câmara de fermentação e evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material (DEGANUTTI *et. al.*, 2002).

A figura 4, abaixo, apresenta um biodigestor do tipo Indiano.

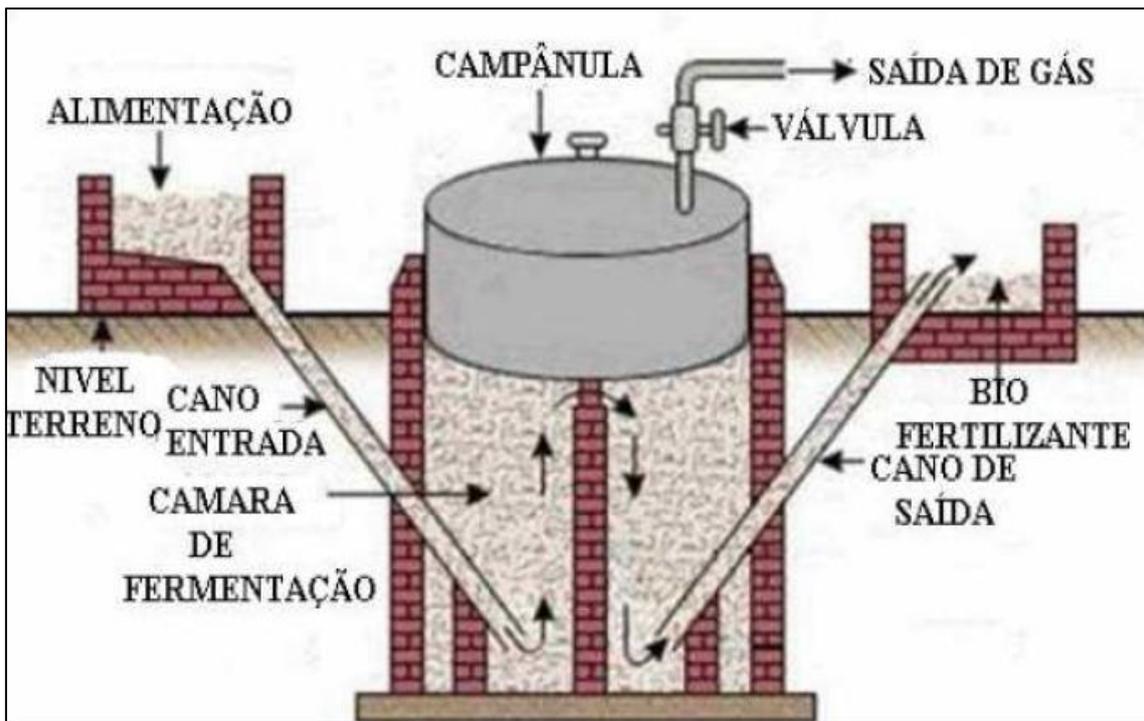


Figura 4 - Biodigestor tipo indiano (Fonte: Fonseca *et al.* (2009))

Segundo Souza (2009), os principais componentes de um biodigestor Indiano são:

- Caixa de carga – local de diluição dos dejetos;
- Tubo de carga – conduz dejetos da caixa de carga para o interior do biodigestor;
- Câmara de biodigestão cilíndrica – local de ocorrência da fermentação anaeróbica com produção de biogás;
- Gasômetro – local de armazenamento do gás produzido, formado por uma campânula/campana que se movimenta verticalmente;
- Tubo guia – guia o gasômetro quando este se movimentar para cima e para baixo;
- Tubo de descarga – conduz para a saída o material fermentado sólido e líquido;
- Caneleta de descarga – local de recebimento do material fermentado sólido e líquido;
- Saída de biogás – dispositivo que permite a saída do biogás produzido para ser encaminhado para os pontos de consumo.

Na figura 5 podemos ver um biodigestor em corte e seus elementos fundamentais.

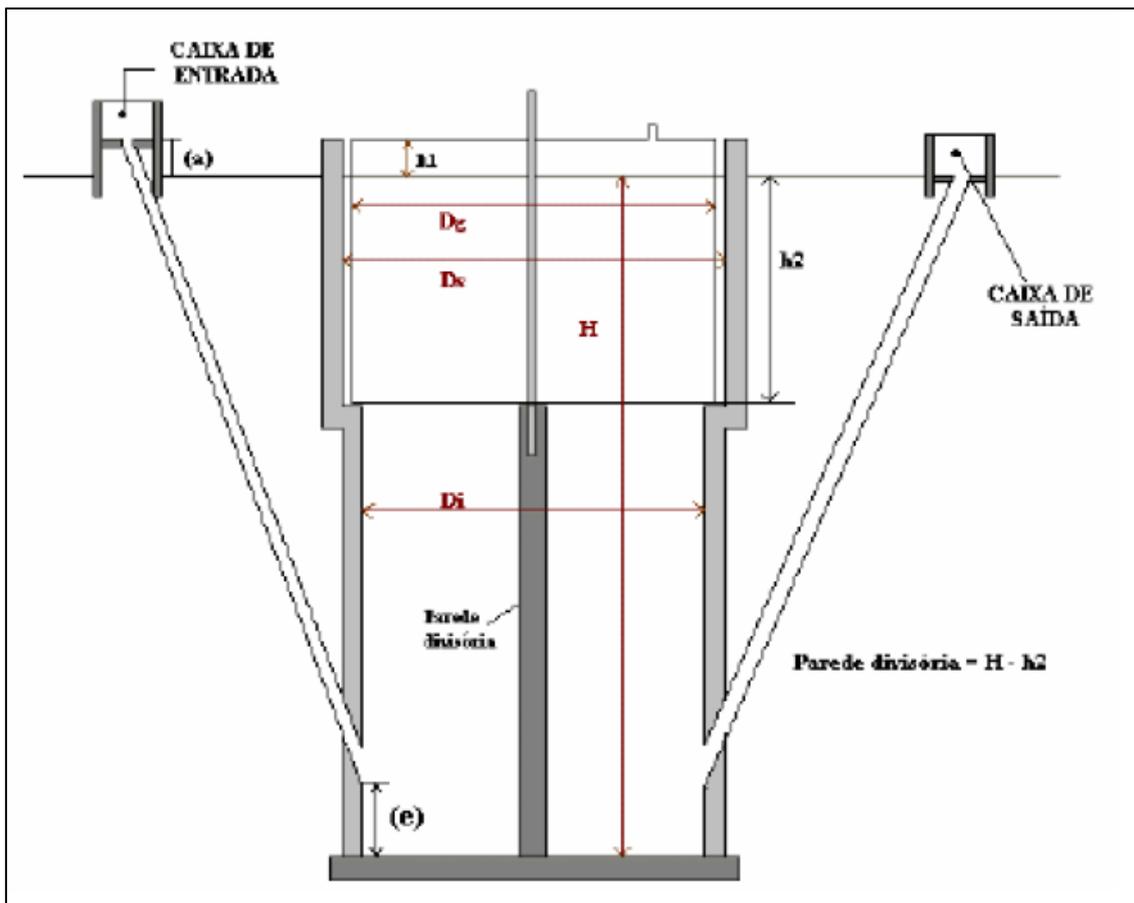


Figura 5 - Biodigestor tipo indiano em corte (Fonte: Fonseca *et al.* (2009))

Observamos na figura:

$D_i$  = diâmetro interno do biodigestor;

$D_s$  = diâmetro interno da parede superior;

$D_g$  = diâmetro do gasômetro;

$H$  = altura do nível do substrato;

$h_1$  = altura ociosa (reservatório do biogás);

$h_2$  = altura útil do gasômetro;

$a$  = altura da caixa de entrada;

$e$  = altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato.

### 3.2.2. Modelo Chinês

O biodigestor modelo chinês é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria para fermentação, com teto impermeável, destinado ao armazenamento do biogás. 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 (BENINCASA *et al.*, 1990).

Podemos ver um biodigestor modelo Chinês na figura 6.

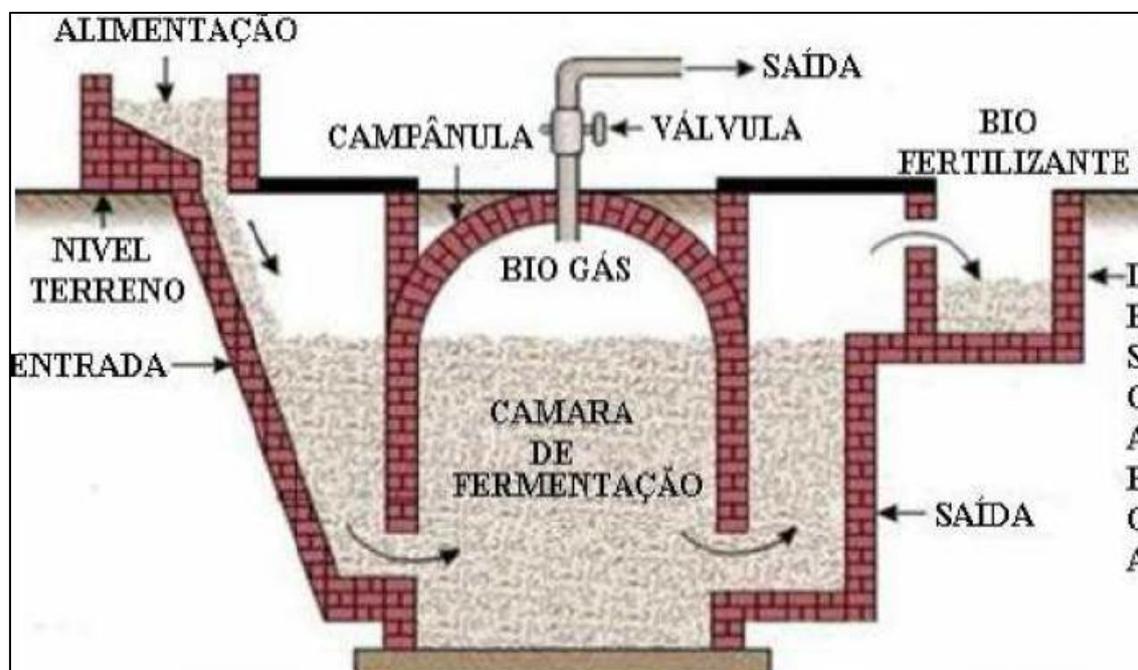


Figura 6 - Biodigestor tipo chinês (Fonte: Fonseca *et al.* (2009))

Por dispensar a campânula de metal, sendo esse biodigestor construído quase que totalmente em alvenaria, os custos relativos à construção desse modelo de biodigestor são menores, porém, se a vedação da estrutura não for bem realizada, podem acontecer problemas de vazamento para a atmosfera.

Neste tipo de biodigestor, uma parcela de gás formado na caixa de saída é libertada para a atmosfera, reduzindo parcialmente a pressão interna do gás. Por este motivo as

construções de biodigestores modelo Chinês não são utilizadas para instalações de grande porte (DEGANUTTI *et. al*, 2002).

A figura 7 apresenta uma vista em corte dum biodigestor do modelo Chinês e seus componentes fundamentais.

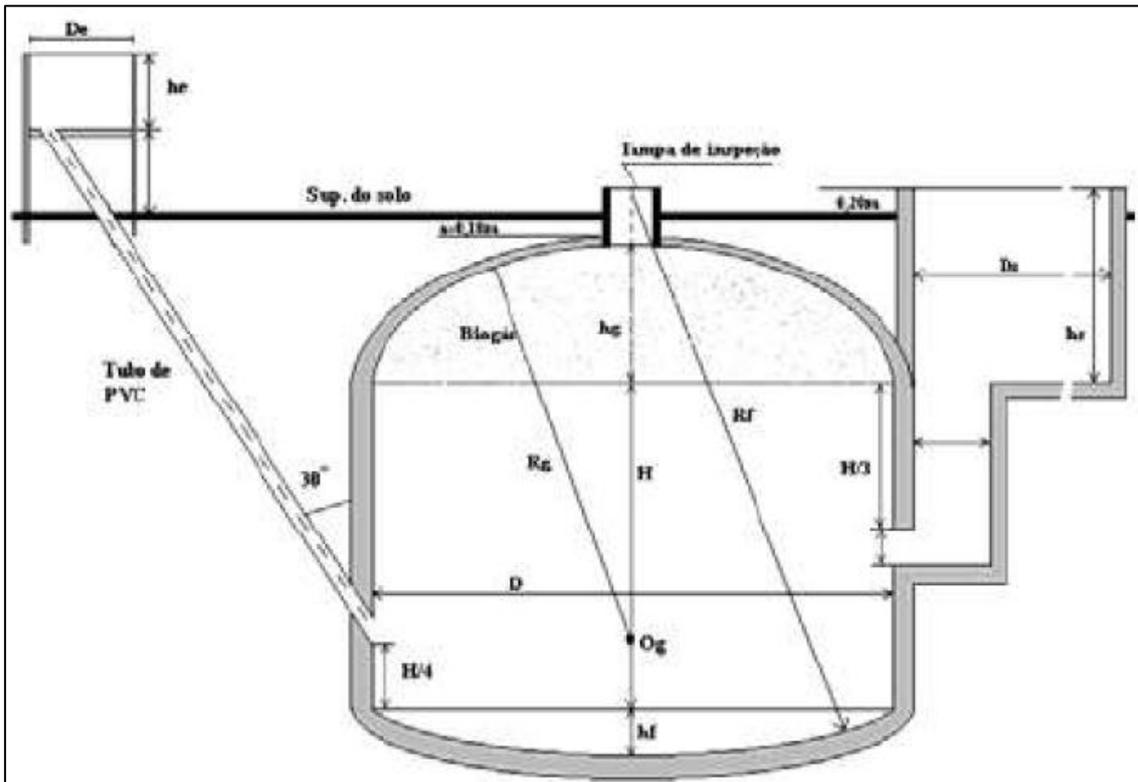


Figura 7 - Biodigestor tipo chinês em corte (Fonte: Fonseca *et al.* (2009))

Na figura acima temos:

A = afundamento do gasômetro;

D = diâmetro do corpo cilíndrico;

De = diâmetro da caixa de entrada;

Ds = diâmetro da caixa de saída;

H = altura do corpo cilíndrico;

he = altura da caixa de entrada;

$h_f$  = altura da calota do fundo;

$H_g$  = altura da calota esférica do gasômetro;

$h_s$  = altura da caixa de saída;

$O_f$  = centro da calota esférica do fundo;

$O_g$  = centro da calota esférica do gasômetro.

### 3.2.3. Comparação entre os modelos Chinês e Indiano

Segundo Lucas Júnior (1984), ao compararmos esses dois modelos de biodigestor, notamos que ambos apresentam desempenho semelhante. Contudo, o modelo Indiano apresenta maior eficiência na produção de biogás e redução de sólidos, em determinados experimentos. Esses resultados podem ser vistos na tabela 4.

Tabela 4 - Comparação entre os biodigestores chinês e indiano (Fonte: Lucas Júnior (1984))

Parâmetros Comparativos	Biodigestor	
	Indiano	Chinês
Redução de Sólidos (%)	37	38
Produção Média ( $m^3 \cdot dia^{-1}$ )	2,7	3,0
Produção Média ( $l \cdot m^{-3}$ de substrato)	489	538

### 3.2.4. Modelo Canadense

O biodigestor modelo Canadense, segundo Souza (2009), também é chamado de biodigestor de fluxo tubular, apresenta uma tecnologia mais moderna, mesmo possuindo uma construção simples, com uma câmara de biodigestão escavada no solo e um gasômetro inflável feito de material plástico ou similar, como mostrado na figura 8.

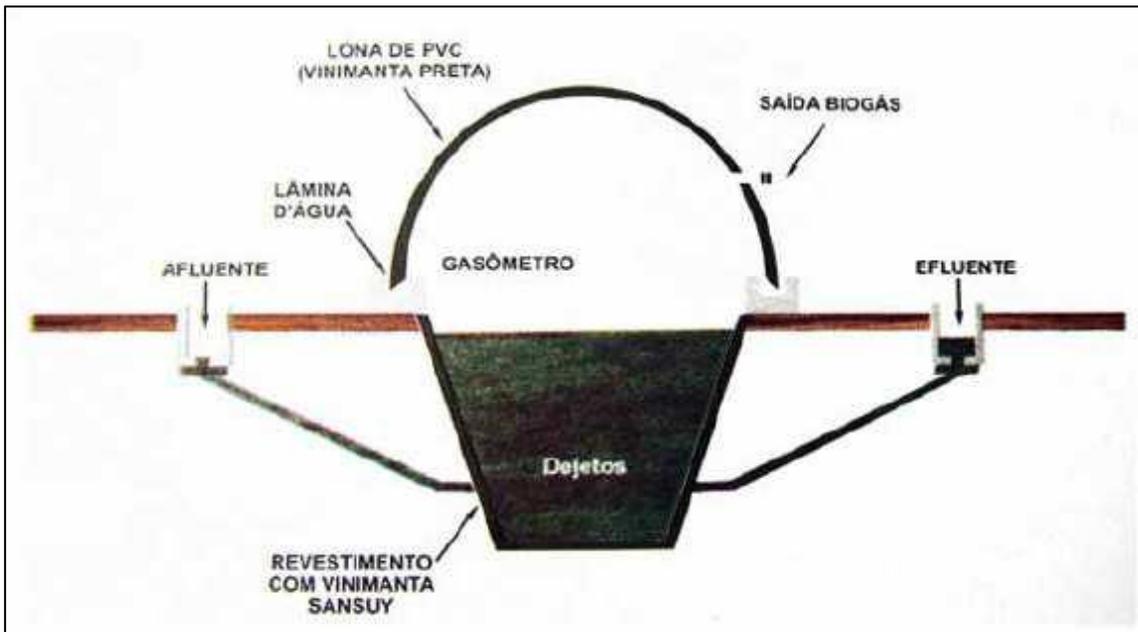


Figura 8 - Biodigestor tipo canadense (Fonte: Manual de Treinamento em Biodigestão (2008))

Esse biodigestor é do tipo horizontal, com uma caixa de entrada em alvenaria, onde a profundidade é menor que a largura, para que o substrato tenha maior exposição ao sol a fim de aumentar a produção de biogás e evitar o entupimento do duto de entrada.

Durante a produção de biogás, a cúpula de material plástico maleável infla, acumulando o biogás. Nesse tipo de biodigestor, podemos ainda enviar o biogás para um gasômetro separado para obtermos um maior controle.

Atualmente esse tipo de biodigestor é o mais difundido no mundo, e mais aplicado também no Brasil, sendo largamente utilizado em propriedades rurais. Por ser construído basicamente de material plástico, esse biodigestor apresenta construção bastante simples, porém possui menor durabilidade e está sujeito a acidentes, como no caso de haver perfuração da lona plástica, com vazamento de gás.

Na foto 1, vemos um biodigestor modelo canadense, instalado na Estação Experimental de Caraíbas, em Jaguari/BA.



Foto 1 - Biodigestor canadense utilizado na Estação Experimental de Caraíbas - EBDA (Jaguarari - BA) (Fonte: Manual de Treinamento em Biodigestão (2008))

### 3.3. Dimensionamento de biodigestores

Ao escolhermos a localização de um biodigestor, durante seu dimensionamento, devemos observar alguns fatores:

- Facilidade de transporte da biomassa a ser carregada diariamente;
- Facilidade de remoção e transporte para utilização do biofertilizante produzido;
- Distância para utilização do biogás.

O biodigestor não pode ficar em um local de difícil acesso, nem muito distante, pois isso implicaria em uma grande dificuldade para operação do mesmo. O sistema de geração de energia deve ficar protegido, e mantendo distâncias seguras em relação ao biodigestor. Em biodigestores modelo canadense, constituídos basicamente de mantas plásticas, o biogás tem pouca pressão e devido a isso pode ser transportado por, no máximo, 50 m. Porém, é recomendado no Manual de Treinamento em

Biodigestão que o biodigestor seja instalado a, pelo menos, 10 m de quaisquer edificações.

Podemos estimar o tamanho do biodigestor que iremos construir através do volume necessário para suportar o volume de carga diária pelo período de retenção necessário para que ocorra a fermentação. Para essa estimativa usamos a seguinte fórmula:

$$VB = VC \times TRH \quad (1)$$

Onde:

VB = Volume do biodigestor (m<sup>3</sup>);

VC = Volume de carga diária (solução de dejetos + água) (m<sup>3</sup>/dia);

TRH = Tempo de retenção hidráulica (dias).

Nosso volume de alimentação diário do biodigestor dependerá do tipo de matéria orgânica utilizada e da quantidade de animais existentes na propriedade. Para esse cálculo, devemos saber a média de produção de esterco referente a cada tipo de animal e a quantidade de água necessária para a preparação da carga do biodigestor.

A tabela 5, apresentada abaixo, nos ajuda a calcular o volume diária de carga, apresentando esses índices para diversos animais.

Tabela 5 - Tabela de cálculo do volume de carga diária (Fonte: Manual de Treinamento em Biodigestão (2008))

Animal	Esterco por animal (kg)	Quantidade de animais	Total de esterco (kg)	Relação esterco:água	Volume de água (m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	Volume de carga (m <sup>3</sup> )
	A	B	C = A x B	D	E = C x D	F = C + E
Caprino/ovino <sup>2</sup>	0,5			1:4 a 5		
Vaca	7,0			1:1		
Vaca leiteira <sup>3</sup>	25,0			1:1		
Bezerro <sup>2</sup>	2,0			1:1		
Boi <sup>3</sup>	15,0			1:1		
Suíno	4,0			1:1,3		
Total						

O tempo de retenção hidráulico também varia de acordo com a fonte de matéria orgânica. Para bovinos e suínos, esse tempo é de 35 dias, em média, enquanto que para caprinos temos um tempo de 45 dias e 60 dias para aves.

Para o cálculo preciso das principais dimensões do biodigestor, apresentado na figura 9, usaremos o modelo matemático desenvolvido por Ribeiro (2011), que foi baseado nas sugestões de Ribeiro (2004), que desenvolveu diferentes tipos de biodigestores canadenses com fossas trapezoidais que são utilizados por pequenos produtores na América Central.

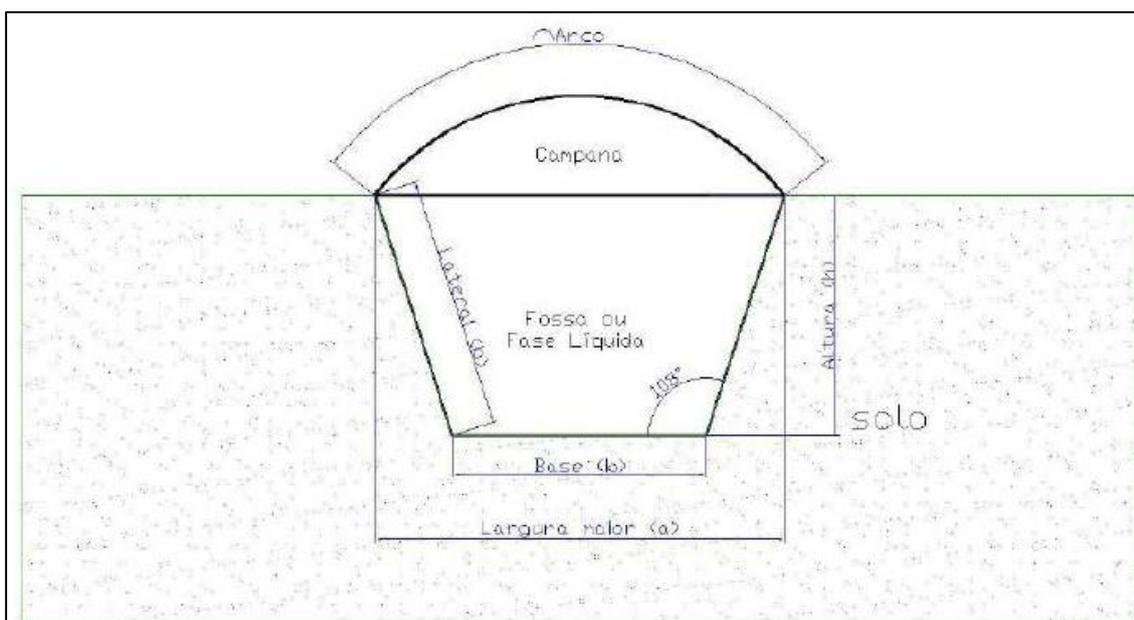


Figura 9 - Seção transversal do biodigestor tipo canadense (Fonte: Ribeiro (2009))

No desenvolvimento dessas equações, Ribeiro (2011) ajustou os parâmetros utilizando um método iterativo, relacionando os parâmetros da figura 9 com a proporção entre gás e fase líquida, para valores dessa proporção inferiores a 40%, pois acima desse valor, segundo Ribeiro (2011) e Botero (2008), o volume da fase líquida não seria capaz de manter a campana cheia de biogás levando o biodigestor ao colapso.

Segundo Ribeiro (2011), os modelos foram testados através de regressões realizadas utilizando o Excel 2007 e após isso duzentas variações possíveis foram simuladas no AutoCAD 2009, provando que o modelo é eficaz para aplicações reais. As equações obtidas por esse modelo estão apresentadas na tabela 6, e suas variáveis apresentadas na figura 9 apresentada anteriormente.

**Tabela 6 - Equações para cálculo das dimensões do biodigestor (Fonte: Holos, ano 27, Vol. 1 – Riveiro (2011))**

<b>Fórmula</b>	<b>Descrição</b>
$P = C = 2r\pi$ (Eq. 2)	P = perímetro total transversal (campana mais fossa) C = circunferência da bolsa r = raio da bolsa plástica
$A\% = 0,621 p^2 - 0,042 p + 0,352$ (Eq. 3)	A% = porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco p = proporção da fase gasosa desejada ( $p \leq 0,4$ )
$b = (-1/3 A\% + 1/3)P$ (Eq. 4)	b = lateral, base ou largura menor da fossa
$a = 1,618b$ (Eq. 5)	a = largura maior da fossa
$h = 0,951b$ (Eq. 6)	h = profundidade da fossa
$A_f = 0,4755(a+b)b$ (Eq. 7)	A <sub>f</sub> = área transversal da fossa
$A_t = A_f / (1-p)$ (Eq. 8)	A <sub>t</sub> = área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana
$A_g = A_t - A_f$ (Eq. 9)	A <sub>g</sub> = área transversal da campana ou área transversal destinada para o gás
$V_t = A_t L$ (Eq. 10)	V <sub>t</sub> = volume total do biodigestor (campana mais gás) L = comprimento do biodigestor
$V_f = A_f L$ (Eq. 11)	V <sub>f</sub> = volume total da fossa
$V_g = A_g L$ (Eq. 12)	V <sub>g</sub> = volume total do gás

Para utilização dessas equações, devemos selecionar os parâmetros iniciais, comprimento (L), raio da bolsa (r) e a proporção de fase gasosa (p), que deve ser

menor que 0,4. Esses parâmetros são escolhidos condicionados ao volume estimado do biodigestor da equação 1.

As dimensões da caixa de entrada devem ser suficientes para que seu volume suporte o volume de carga diário, enquanto que para a caixa de saída o dimensionamento é feito para um volume, no mínimo, três vezes o volume da carga diária, para que o biofertilizante seja armazenado.

### **3.4. Instalação do biodigestor**

De acordo com o Manual de Treinamento em Biodigestão (2008), os procedimentos de instalação do biodigestor são:

- Escavar um buraco no solo, com as medidas definidas no projeto de dimensionamento;
- Escavar um buraco maior, na saída do biodigestor, para acomodar o tonel ou caixa de saída de biofertilizante;
- Abrir a manta plástica de PVC sobre o buraco;
- Colocar tubos e colar mangas da manta no biodigestor;
- Fixar o perímetro da manta plástica, enterrando-o, ou com selo d'água;
- Instalar a tubulação de biogás;
- Iniciar a carga.

Na instalação é muito importante selarmos a campânula do biodigestor, onde o biogás será armazenado. Para isso podemos enterrar as bordas da manta de PVC ou usar um selo d'água, que será um pequeno tanque d'água que deve circundar o biodigestor, e a manta de cobertura do biodigestor ficaria presa no fundo do tanque, com a água fazendo a selagem da câmara.

### **3.5. Materiais para construção de um biodigestor**

A instalação de um biodigestor modelo canadense é bastante simples e os materiais necessários são:

- Caixa de alvenaria ou fibra para caixa de entrada;
- Manta de cobertura de PVC flexível de 1,0 mm;
- Tubulação de PVC de 150 mm para esgoto (branca), para a entrada de dejetos e saída de biofertilizante;
- Tubulação e conexões de PVC de 1" para água (marrom) para a condução do biogás;
- Caixa de alvenaria ou fibra para o armazenamento do biofertilizante.

A utilização da tubulação de 1" é utilizada quando usamos o biodigestor alimentando um motor de combustão interna, afim de obtermos vazão suficiente para operação do mesmo, para utilização direta em outros equipamentos deve ser usado o diâmetro de  $\frac{3}{4}$ ".

É importante também que as emendas das tubulações sejam bem vedadas, com cola especial ou fita própria para vedação, a fim de evitar vazamentos. Mesmo assim é importante a realização de testes de vazamentos, banhando as conexões com água e sabão.

### **3.6. Operação do biodigestor**

A operação diária do biodigestor é bastante simples, e deve seguir os seguintes passos:

- Manter os animais presos no curral durante uma parte do dia ou à noite;
- Coletar o esterco pela manhã e depositar na caixa de entrada;
- Adicionar água em proporção correta, de acordo com o indicado para o substrato utilizado;

- Misturar e liberar para o biodigestor, através da caixa de carga;
- Retirar e aplicar o fertilizante nas hortas;
- Utilizar o biogás para cozimento, aquecimento, geradores de energia elétrica.

#### 4. Estudo de caso

##### 4.1. Local do estudo

Nesse trabalho, vamos desenvolver um estudo de viabilidade, para instalação de um biodigestor modelo canadense com finalidade de geração de energia na Fazenda Aterrado, propriedade apresentada na foto 2, abaixo, localizada na Estrada do Aterrado, 1001, no distrito de Dorândia, em Barra do Piraí/RJ. A propriedade é voltada para a criação de bovinos de leite.



Foto 2 - Vista aérea da propriedade (Fonte: Google maps)

Os estudos realizados visam, além de uma economia de energia elétrica, um melhor saneamento dos dejetos bovinos, que após inseridos no biodigestor, saem em forma de biofertilizantes, apresentando características melhores de adubação e menor impacto ambiental.

O local indicado na foto com o número 1, será o local de instalação do biodigestor, que foi escolhido o modelo canadense, por ser de mais fácil instalação e menor custo.

#### 4.2. Dimensionamento

Na propriedade, existem hoje 40 vacas produzindo leite, 38 bezerros e 2 bois. Esses animais serão os responsáveis por produzir o substrato utilizado em nosso biodigestor. Sendo assim, a tabela 7, apresenta o cálculo da carga diária produzida no curral da fazenda, já levando em conta a adição de água para preparação do material orgânico para a fermentação.

Tabela 7 - Cálculo da carga diária (Fonte: Manual de Treinamento em Biodigestão (2008))

Animal	Esterco por animal (kg/dia)	Quantidade de animais	Total de esterco (kg/dia)	Relação esterco :água	Volume de água (L)	Volume de carga (dm <sup>3</sup> /dia)	Volume de Carga (m <sup>3</sup> /dia)
	A	B	C = A x B	D	E = C x D	F = C + E	G = F / 1000
Vaca leiteira <sup>2</sup>	25	40	1000	1:1	1000	2000	2
Bezerro <sup>1</sup>	2	38	76	1:1	76	152	0,152
Boi <sup>2</sup>	15	2	30	1:1	30	60	0,06
<b>Total</b>	-	<b>80</b>	<b>1106</b>	-	<b>1106</b>	<b>2212</b>	<b>2,212</b>

Temos então uma carga diária de 2,12 m<sup>3</sup> de substratos a serem adicionados no biodigestor. Para calcular o volume necessário do biodigestor, iremos considerar um adicional de 10% nesse valor, para suportar alguma variação de carga que possa acontecer. Então, utilizando a equação (1) apresentada anteriormente.

$$VB = VC \times TRH$$

$$VB = 2,4332 \text{ m}^3/\text{dia} \times 35 \text{ dias}$$

$$VB = 85,16 \text{ m}^3$$

Esse valor será a base de comparação para nosso cálculo das dimensões do biodigestor. Utilizando as equações (2) até (12), e o Excel como ferramenta de cálculo, calculamos as dimensões que melhor se encaixam a fim de obter um volume próximo ao encontrado acima. Para início dos cálculos, adotamos os valores para o raio da bolsa plástica (r), a proporção de fase gasosa desejada (p) e o comprimento do biodigestor (L), indicados abaixo.

$$r = 2,00 \text{ m}$$

$$p = 0,40$$

$$L = 8,00 \text{ m}$$

O raio (r), foi escolhido assim para que não ultrapassa-se a altura da fossa, a proporção (p) foi escolhida conforme o máximo valor admitido para manter a campana cheia de gás e o comprimento (L) foi escolhido iterativamente otimizando as dimensões do biodigestor.

Os valores encontrados para as dimensões do biodigestor estão apresentados na tabela 8, abaixo.

**Tabela 8 - Dimensões calculadas do biodigestor**

<b>Parâmetros</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valores</b>
P	P = perímetro total transversal (campana mais fossa)	12,57 m
A%	A% = porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco	43%
b	b = lateral, base ou largura menor da fossa	2,37 m
a	a = largura maior da fossa	3,83 m
h	h = profundidade da fossa	2,25 m
A <sub>f</sub>	A <sub>f</sub> = área transversal da fossa	6,98 m <sup>2</sup>
A <sub>t</sub>	A <sub>t</sub> = área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana	11,64 m <sup>2</sup>
A <sub>g</sub>	A <sub>g</sub> = área transversal da campana ou área transversal destinada para o gás	4,66 m <sup>2</sup>
V <sub>t</sub>	V <sub>t</sub> = volume total do biodigestor (campana mais gás)	93,11 m <sup>3</sup>
V <sub>f</sub>	V <sub>f</sub> = volume total da fossa	55,87 m <sup>3</sup>
V <sub>g</sub>	V <sub>g</sub> = volume total do gás	37,25 m <sup>3</sup>

A caixa de entrada deve ter volume pelo menos igual ao da carga diária, portanto faremos a caixa com um volume um pouco maior, igual a 3,00 m<sup>3</sup>. A caixa de saída deve ter volume igual a três vezes o volume da caixa de entrada, a fim de conseguir conter possíveis acúmulos de biofertilizante, então terá 9,00 m<sup>3</sup>.

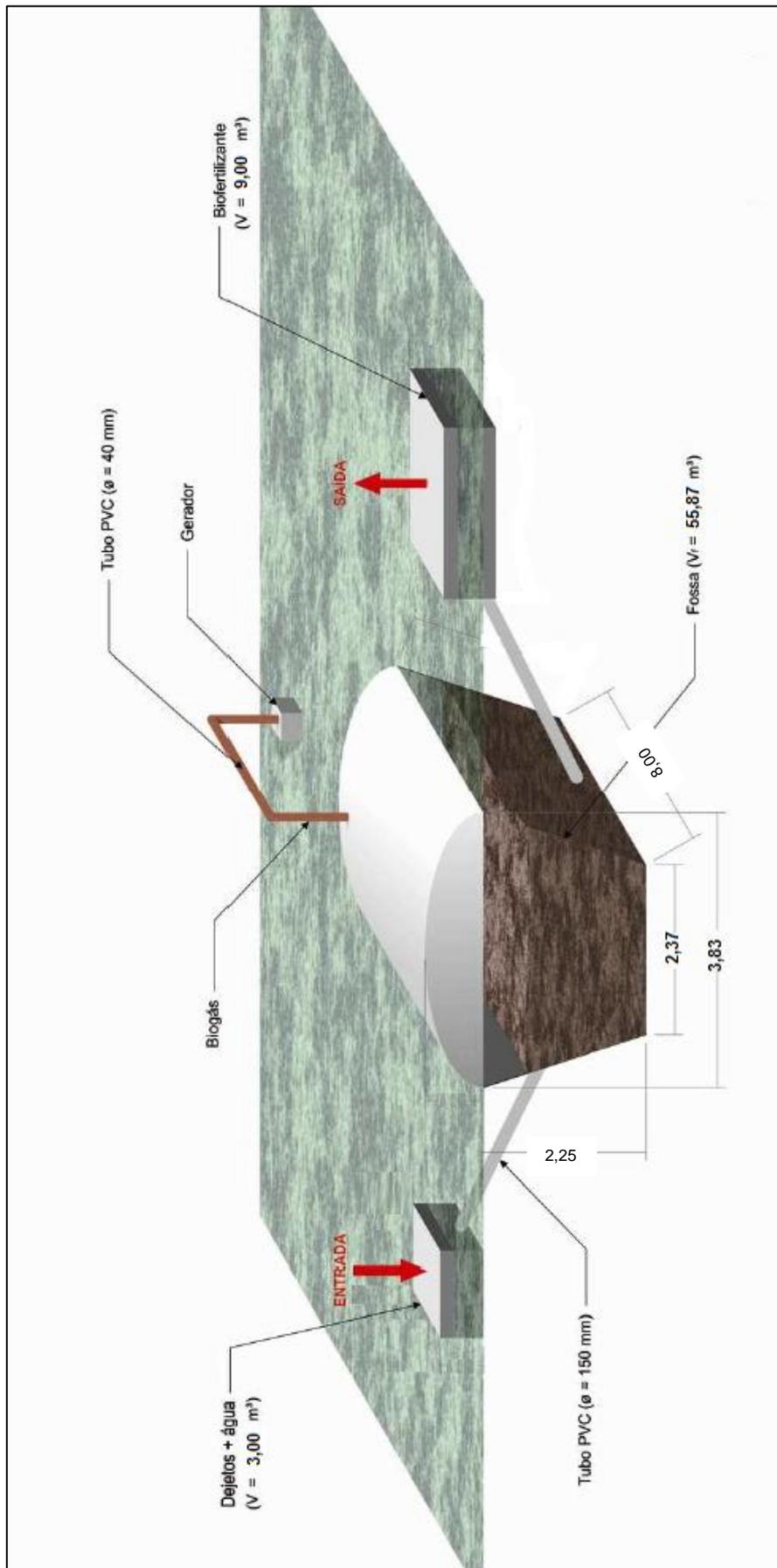


Figura 10 - Esquema do sistema de biodigestor a ser instalado na propriedade

### 4.3. Produção de biogás

De acordo com o volume diário de substrato produzido pelos animais da fazenda, e com a relação de produção de biogás apresentada na tabela 9, podemos calcular a produção diária e mensal de biogás em nosso biodigestor, a fim de verificarmos o potencial de geração de energia apresentado. A tabela abaixo apresenta o cálculo da produção de biogás da fazenda.

Tabela 9 - Produção de biogás na propriedade

Item	Valor	Unidade
Total de esterco/dia	1106	kg/dia
Total de biogás/dia	52,67	m <sup>3</sup> /dia
Total de biogás/mês	1580	m <sup>3</sup> /mês

O biogás gerado será utilizado como combustível em um conjunto moto gerador, com fim de geração de energia para atender as demandas do curral.

### 4.4. Seleção do gerador

Para selecionarmos um gerador que atenda as necessidades do curral, precisamos enxergar os equipamentos presentes, que dependem de eletricidade para seu funcionamento. No curral da fazenda estão presentes os seguintes equipamentos:

- 1 ordenhadeira mecânica – motor de 3 cv (2,2 kW)
- 1 picadeira de capim – motor de 3 cv (2,2 kW)
- 1 tanque de resfriamento de leite – refrigeração de 700 W
- 2 lâmpadas incandescentes – 100 W

As fotos abaixo nos mostram cada um desses equipamentos.



Foto 3 - Ordenhadeira mecânica



Foto 4 - Picadeira de capim



Foto 5 - Tanque de resfriamento de leite

Devemos calcular a corrente de partida de cada equipamento, para que possamos então averiguar qual gerador servirá para nosso serviço.

A figura 10, abaixo, nos mostra a plaqueta do motor empregado no sistema da ordenhadeira mecânica.

~ 1		N56	kW(cv) 2,2(3,0)		Motor de Indução - Gaiola	
Hz 60	RPM 1690	Ip/In 4,10	110-127V	220-254V		
IP 21	ISOL. F	AMB. 40°C				
REG. S1	COSØ 0,80	REND. 65%	PARA INVERTER ROTAÇÃO TROCAR T5 PELO T8			
FS 1,00	12,90-13,00/ 8,80- 9,00 A		CAP. - 540...648uF/110Vac			
ROL 6204 ZZ				ROL 6203 ZZ		
T1-AZUL		T2-BRANCO		T3-LARANJA		
T4-AMARELO		T5-PRETO		T8-VERMELHO		

Figura 11 - Plaqueta do motor da ordenhadeira mecânica

Para calcular a potência de partida, precisamos calcular inicialmente a corrente de partida. As equações (13) e (14) são utilizadas para esses cálculos.

$$C_p = C \times (I_p/I_n) \quad (13)$$

$$Pot_p = C_p \times V \times \cos \varphi \quad (14)$$

Onde:

- $C_p$  : corrente de partida
- $C$  : corrente nominal
- $Pot_p$  : potência de partida
- $V$  : corrente nominal

Portanto, para o motor da ordenhadeira, utilizando as equações acima, o cálculo da potência de partida é:

$$C_p = 8,8 \text{ A} \times 4,1 = 36,08 \text{ A}$$

$$Pot_p = 36,08 \text{ A} \times 220 \text{ V} \times 0,80 = 6,35 \text{ kW}$$

O mesmo pode ser feito para o motor da picadeira de capim, que embora apresente a mesma potência nominal, apresenta valores de  $I_p/I_n$  e  $\cos \varphi$  diferentes, como pode ser visto na foto 6, de sua plaqueta.



Foto 6 - Plaqueta do motor da picadeira de capim

Então:

$$C_p = 8,8 \text{ A} \times 6,4 = 56,32 \text{ A}$$

$$Pot_p = 56,32 \text{ A} \times 220 \text{ V} \times 0,81 = 10,04 \text{ kW}$$

As lâmpadas incandescentes não apresentam discrepância em sua potência nominal durante a partida. Já o sistema de resfriamento de leite, funciona com um compressor hermético, semelhante a uma geladeira e apresenta corrente de partida equivalente a cerca de quatro vezes a potência nominal, portanto:

$$Pot_p = 700 \text{ W} \times 4 = 2,8 \text{ kW}$$

A tabela abaixo relaciona os equipamentos existentes no curral e suas respectivas potências de partida.

Tabela 10 - Potência dos equipamentos instalados

Equipamento	Potência nominal	Potência de partida
Ordenhadeira mecânica	2,2 kW	6,35 kW
Picadeira de capim	2,2 kW	10,04 kW
Tanque de resfriamento de leite	0,7 kW	2,8 kW
Lâmpada incandescente	0,1 kW	0,1 kW

A picadeira de capim funciona sempre sozinha, antes da partida dos outros equipamentos por isso, na escolha do gerador a ser utilizado, iremos considerar como

potência máxima a ser atendida, a soma entre as potências de partida da ordenhadeira, do tanque de resfriamento e das duas lâmpadas. A potência máxima requerida é então:

$$Pot_{\text{máx}} = 6,35 \text{ kW} + 2,8 \text{ kW} + (2 \times 0,1 \text{ kW}) = 9,35 \text{ kW}$$

Como esse valor é menor que a potência de partida do motor da picadeira de capim, a potência máxima a ser entregue pelo gerador deve ser de 10,04 kW.

A potência nominal do gerador deve ser maior que a soma das potências nominais dos equipamentos, sendo então:

$$Pot = (2 \times 2,2 \text{ kW}) + 0,7 \text{ kW} + (2 \times 0,1 \text{ kW}) = 5,3 \text{ kW}$$

Como medida de segurança, considerando que existirão perdas nos cabos de transmissão de energia, vamos considerar um acréscimo de 25% na potência nominal calculada. A potência requerida ( $Pot_r$ ) é então:

$$Pot_r = Pot + (25\% Pot) = 5,3 \text{ kW} + (0,25 \times 5,3 \text{ kW}) = 6,63 \text{ kW}$$

Selecionamos então, o gerador da foto 7, abaixo, que tem potência máxima de 10,5 kW e potência nominal de 9,5 kW, atendendo assim, nossas necessidades.

Outros geradores foram considerados, inclusive modelos específicos para biogás, porém esses modelos apresentam um custo muito elevado.

Para utilização desse gerador devemos utilizar um filtro antes da alimentação de biogás no motor, conforme figura 12, abaixo.

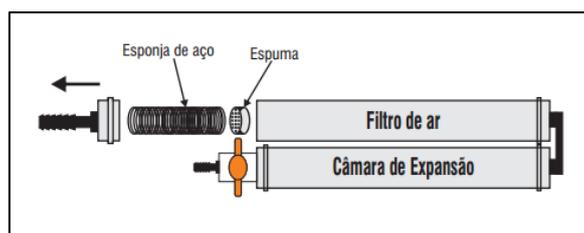


Figura 12 - Filtro de biogás (Fonte: Manual usuário biogás, Motogeradores Branco)

Esse gerador é equipado com um motor ciclo Otto, com razão de compressão de 8:1. Para a operação com biogás, devemos usinar o cabeçote do motor para elevarmos a razão de compressão para 12,5:1, esta razão elevada é possível pois o poder antidetonante do gás está ligado ao número de metano do mesmo. Devemos alterar também os came do sistema de ignição em 45°, a fim de adiantarmos a ignição, pois o biogás demora mais para detonar. Segundo Souza, *et al.* (2004), esses são os parâmetros ótimos de operação de um motor ciclo Otto operando com biogás. O sistema de alimentação do motor também deve ser modificado, instalando-se um tubo metálico de aproximadamente 10 centímetros no coletor de admissão do motor, onde será conectada a tubulação de biogás para alimentação do motor.

O motor deve ser iniciado sempre na gasolina e após entrar em operação, é realizada a abertura da tubulação de biogás e fechamento da alimentação de gasolina, trocando então o combustível.



Foto 7- Motogerador selecionado (Fonte: [www.toyama.com.br](http://www.toyama.com.br))

#### 4.5. Geração de energia

A tabela 11, apresenta os dados técnicos do motor do gerador selecionado.

Tabela 11 - Especificações técnicas do motor do conjunto motogerador (Fonte: Manual de operação gerador a gasolina, toyama)

Modelo	TG690G
Tipo	Refrigeração a ar - 4 tempos - OHV
Saída Nominal	14,0 kW / 3600 rpm
Cilindrada	688 cc
Nº de Cilindros	2
Consumo de Combustível	370 g/kWh

Podemos ver que, esse motor, quando trabalha com gasolina, tem um consumo de 370 g de combustível para cada kWh gerado, para uma potência nominal de 14 kW, podemos encontrar o consumo específico.

$$B = \text{Cons.} \times \text{Pot}_n \quad (15)$$

Então,

$$B = 370 \text{ g/kWh} \times 14 \text{ kW} = 5180 \text{ g/h} = 5,18 \text{ kg/h}$$

Durante uma hora de operação, esse motor consome 5,18 kg de gasolina de posto.

Para sabermos a equivalência em biogás, vamos comparar um litro de gasolina de posto com 1 m<sup>3</sup> de biogás.

Segundo normas regulamentares da Agência Nacional de Petróleo (ANP), a gasolina vendida em postos de gasolina, possui 25% de etanol anidro e 75% de gasolina, que em nossas contas iremos aproximar pelo octano (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>). Então, em um litro de gasolina de posto, temos 0,25 l de etanol e 0,75 l de gasolina.

Segundo informações disponíveis no site da Petrobrás, a massa específica do etanol anidro é de 791,5 kg/m<sup>3</sup> e a massa específica da gasolina é de 750 kg/m<sup>3</sup>, teremos em um litro de gasolina as seguintes massas dessas substâncias:

$$m_{\text{gasolina}} = 0,00075 \text{ m}^3 \times 750 \text{ kg/m}^3 = 0,5625 \text{ kg de gasolina}$$

$$m_{\text{metanol}} = 0,00025 \text{ m}^3 \times 791,5 \text{ kg/m}^3 = 0,1979 \text{ kg de etanol}$$

Como os poderes caloríficos inferiores, informados nas Fichas de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ), dessas substâncias são 44422 kJ/kg e 28225 kJ/kg, para a gasolina e o etanol, respectivamente, um litro de gasolina comum de posto terá uma energia igual a:

$$E_{\text{gasolina posto}} = (0,5625 \text{ kg} \times 44422 \text{ kJ/kg}) + (0,1979 \text{ kg} \times 28225 \text{ kJ/kg})$$

$$E_{\text{gasolina posto}} = 30573,1 \text{ kJ}$$

Sabemos que o biogás apresenta poder calorífico inferior de 23000 kJ/m<sup>3</sup>. Dessa maneira podemos comparar o biogás com a gasolina comum de posto.

$$1 \text{ m}^3 \text{ de biogás} = 0,75 \text{ l de gasolina comum de posto}$$

A massa específica da gasolina comum de posto é:

$$\rho_{\text{gasolina posto}} = (0,75 \times 750 \text{ kg/m}^3) + (0,25 \times 791,5 \text{ kg/m}^3)$$

$$\rho_{\text{gasolina posto}} = 760,375 \text{ kg/m}^3$$

Então, em 0,75 l de gasolina comum de posto temos uma massa igual a:

$$m_{\text{gasolina posto}} = 0,75 \text{ l} \times 760,375 \text{ kg/m}^3 = 0,5703 \text{ kg} = 570,3 \text{ g}$$

Portanto, um metro cúbico de biogás equivale a 570,3 g de gasolina comum de posto.

Podemos então calcular o consumo específico do motor em metros cúbicos de biogás.

$$B_{\text{biogás}} = 370 \text{ g/kWh} / 570,3 \text{ g/m}^3 = 0,65 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{kWh}$$

Nossa produção de biogás é de 52,67 m<sup>3</sup> por dia, portanto podemos produzir cerca de 81 kWh/dia. A tabela 12 mostra o tempo que podemos operar o motor diariamente, considerando diferentes faixas de potência do gerador.

**Tabela 12 - Capacidade de operação do motogerador**

<b>Potência</b>	<b>Capacidade de operação</b>
Potência Máxima	7,7 h
Potência Nominal	8,5 h
1/2 * Potência Máxima	15,4 h

#### **4.6. Análise econômica**

##### **4.6.1. Custos de instalação**

Para orçar os custos iniciais do projeto, consideramos os preços de materiais e equipamentos necessários para instalação do biodigestor. Os valores envolvidos nos cálculos foram levantados após uma análise de mercado em três diferentes empresas.

Estão contempladas nesse cálculo o valor de maquinário para escavação e mão de obra para instalação do projeto.

O valor total encontrado foi de R\$17785,00, porém iremos considerar um acréscimo de 10% ao valor final para possíveis custos adicionais não contabilizados, com um custo final de R\$19563,50.

Os valores envolvidos no projeto estão apresentados na tabela 13 abaixo.

**Tabela 13 - Custos do projeto**

<b>Equipamentos</b>	<b>Valor Unitário</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Total</b>
Motogerador	R\$ 9.000,00	1 unid.	R\$ 9.000,00
Manta de PVC flexível de 1,0 mm	R\$ 35,00	135 m <sup>2</sup>	R\$ 4.725,00
Tubulação de PVC 150 mm	R\$ 30,00	8 m	R\$ 240,00
Tubulação de PVC 40 mm	R\$ 10,00	20 m	R\$ 200,00
Flange 40 mm	R\$ 20,00	1 unid.	R\$ 20,00
Fio elétrico 2,5 mm	R\$ 60,00	1 rolo	R\$ 60,00
Caixa de alvenaria	R\$ 750,00	2 unid.	R\$ 1.500,00
Máquina de escavação	R\$ 1.000,00	1 diária	R\$ 1.000,00
Filtro de biogás	R\$ 200,00	1 unid.	R\$ 200,00
Usinagem do motor	R\$ 1.000,00	1 diária	R\$ 1.000,00
Registro 40 mm	R\$ 40,00	1 unid.	R\$ 40,00
Mão de obra	R\$ 500,00	2 diárias	R\$ 1.000,00
<b>Total</b>	-	-	<b>R\$ 18.985,00</b>
<b>Total + 10%</b>	-	-	<b>R\$ 20.883,50</b>

Os valores mais altos envolvidos no projeto são relativos ao motogerador e à manta de PVC utilizada no biogerador.

O projeto tem uma vida útil aproximada de 10 a 15 anos, que é o tempo médio de vida do motogerador, porém é possível que ele seja reestabelecido com um custo menor, ao final desse período.

#### **4.6.2. Manutenção**

O biodigestor requer atenção para evitar rasgos na manta, e evitar reparos. A manta de PVC sofre grande desgaste por estar exposta às variações climáticas, devendo ser substituída a cada 5 anos.

A manutenção do motogerador é mais simples, contemplando troca de óleo e filtro de óleo e substituição da vela de ignição, e deve ser realizada a cada 3 meses de operação do sistema.

Abaixo vemos os planos de manutenção requeridos pelo projeto e seus respectivos custos.

**Tabela 14 - Planos de manutenção**

<b>Manutenção</b>	<b>Período</b>	<b>Custo</b>
Troca de óleo, filtro e velas	3 meses	R\$ 50,00
Troca da manta de PVC	5 anos	R\$ 4.725,00

#### **4.6.3. Análise econômica**

Em nossa análise econômica consideramos como retorno do projeto apenas os valores tangíveis com a economia de energia elétrica gerada pela utilização do biogás, apresentados na tabela 15, porém vale ressaltar que esse projeto apresenta benefícios ao meio ambiente e poderia gerar créditos de carbono, pois estamos deixando de emitir CH<sub>4</sub> para a atmosfera, ao tratar os dejetos animais, e ainda gera

biofertilizante como subproduto utilizado como adubo de qualidade superior ao utilizado anteriormente, sem tratamento.

Os créditos de carbono são gerados para cada tonelada de carbono que é absorvida ou que deixa de ser emitida. Segundo o Instituto EDP, o metano (CH<sub>4</sub>) teve potencial de aquecimento global estipulado como 21 vezes CO<sub>2</sub>, portanto temos um grande potencial nesse tipo de projeto.

**Tabela 15 - Economia de energia gerada**

Equipamento	Quant.	Potência	Tempo de operação	Consumo (kWh)	Custo
Ordenhadeira mecânica	1	2,20 kW	5 horas	11,00	R\$ 3,62
Picadeira de capim	1	2,20 kW	2 horas	4,40	R\$ 1,45
Tanque de resfriamento de leite	1	0,70 kW	8,5 horas	5,95	R\$ 1,96
Lâmpada incandescente	2	0,10 kW	3 horas	0,60	R\$ 0,20
<b>Total diário</b>	-	-	-	21,95	R\$ 7,22
<b>Total mensal</b>	-	-	-	658,50	R\$ 216,48

Para análise da viabilidade do projeto, utilizamos o método do valor presente líquido (VPL), apresentado na equação 16 abaixo, que leva em consideração a valorização do dinheiro com o tempo e o payback descontado, que avalia os investimentos pelo tempo necessário para retorno do investimento, considerando o valor presente líquido.

$$VPL = \sum \frac{FC}{(1+i)^n} \quad (16)$$

Onde:

FC = fluxo de caixa no período considerado;

i = taxa de juros considerada;

n = período considerado, sendo que n varia de 0 até o período final de consideração, que em nosso caso era o mês 120 (10 anos).

Em nossa análise consideramos a taxa de juros de poupança informada pelo Banco Central, no valor de 0,62% ao mês e o tempo útil do projeto de dez anos.

Levando em conta o investimento inicial, a economia gerada mensalmente e as manutenções previstas anteriormente, o projeto inicial não seria rentável, pois ao descontarmos os resultados obtidos mensalmente com economia de eletricidade para a data atual, o valor presente líquido do projeto seria negativo, indicando também que ele não se pagaria ao longo dos dez anos considerados.

Em nova análise vemos que para que o projeto tenha um payback descontado igual a seu período útil, considerado como dez anos, deveríamos ter o dobro de animais, para que o motogerador pudesse operar dezessete horas e durante as horas que ficaríamos somente com o refrigerador em operação deveríamos utilizar a energia excedente para alimentar outro equipamento situado na casa, como por exemplo uma geladeira. Ainda teríamos algum excedente de energia, podendo gerar ainda mais economias utilizando a energia em outros equipamentos, mas tais considerações não foram adicionadas ao cálculo.

## **5. Conclusão**

Vimos nesse trabalho que a atividade agropecuária é muito importante para a economia brasileira, e por isso uma grande fonte para estudos visando melhor aproveitamento energético e sustentabilidade.

Como forma de aproveitar uma fonte de energia renovável, podemos utilizar biodigestores nas propriedades rurais, sendo que existem diversos tipos diferentes, onde a utilização de cada um deles depende da localização geográfica, tipo de substrato utilizado e custo x benefício apresentado. No Brasil, o tipo contínuo modelo canadense é o mais utilizado.

A utilização desses biodigestores irá gerar biogás, através da digestão anaeróbia dos substratos abastecidos nos digestores. Esse biogás poderá ser utilizado como combustível, pois apresenta praticamente metade de sua composição atribuída ao gás metano.

Além do biogás, teremos como subproduto o biofertilizante, que pode ser usado como adubo orgânico, apresentando diversas vantagens se comparado com a utilização do esterco *in natura*.

Embora a utilização de biodigestores apresente grande potencial de economia energética e sustentabilidade para as propriedades rurais, vimos que no estudo de caso apresentado ao longo desse trabalho, esta implantação não seria economicamente viável, devido ao fato de termos poucos animais atualmente no curral, porém em criações maiores a instalação de projetos como esse iria gerar retorno financeiro, além das vantagens ambientais.

## 6. Referências Bibliográficas

ALVES, R. R., *et al.* Proposta de Catálogo de Atividades Rurais com Enfoque Ambiental. II Simpósio Regional de Geografia “Perspectivas para o Cerrado no Século XXI”. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2003.

AMARAL, C. C., *et al.* Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. Revista Ciência Rural, vol.34, n.º.6, p.1897-1902, nov/dez. 2004.

ARRUDA, M. H, *et al.* Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa. Revista científica de agronomia da Faculdade de Agronomia e engenharia florestal, Garça, ano I. n.º 2, dez. 2002.

BARBIERI, J. C. Gestão Ambiental Empresarial: Conceito, Modelos e Instrumentos. 3 ed. Saraiva 2011.

BARRERA, P. Biodigestores: Energia, Fertilidade e Saneamento para Zona Rural. São Paulo: Ícone, 1983.

BARROS, R. M., FILHO, G. L. T., NASCIMENTO, Y. D. S., GUSHIKEN, É., CALHEIROS, H. C., SILVA, F. G. B., JÚNIOR, A. S. Estudo da Produção de Biogás da Digestão Anaeróbia de Esterco Bovino em um Biodigestor. Revista Brasileira de Energia, Vol. 15, no 2, 2º Sem. 2009.

BEEFPOINT, Mitigação dos Gases de Efeito Estufa na Pecuária de Corte. Disponível em: <http://www.beefpoint.com.br/cadeia-produtiva/sustentabilidade/mitigacao-dos-gases-de-efeito-estufa-na-pecuaria-de-corte/>. Último acesso em julho de 2014.

BONFANTE, T. M., Análise da Viabilidade Econômica de Projetos que Visam à Instalação de Biodigestores para o Tratamento de resíduos da Suinocultura Sob as Ópticas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e da Geração de Energia. Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 2010.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – PIB Agro Cepea – USP/CNA. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/pib>. Último acesso em julho de 2014.

CHEPLUK, ALEXANDRE. Como Dimensionar Geradores. Disponível em [www.toyama.com.br](http://www.toyama.com.br). Último acesso em julho de 2014.

COLDEBELLA, A. Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica com Biogás da Bovinocultura de Leite. 2004, 9f. Dissertação (Mestrado em engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel – PR.

COLDEBELLA, A., SOUZA, S. N. M., SOUZA, J., KOHELER, A. C. Viabilidade da Coogeração de Energia Elétrica com Biogás da Bovinocultura de Leite. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2006.

COMASTRI FILHO, J. A. BIOGÁS: Independência Energética do Pantanal Matogrossense. EMBRAPA, Corumbá-MS, circular técnica nº 9, out. 1981.

DEGANUTTI, R, *et al.* Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada. In: 40 encontro de energia meio rural. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. UNESP. São Paulo, 2002.

DEUBLEIN, D; STEINHAUSER, A. Biogas From Waste and Renewable Resources: an Introduction. Weinhein-Germany: Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

DULNIK, M. R., JUNIOR, O. C., ROTTA, M., BECEGATO, V., MACHADO, W. C. P., ONOFRE, S. B. Impactos Ambientais das Atividades Agropecuárias – Estudo de Caso na Fazenda Jaguatirica. Laranjeiras do Sul, 2008.

FONSECA, F. S. T, *et al.* Análise de Viabilidade Econômica de Biodigestores na Atividade de Suinocultura na Cidade de Balsas - MA: um Estudo de Caso. In: congresso da sociedade brasileira de economia, administração e sociologia rural. Universidade Estadual do Maranhão. Maranhão, 2009.

GASPAR, R. M. B. L. Utilização de Biodigestor em Pequenas e Médias Propriedades Rurais com Ênfase na Agregação de Valor: Um Estudo de Caso na Região de Toledo-PR, 2003. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)- Faculdade de Engenharia de produção e sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2003.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Censo Agrário 2006. Disponível em

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/default.shm>  
. Último acesso em julho de 2014.

LUCAS JÚNIOR, J.; SOUZA, C. de F. Construção e Operação de Biodigestores. Viçosa-MG, CTP, 2009.

MONTEIRO, J. L. G, *et al.* Análise dos Impactos Ambientais da Atividade Agropecuária no Cerrado e suas Inter-relações com os Recursos Hídricos na Região do Pantanal. UFMT.

NEVES, V. L. V. *et al.* Construção de Biodigestor para Produção de Biogás a partir da Fermentação de Esterco Bovino. Faculdade de Tecnologia de Araçatuba. Araçatuba, 2010.

OLIVEIRA, R. D. *et al.* Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Produzido pela Fermentação Anaeróbia de Dejetos em Abatedouro e as Possibilidades no Mercado de Carbono. Faculdade de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

OLIVER, A. P. M. *et al.* Manual de Treinamento em Biodigestão. Bahia, 2008.

PECORA, V. Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP: estudo de

caso. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PROJETO BIODIGESTOR ENERGIA RENOVÁVEL. Biodigestão. Disponível em: <http://biodigestor.zzl.org/index.php?pag=biodig>. Último acesso em julho de 2014.

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.

SILVA, F. M., *et al.* Desempenho de um Aquecedor de Água a Biogás. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal-SP, vol. 25, no3, set./dez, 2005.

SILVA, L. L, *et al.* Princípios de Termoelétricas em Pequenas Propriedades Rurais. In: 2º International workshop advances in cleaner production. São Paulo, 2009.

SOUZA, S. N. M, *et al.* Custo da Eletricidade Gerada em Conjunto Motor Gerador Utilizando Biogás da Suinocultura. Revista Maringá da Universidade do Estado do Paraná – Unioeste, Cascavel, v. 26, no 2, p. 127-133, 2004.

SOUZA, J., *et al.* Desempenho de um Motor Ciclo Otto Utilizando Biogás como Combustível. In: Anais 5º Encontro de Energia no Meio Rural: 2004. [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100044&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100044&script=sci_arttext). Último acesso em 12/07/2014.

TOYAMA. Manual de Operação Gerador a Gasolina. Disponível em [www.toyamapower.com.br](http://www.toyamapower.com.br). Último acesso em julho de 2014.

VELOSO, A. V. *et al.* Aplicativo Computacional para Dimensionamento de um Biodigestor Piloto. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2011.

WEG. Características e Especificações de Geradores. Disponível em <http://www.weg.net/br/Media-Center/>. Último acesso em julho de 2014.

ZANIN, A.; BAGATINI, F. M.; PESSATTO, C. B. *et al.* Viabilidade Econômico Financeira de Implantação de Biodigestor: Uma Alternativa para Reduzir os Impactos Ambientais Causados pela Suinocultura. Universidade Comunitária da Região de Chapecó. Chapecó, 2010.

ZEN, S.; BARIONI, L.G.; BONATO, D. B. B. *et al.* Pecuária de Corte Brasileira: Impactos Ambientais e Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).