

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS HENRIQUE MARQUES POLO

**ESTUDO SOBRE A PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DO  
BIOGÁS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

MATHEUS HENRIQUE MARQUES POLO

## **ESTUDO SOBRE A PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 1, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho a minha família e amigos, pois a base de todo esse curso também dependeu da participação deles.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr Marcos Antônio de Souza Lourenço pela sabedoria e apoio com que me conduziu nesta trajetória. Ao meu Avó José Maria Marques pela inspiração em seguir este caminho. Agradeço a empresa Biosolar, em especial aos senhores Rodolfo Otto Keppeler, e Wilson Marques pelo conhecimento e a oportunidade. Gostaria de deixar registrado o reconhecimento pelo meu pai Antônio e minha mãe Silvana, pois sem eles esse caminho teria sido muito difícil. E, por fim, a meus amigos que estiveram o tempo todo do meu lado, Luís Eugenio, Marcos, Vinicius, Victor Hugo, Bruno, Ricardo e Felipe.

*“Só é digno da liberdade, como da vida, aquele que se empenha em conquistá-la.”*

***(Johann Wolfgang von Goethe)***

## RESUMO

A procura por fontes de energias alternativas tem aumentado cada vez mais nesses últimos anos devido ao pouco impacto ambiental e a algumas crises energéticas que ocorreram ao longo desses anos. Uma dessas fontes seria a utilização do biogás produzidos através do processo da digestão anaeróbica de materiais orgânicos presente no campo ou até mesmo em nosso cotidiano. Neste trabalho, será demonstrado a forma de produção do biogás e suas principais utilizações, como a cogeração de energia elétrica para a unidade e a utilização do biogás como combustível da frota que utilizam o motor diesel, e ainda o biofertilizante gerado através do substrato que fica no biodigestor após o processo em uma unidade fornecidos pela empresa Biosolar que atua no mercado da bioenergia. Com isso, surge a possibilidade de uma unidade limpa, ou seja, o que seria um problema devido ao descarte desses resíduos passa a ser fonte de energia de uma unidade inteira, o que se torna altamente rentável atendendo a todos os quesitos ambientais.

**Palavras-chave:** biogás; biodigestor anaeróbico; biodigestão.

## **ABSTRACT**

The search for alternative energy sources has grown increasingly in recent years due to low environmental impact and some energy crises that have occurred over the years. One of these sources would be the use of biogas produced by the anaerobic digestion process of organic material presented in the field or even in our daily life. In this work, It was shown the way to production of biogas and its main uses, such as cogeneration of electricity for the unit and the use of biogas as fleet fuel that use the diesel engine, and yet the bio-fertilizer generated through the substrate which is in the digester after the process in a unit provided by Biosolar company which works with bioenergy. Thus, there is the possibility of a clean unit, that is, what would be a problem due to the disposal of this residues becomes an energy source of a whole unit, which becomes highly profitable and attends all environmental items.

**Key-words:** biogas; anaerobic digester; biodigestion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo Indiano.....	17
Figura 2: Modelo Chinês .....	17
Figura 3 – Modelo de Lona.....	18
Figura 4 – Biodigestor CSTR.....	18
Figura 5 – Biodigestor de contato.....	19
Figura 6 – Filtro Anaeróbico .....	20
Figura 7 – Biodigestor UASB.....	21
Figura 8 – Biodigestor de leito híbrido.....	21
Figura 9 – Motor diesel 4 tempos .....	22
Figura 10 – Motores Stirling .....	24
Figura 11 – Motor Stirling .....	26
Figura 12 - Gráfico Aumento anual de instalação de novas unidades de biodigestão .....	27
Figura 13 - Gráfico – Aumento da produção do biogás por diferentes fontes ..	28
Figura 14 - Unidade simples de biodigestão .....	29
Figura 15 – Materiais orgânicos pela quantidade de biogás produzido por tonelada .....	31
Figura 16 – Tabela do poder calórico dos vegetais mais utilizado na biodigestão .....	32



## LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Composição do Biogás.....	16
--------------------------------------	----

## **Lista de Siglas**

CSTR- *Continuous Stirred-Tank Reactor*

USAB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

T<sub>H</sub> –Temperatura da fonte de calor alta

T<sub>L</sub> - Temperatura da fonte de calor baixa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>13</b>
2.1	Objetivo Geral .....	<b>13</b>
2.2	Objetivo Específico.....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
3.1	Justificativa.....	<b>14</b>
3.2	Digestão Anaeróbica .....	<b>15</b>
3.3	Tipos de Biodigestores.....	<b>16</b>
3.4	Motores Diesel .....	<b>22</b>
3.5	Motores Stirling .....	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
4.1	Estudo de caso.....	<b>27</b>
4.1.1	Produção do Biogás .....	<b>27</b>
<b>4.2</b>	<b>Aplicações</b> .....	<b>32</b>
4.2.1	Motores convencionais de pistão .....	<b>32</b>
4.2.2	Motores Stirling .....	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>37</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda da comunidade internacional pela diminuição da emissão de gases causadores de efeitos nocivos ao meio ambiente, existe uma necessidade cada vez maior de desenvolver e estudar tecnologias relacionadas à obtenção de energia a partir de fontes alternativas, como por exemplo: a utilização de energias eólica, solar e da biomassa.

Dentre diversas possibilidades, uma forma de se conseguir energia sustentável se dá a partir da produção e utilização do biogás proveniente de matérias orgânicas, tais como: fezes de animais, esgotos e lixo urbano.

A produção de biogás já existe há muito tempo através dos povos antigos que utilizavam a agricultura, pois eles faziam a remoção de restos e sujeiras dos terrenos e depois enterravam o que permitia-lhes observar a decomposição da matéria orgânica e a formação de um gás combustível. Embora a finalidade principal fosse a produção de adubo de modo a fazer a fertilização do solo para a agricultura com o passar dos anos, ocorreram avanços tecnológicos a partir dos quais se descobriu que tal gás poderia ser utilizado, já que o mesmo possuía características de combustível e podendo assim ser utilizado como fonte energética.

A partir de então, surgiram os modelos de biodigestores dentre os quais, dois se destacam, principalmente, pela facilidade de instalação e de operação que são os modelos indiano e chinês. Entretanto, mesmo que ambos sejam caracterizados por sistema de operação semelhantes, existem algumas poucas particularidades entre eles com relação ao sistema de liberação do biogás.

Atualmente, por meio de estudos, é possível fazer a aplicação desse gás em diversas áreas da engenharia, envolvendo tanto produção de energia elétrica, motores de combustão interna e turbinas quanto no reaproveitamento de material biodegradável.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é demonstrar uma fonte alternativa de energia e a forma de sua produção que geraria o biogás e analisar dados de uma unidade que utiliza este método.

### **2.2 Objetivo Específico**

Apresentar algumas das possíveis aplicações do biogás voltadas para a área da engenharia térmica, no caso os motores diesel e stirling.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Justificativa**

Segundo Balmant (2009), um dos principais problemas ambientais que estão ligados a agricultura é a geração de grandes quantidades de resíduos quando os animais são criados em um regime de pecuária intensiva. Os animais que estão confinados produzem uma grande quantidade de dejetos que são altamente lesivos, principalmente, quando despejados no meio ambiente, como por exemplo: algum rio, lago ou fonte de água.

Uma forma de tratar este tipo de resíduo é a biodigestão anaeróbica. Esse processo consiste na fermentação desses resíduos por bactérias na ausência de oxigênio. Assim, como resultado desse processo pode-se obter biogás e biofertilizante. O biogás é um gás composto principalmente de metano e gás carbônico que pode ser usado para geração de energia elétrica e aquecimento. O biofertilizante é um fertilizante natural, rico em nitrogênio.

De acordo com Palhares (2008), infelizmente, a biodigestão no Brasil ainda caminha a passos lentos. Mesmo possuindo um dos maiores rebanhos de suínos e aves do mundo, o Brasil não possui mais do que alguns milhares de biodigestores, sendo que a maioria dos biodigestores foi desativada devido à falta de suporte técnico e de tecnologias eficientes. Tendo como base a China, que possui 7,1 milhões de biodigestores, o Brasil está muito atrasado. As causas principais para isso são a falta de mão de obra especializada para orientar o produtor rural, falta de apoio financeiro e falta de tecnologias mais acessíveis. Com o aumento do preço do petróleo, a biodigestão voltou a ser uma fonte de energia alternativa economicamente viável em propriedades rurais. Além disso, com o protocolo de Kyoto, a utilização de biodigestores pode gerar créditos de carbono que podem ser comercializados em bolsas de valores.

De acordo com Nogueira (1986), o primeiro biodigestor foi desenvolvido em 1857 em Bombaim na Índia e tinha como finalidade produzir gás combustível para um hospital de hansenianos, tornando assim uma tecnologia de pelo menos 150 anos de estudos e tentativas de implantação. Porém, devido a alta produção de combustível fóssil até a década de 70 onde teve a primeira crise, os biodigestores só foram desenvolvidos na China e na Índia.

### 3.2 Digestão Anaeróbica

Segundo Freire (2003), a produção do biogás pode ser realizada de duas maneiras: uma delas seria do processo natural que ocorre em pântanos, rios e lagos, sendo uma importante parte do ciclo biogeoquímico do carbono, porém desta forma o biogás não é aproveitado como fonte de energia. Entretanto, a segunda forma de produção seria a partir de diversos resíduos orgânicos como excrementos de animais, lodos de esgoto, lixo domésticos, resíduos agrícolas. Neste caso, a produção é realizada através de biodigestores que realizam o processo da digestão anaeróbica. O processo da biodigestão, quando realizado de maneira controlada, fornece um gás que pode ser utilizado como combustível, e o restante sólido do processo ainda pode ser utilizado como um excelente biofertilizante.

A digestão anaeróbia é uma reação química que se baseia em três estágios, hidrólise, ácida e metanogênica, através de diversos tipos de bactérias sem a presença nenhuma de oxigênio.

Na fase da hidrólise a matéria orgânica é convertida em moléculas menores pela ação das bactérias e são divididas em duas etapas:

- Hidrolíticas – transformam proteínas em peptídeos e aminoácidos, polissacarídeos em monossacarídeos e gorduras em graxos.
- Fermentativas – transformam produtos anteriores, em ácidos solúveis e alcoóis.

Na fase ácida as bactérias acetogênicas transformam os produtos da fase hidrolíticas em:

- Ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
- Hidrogênio ( $\text{H}_2$ )
- Hidróxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )

Na fase metanogênica, as bactérias metanogênicas transformam o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), o ácido acético e o dióxido de carbono em metano ( $\text{CH}_4$ ).

Estas bactérias possuem uma extrema sensibilidade a mudanças relacionadas ao meio, como por exemplo: PH e temperatura.

Conforme Sathianathan (1975), normalmente, a produção do gás tem início no período de uma semana após a alimentação inicial quando então o gasômetro ou campânula flutua devido à força exercida pelo gás produzido. Este

gás que está sendo produzido no começo devido ao alto teor de CO<sub>2</sub> não queima, por isso deve ser eliminado através da válvula de saída fazendo com que o gasômetro desça para produzir mais gás. Esta operação deve ser repetida até que o gás queime normalmente.

Segundo (FRY, 1973), o biogás possui a seguinte composição:

Tabela 1 – Composição do Biogás

CH <sub>4</sub>	Metano	54 a 70%
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	27 a 45%
N <sub>2</sub>	Nitrogênio	0,5 a 3%
H <sub>2</sub>	Hidrogênio	1 a 10%
CO	Monóxido de Carbono	0,1%
O <sub>2</sub>	Oxigênio	0,1%
H <sub>2</sub> S	Gás Sulfúrico	Valores insignificantes

### 3.3 Tipos de Biodigestores

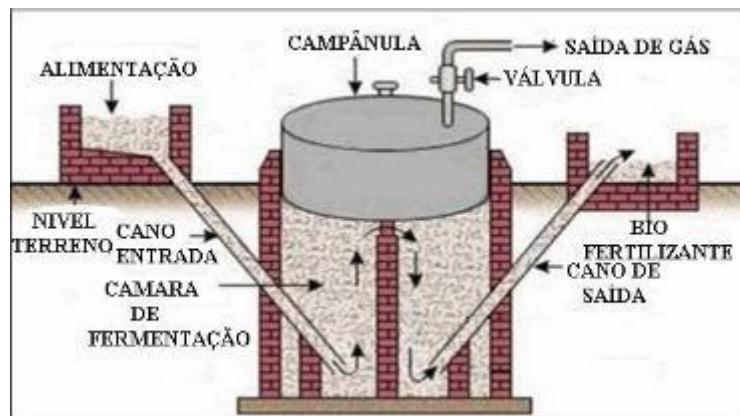
Segundo Balmant (2009), com a alta procura pela biodigestão, a tecnologia de biodigestores avançou consideravelmente, tanto na parte agrícola como na parte de tratamento sanitário, sendo assim podem ser divididos em dois grandes grupos:

- Biodigestores agrícolas
- Biodigestores sanitários

No grupo de biodigestor agrícola, o que mais se destacam são o modelo indiano e o modelo chinês pela sua forma de operação simples e por serem os mais antigos.

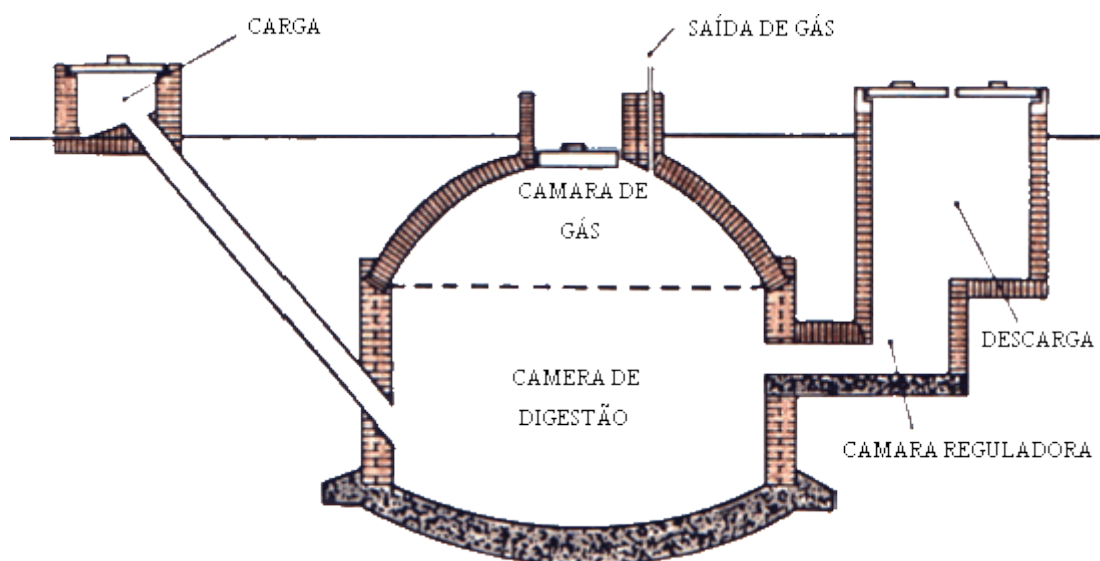


Figura 1: Modelo Indiano



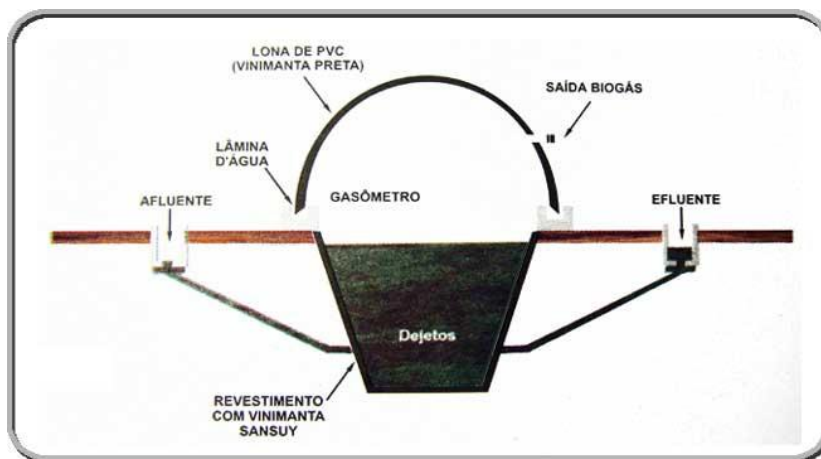
FONTE: (SEIXAS, 1980)

Figura 2: Modelo Chinês



O biodigestor de lona é também utilizado em larga escala no Brasil.

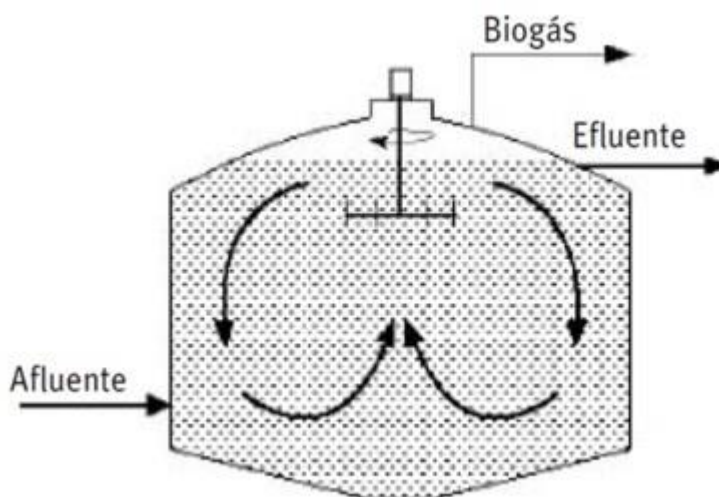
Figura 3 – Modelo de Lona



Fonte: <http://sustentabilidadetecnologica.blogspot.com.br/2011/09/biodigestor-ferramenta-para.html>

Já na classe dos biodigestores sanitários, temos o modelo CSTR que possui como característica ser um reator perfeitamente agitado.

Figura 4 – Biodigestor CSTR



Fonte: <http://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/tecnologias-de-produccion-de-biogas-digestion-anaerobia-biocombustibles/>

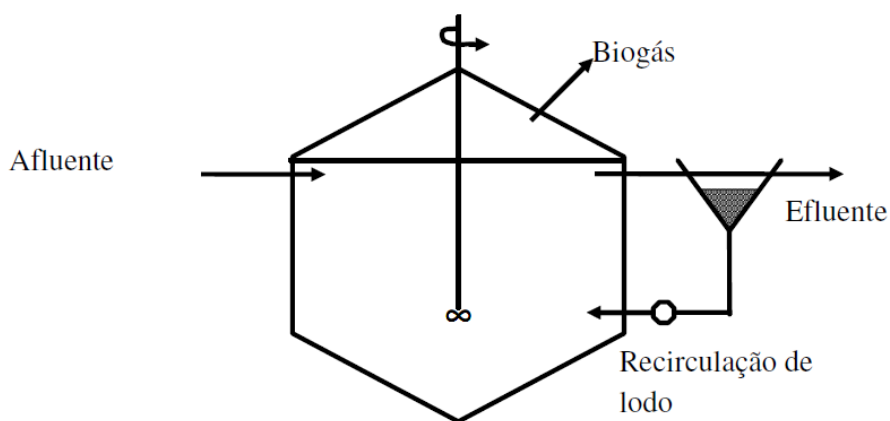
Segundo Lyberatos e Skiadas (1999), um dos fatores que impedem a uso do sistema CSTR é seu tempo de retenção hidráulica. Os biodigestores agrícolas

e o CSTR precisam de um tempo de retenção muito alto, em torno de 40 dias para que possa ocorrer o processo de maneira eficiente. Se este tempo for menos que 40 dias, ocorre falha, pois as bactérias são expelidas do reator.

Devido a este problema surgiram alguns modelos para tentar corrigir essa falha, e um deles foi o biodigestor de contato.

Conforme Oleszkiewicz e Koziarski (1982), nesse tipo de sistema, o efluente de saída é decantado e o lodo é realimentado no biodigestor. Esse lodo possui bactérias e o tempo de retenção pode diminuir um pouco. Isso pode ser explicado da seguinte forma: a taxa de diluição está acima da velocidade específica máxima de crescimento das bactérias e a concentração de bactérias tende a diminuir. No entanto, as bactérias decantadas voltam ao biodigestor através do lodo decantado.

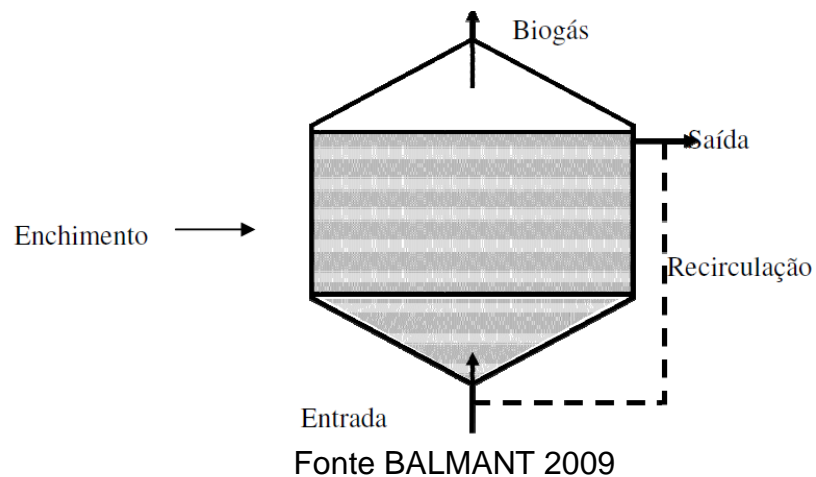
Figura 5 – Biodigestor de contato



Fonte BALMANT 2009

De acordo com Young McCarthy (1969), outro tipo de biodigestor que tenta solucionar o problema do CSTR e que é muito usado em tratamento de esgoto sanitário é o filtro anaeróbico. Nesse tipo de sistema, as bactérias crescem sobre suportes inertes e formam uma espécie de uma camada de bactérias que se fixa ao suporte. Assim, o tempo de retenção acaba diminuindo, pois as bactérias ficam ligadas a um suporte inerte e não podem ser levadas junto com a vazão de saída. Importante também que, com isso, aumenta a densidade das bactérias fazendo com que a velocidade do processo aumente.

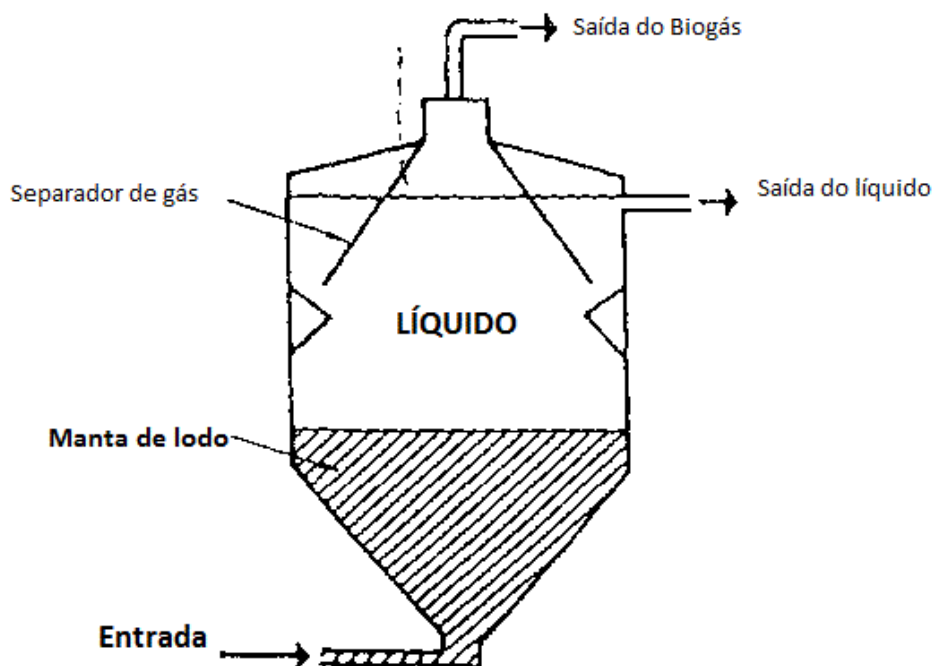
Figura 6 – Filtro Anaeróbico



Entretanto, foi proposto por Lettinga et al (1980) o modelo USAB. Neste modelo, o tempo de retenção passa a ser de poucas horas apenas. O fluxo aplicado nele é ascendente. No começo da operação são aplicadas vazões bem baixas que conforme o tempo vai passando vai formando grânulos dentro do sistema. Esses grânulos são decantados no separador de fase e os resíduos dos grânulos se depositam no fundo do equipamento, assim com o tempo forma-se uma manta de lodo no fundo cheia de grânulos de bactéria. Neste momento, as vazões podem ser aumentadas até o valor de projeto, pois, ao formar a manta de lodo, ela fica densa e pesada impossibilitando que ela seja expelida para fora do biodigestor. Como resultado, tem-se o aumento significativo do processo devido ao grande número de bactérias anaeróbicas.

Segundo Lettinga et al (1980), o USAB não é um sistema tão simples de manusear como os outros biodigestores, e se for manuseado de maneira errada, existe uma grande chance do sistema falhar. Ele exige um conhecimento microbiológico específico devido a parte de formação dos grânulos.

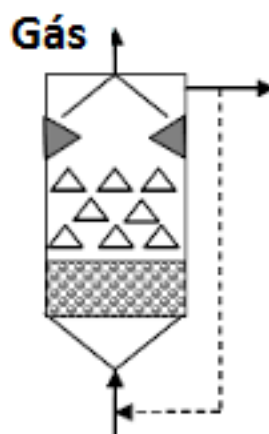
Figura 7 – Biodigestor UASB



Fonte <http://www.fao.org/docrep/t0541e/t0541e09.htm>

Com essa questão de maximizar a concentração de bactérias no biodigestor, foram propostos outros modelos e um deles foi o reator de leito híbrido que funde os dois tipos de reator. Conforme Lomas et al (1999), ele é semelhante a um USAB, porém possui um biofiltro no topo do reator, fazendo com que além da manta formado por lodo exista mais uma camada de bactéria.

Figura 8 – Biodigestor de leito híbrido



Fonte BALMANT 2009

### 3.4 Motores Diesel

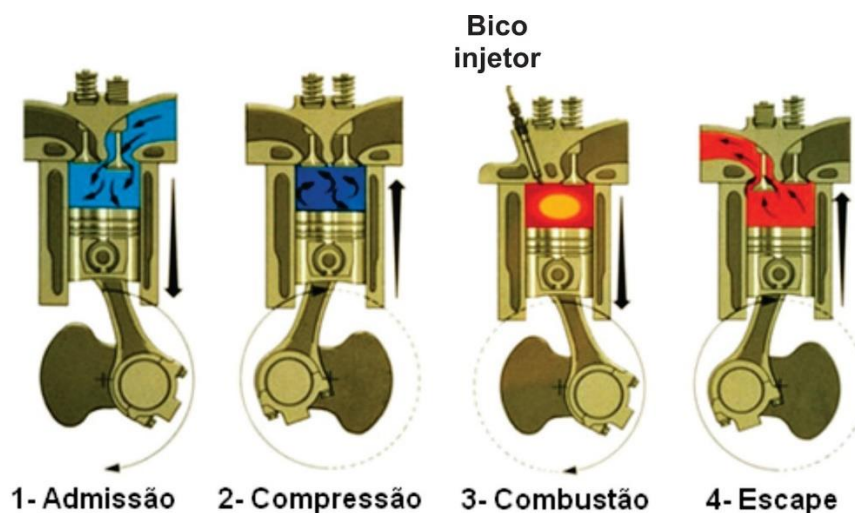
De acordo com Oliveira (2012), no motor Diesel, o óleo é inserido finamente pulverizado no interior da câmara de combustão onde encontra ar quente previamente comprimido pelo êmbolo o qual se desloca no interior de um cilindro.

A combustão do óleo acaba realizando trabalho e produzindo calor e a imediata expansão dos gases da combustão cria pressão que promove a deslocação do êmbolo. O movimento linear do êmbolo é transformado em movimento de rotação de uma cambota através de uma biela que liga aqueles órgãos.

O movimento citado, que se passa durante o trajeto descendente do êmbolo, constitui o tempo de expansão.

Neste tempo ocorre a combustão e consequente expansão dos gases, e é o único dos 4 tempos do funcionamento do motor em que é produzida potência. Para assegurar o tempo de expansão, o motor tem de cumprir dois tempos prévios e um outro posterior, sendo a totalidade dos 4 tempos.

Figura 9 – Motor diesel 4 tempos



Fonte [http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com.br/p/blog-page\\_21.html](http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com.br/p/blog-page_21.html)

No primeiro tempo, ocorre a admissão. O pistão desloca-se no sentido descendente e, pela depressão que cria, faz a sucção de ar da

atmosfera para dentro do motor através de uma válvula previamente aberta (válvula de admissão). O desenho interno do motor permite imprimir na admissão um movimento de turbilhão ao ar.

No segundo tempo, ocorre a compressão no final do tempo de admissão. Logo após, o êmbolo passar pela posição mais inferior do seu curso, que seria o ponto morto inferior, a válvula de admissão se fecha pelo o pistão ao deslocar-se no seu curso ascendente e inicia a compressão do ar.

Pouco antes do pistão atingir a posição mais elevada do seu curso, que seria o ponto morto superior, começa a injeção de combustível. Durante a compressão a temperatura do ar, atinge altas temperaturas devido ao aumento elevado da pressão. Nestas condições de pressão e temperatura, bem como, devido ao movimento de turbilhão do ar gerado pela geometria da cabeça do pistão, o combustível finamente pulverizado inflama-se assim que penetra no interior do motor. Como resultado da combustão, a pressão e a temperatura sobem ainda mais.

No terceiro tempo, ocorre a combustão onde a pressão dos gases acaba exercendo uma força na cabeça do êmbolo, provocando o seu movimento descendente e fazendo com que os gases se expandam.

No quarto e último tempo, ocorre o escape, pois um pouco antes do pistão atingir o ponto morto inferior, a válvula de escape abre. Desta forma, inicia o escape dos gases devido ao deslocamento ascendente do pistão que acaba expulsando os gases oriundos da combustão feita dentro da câmara.

Na fase de escape, pouco antes do êmbolo atingir o ponto morto superior, a válvula de admissão abre e mais um ciclo de 4 tempos se inicia. Os 4 tempos: admissão, compressão, combustão e escape, realizando 2 voltas completas da cambota, ou seja, em 4 cursos do pistão.

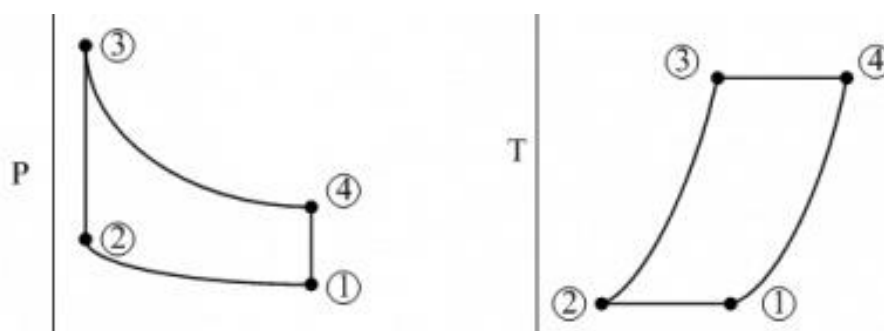
Os tempos de admissão, compressão e escape consomem parte da energia produzida no único tempo motor.

### 3.5 Motores Stirling

Segundo Puig, apesar do motor de *Stirling* não ser considerado como um motor de combustão interna, a construção e aplicação desse motor podem ser perfeitamente testada nesse ponto, particularmente, na comparação com um motor de combustão interna. O conceito elementar do motor de Stirling é um arranjo mecânico cilindro-e-pistão e uma fonte de calor que é externa ao cilindro.

O ciclo teórico do ciclo de Stirling é apresentado nos diagramas P-v e T-s.

Figura 10 – Motores Stirling



Fonte: [http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Motor\\_Stirling](http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Motor_Stirling)

Onde são divididos em quatro etapas:

- Processo 1-2: Compressão isotérmica;
- Processo 2-3: Aquecimento a volume constante;
- Processo 3-4: Expansão isotérmica;
- Processo 4-1: Arrefecimento a volume constante.

. Todo o calor obtido de uma fonte externa é fornecido isotermicamente à temperatura  $T_H$ . Calor é rejeitado isotermicamente à temperatura  $T_L$  para um recipiente ou depósito. Os dois processos de volume constante, 2-3 e 4-1 são realizados por transferência interna de calor,  $Q_{2-3} = -Q_{4-1}$ . Essa transferência interna de calor é, particularmente, significativa porque a transferência externa de calor é efetuada unicamente nos dois processos isotérmicos nas temperaturas altas e baixas do ciclo. A eficiência teórica do ciclo de Stirling é, conseqüentemente, igual a eficiência térmica do ciclo de Carnot para valores de temperaturas  $T_H$  e  $T_L$ .



Na comparação com um motor de combustão interna, o atual motor de Stirling é consideravelmente mais complexo. Uma simples máquina cilindro-pistão não pode ser construída primariamente por causa da prescrita transferência de calor regenerativa e das dificuldades encontradas na tentativa de adquirir compressão isotérmica e expansão do fluido atuante.

O modelo original de Stirling foi fundamentado no conceito da utilização de um simples cilindro equipado com dois pistões. Dois pistões, um êmbolo e um pistão de energia operam por um virabrequim. Usualmente, o pistão guia o pistão de energia por 90°. O sistema fechado é carregado com gás permanente, comumente hidrogênio ou hélio. Hidrogênio, entretanto, é considerado o fluido de trabalho mais estável para o motor de Stirling devido a sua composição. Uma câmara de combustão localizada no topo do cilindro abastece o aquecimento indireto do gás. Gás em alta pressão chega na ordem de 100 a 200 atm no motor de Stirling. O volume total de gás incluso varia com o movimento do pistão de energia. O pistão divide o volume incluso em duas regiões principais: o espaço de expansão e o espaço de compressão que são mantidos em diferentes temperaturas. O movimento do pistão muda a proporção de gás nos dois espaços ao mesmo tempo que mantém a mesma pressão do gás nas faces opostas do êmbolo. Porque o pistão opera com pressões virtualmente balanceadas, é adequada uma construção de uma fina concha de aço. Compressão e expansão do volume total de gás são efetuados pelo movimento do pistão de energia.

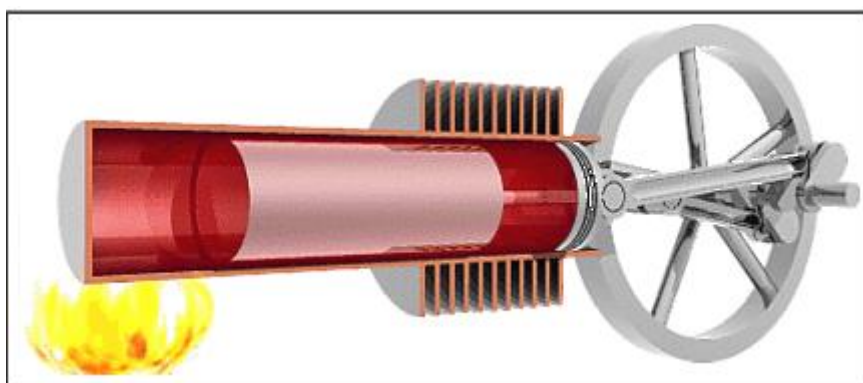
Quando o pistão está na posição mais alta do cilindro, a maioria do gás está no espaço frio. O movimento de descida do pistão causa o movimento do gás do espaço frio através do circuito de troca de calor, chamado, o refrigerador, regenerador e aquecedor, e dentro do espaço quente. O efeito em rede do aquecimento de gás é o rápido desenvolvimento de uma alta pressão de gás no espaço de expansão. Por causa da tendência para igualar pressões por todo o volume de gás, uma alta pressão é exercida na face do pistão de energia. O movimento de subida do pistão faz com que a maior parte do gás se mova do espaço de expansão através do circuito de troca de calor e dentro do espaço frio. A maior porção de gás está agora a uma baixa temperatura e uma baixa pressão no espaço de compressão sobre a face do pistão de energia. O resfriamento e aquecimento alternados do gás produz uma variação na pressão

atuante na face do pistão de energia e, conseqüentemente, uma transferência em rede de trabalho para o pistão é efetuada.

Muitos tipos de combustível podem ser queimados na câmara de combustão externa do motor de Stirling. Um combustível aceitável, entretanto, deve seguir as determinações para baixa emissão de poluentes, combustão com mínima dificuldade, e responder prontamente ao sistema de controle do motor. Um combustível líquido proveniente do carvão é uma possibilidade. A qualidade deste combustível não precisa ser tão grande quanto a da gasolina, um fator que contribui na redução do custo de produção do combustível. A maioria do calor rejeitado do motor de Stirling é transferida através do refrigerador para a atmosfera com a menor quantidade de calor cedido na exaustão de gases que são descarregados da câmara de combustão. O radiador para o motor de Stirling deve ser mais ou menos 2,5 vezes maior que o radiador necessário para um motor de combustão interna da mesma potência de saída.

O motor de Stirling opera silenciosamente com baixa emissão de poluentes. A eficiência térmica entre 0,35 e 0,40 está no limite realizado pelo motor com ignição de alta economia e superior a eficiência relatada para o motor sem ignição. O valor da eficiência térmica que excede 0,4 é previsto para os menores motores de Stirling ainda em desenvolvimento.

Figura 11 – Motor Stirling



## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Estudo de caso

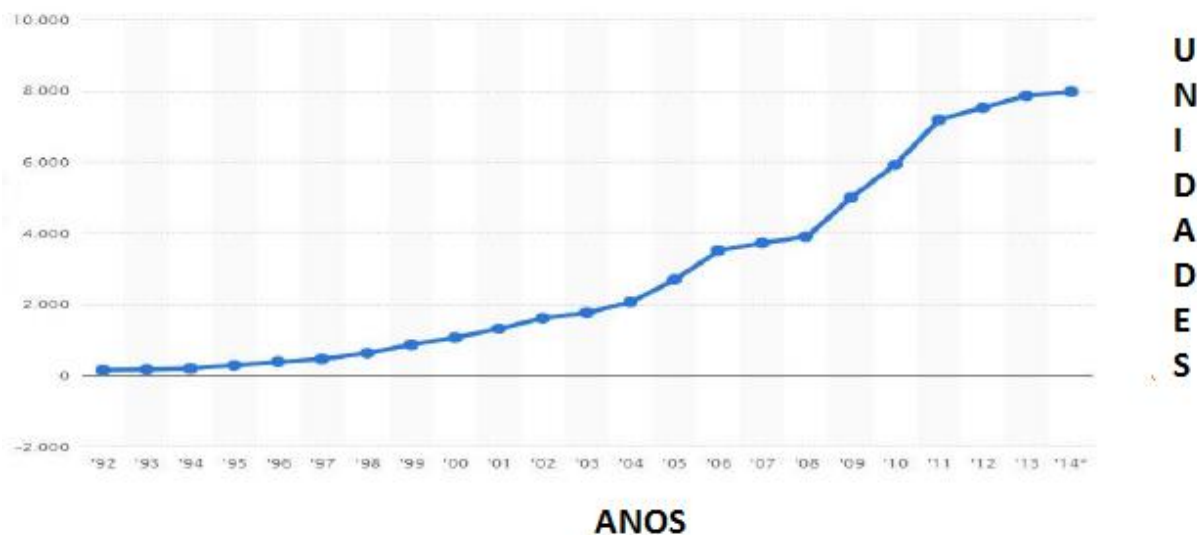
#### 4.1.1 Produção do Biogás

Para a realização deste trabalho, todas as informações e dados técnicos foram fornecidos pela empresa BIOSOLAR através de estudos e projetos que ela desenvolve no mercado de bioenergia. A tecnologia da biodigestão está sendo cada vez mais utilizada por países desenvolvidos, entre eles, um grande destaque, é a Alemanha, que mesmo possuindo um território relativamente pequeno em relação ao Brasil, por exemplo, está bem avançada neste segmento devido a pesquisas e investimentos governamentais.

Através de dados estatísticos, podemos observar o aumento de unidades que produzem o biogás na Alemanha entre os anos 1992 e 2013.

Em 2013, 7.850 unidades de biogás foram instaladas na Alemanha que correspondem a 27.9 Bilhões kWh de energia algo em torno de duas unidades termonucleares de Angra dos Reis.

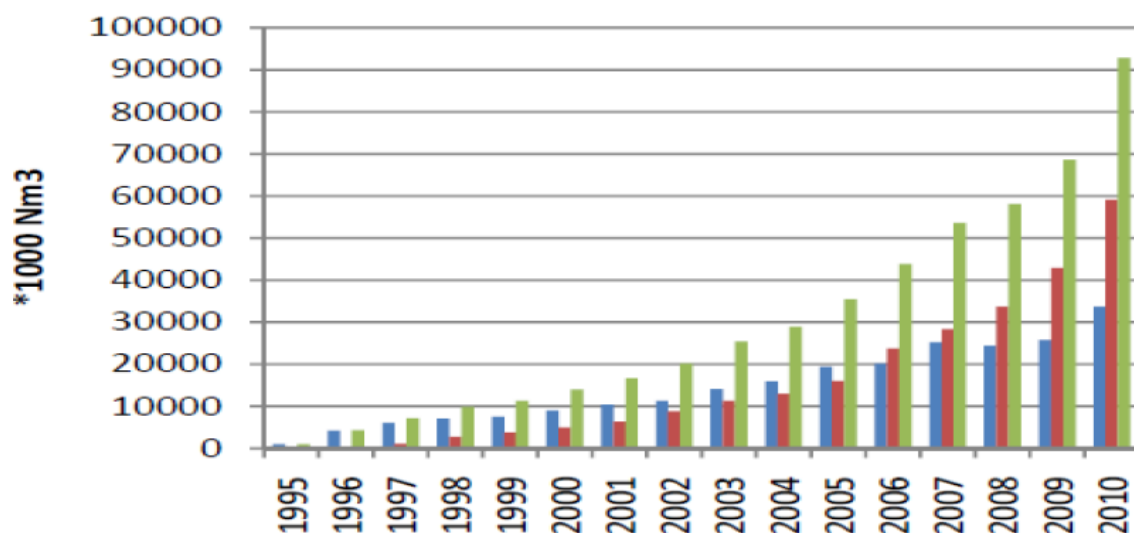
Figura 12 - Gráfico Aumento anual de instalação de novas unidades de biodigestão



Fonte <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/167671/umfrage/anzahl-der-biogasanlagen-in-deutschland-seit-1992/>

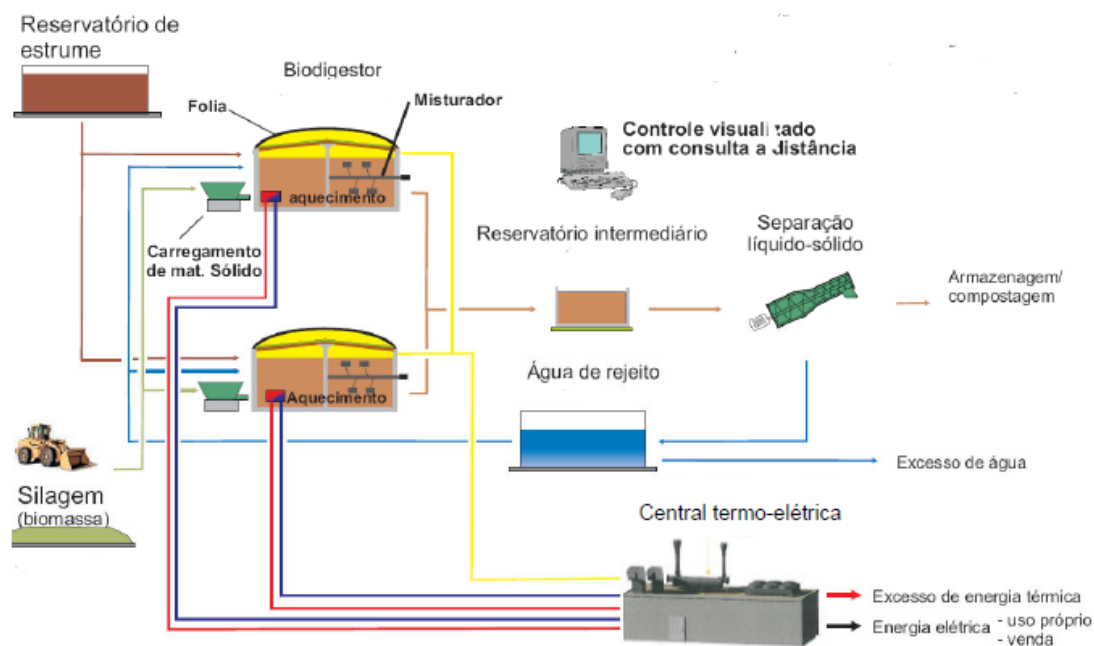
Os biodigestores alemães utilizam uma gama de biomassa sólida e líquida para geração de biogás, os quais são submetidos à combustão para a geração de energia predominantemente elétrica.

Figura 13 - Gráfico – Aumento da produção do biogás por diferentes fontes



Assim um dos projetos da empresa é uma unidade que possui a capacidade de produzir o biogás e o substrato restante se transformar em um ótimo biofertilizante através de um biodigestor anaeróbico, uma tecnologia muito utilizada nos países europeus principalmente na Alemanha.

Figura 14 - Unidade simples de biodigestão



Fonte: Biosolar

O sistema pode ser dividido em 3 partes: estocagem, digestão anaeróbica e, por fim, a sua utilização.

Na estocagem, os resíduos sólidos dos animais e a biomassa oriunda das plantações são armazenados em reservatórios através de máquinas e são levados até o biodigestor por sistemas de tubulações que para o transporte pode utilizar a gravidade ou sistema de bombeamento dependendo do tipo de implantação do biodigestor.

Em seguida, na digestão anaeróbica, quando o volume do biodigestor está cheio, o sistema é isolado de forma que o oxigênio não entre em contato com o composto orgânico gerado. Assim, através de um sistema de eixo e pás é feita a agitação deste composto durante um determinado tempo com o intuito de misturar até que as bactérias comecem o processo da digestão.

Após a realização desse processo, o biogás produzido é direcionado até a central termoelétrica onde através de turbinas ocorre a produção de energia elétrica que será utilizada pela unidade e caso a produção for acima do que a unidade demanda, pode ser vendida esta energia.

O substrato que sobrou no biodigestor é composto por sólido e líquido, por isso é retirado do equipamento e direcionado para um reservatório que em seguida passa por um separador para que apenas o produto sólido seja armazenado no intuito de utilizá-lo como biofertilizante. O líquido restante que seria a água é reaproveitado no equipamento para limpeza e o excesso pode ser aplicado em outras áreas na unidade.

Para que a unidade tenha como produto final o biogás, água de processo e o biofertilizante, alguns processos são necessários. No biogás antes do uso ele é resfriado, limpo, desidratado e concentrado, ao longo do circuito de acordo com as especificações técnicas do grupo gerador, respectivamente do fabricante e usuário do biogás. Em relação a água de processo após a evaporação e adensamento, somente traços de ácidos orgânicos(FOS) presentes são condensados juntos. A água apresenta um teor de FOS de 500mg/l quando a biodigestão se processa sem problemas. E, por fim, o biofertilizante no caso de sistemas de duas linhas de travamento, há dois fluxos de fertilizantes que juntos apresentam um alto valor nutriente.

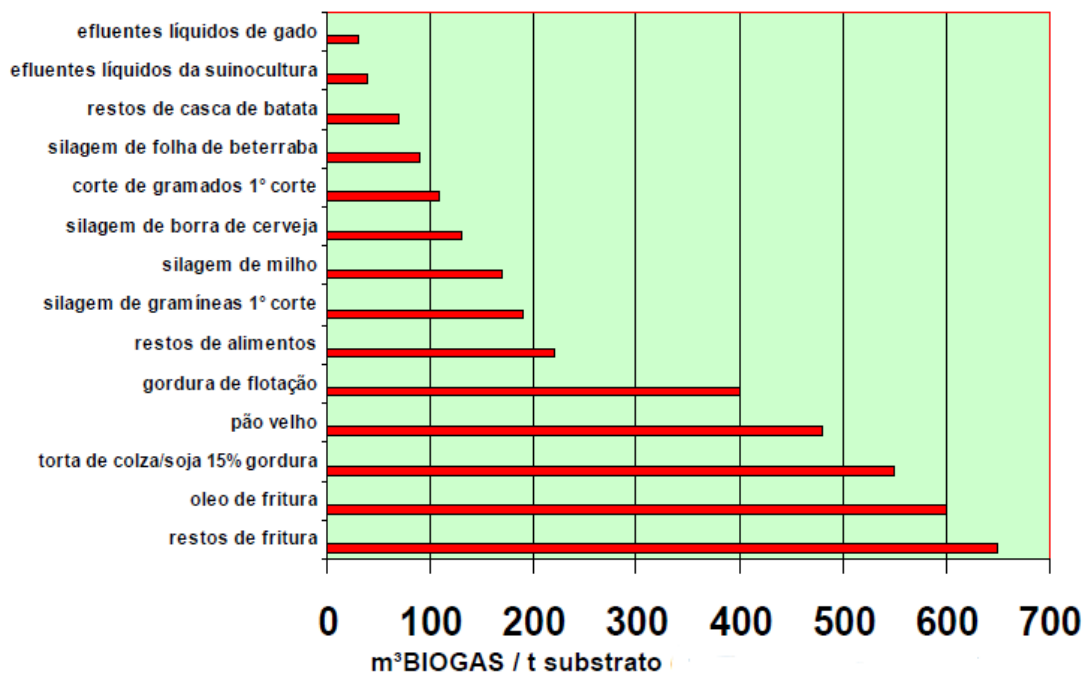
Os principais resíduos orgânicos utilizados na biodigestão são:

- Sobras da colheita da cana (palha);
- Sobras de bagaço/filtro, torta, casca (ambos provenientes do processo de moagem da cana);
- Dejetos e descartes da alimentação dos animais.

Entretanto o biodigestor não fica apenas limitado a estes materiais orgânicos, há inúmeros materiais do nosso cotidiano que podem fazer parte do processo da biodigestão, como por exemplo: casca de batata, pão velho, resto de alimentação e óleo de fritura.

O gráfico abaixo ilustra um pouco sobre a produção do biogás para diferentes substratos e seus respectivos potenciais energéticos no sistema de fermentação.

Figura 15 – Materiais orgânicos pela quantidade de biogás produzido por tonelada



Fonte Biosolar

Como o estudo de caso aborda sobre biodigestores agrícolas, os substratos mais utilizados acaba sendo os vegetais e os efluentes de animais. Com isso, alguns dados nos mostram a capacidade energética dos principais vegetais e efluentes:

#### **Vegetais**

- Palha de cana – com 92,6% TS pode-se produzir 365nm<sup>3</sup>/tonelada de biogás;
- Bagaço de cana – 1 tonelada de bagaço com vinhaça pode produzir 526 nm<sup>3</sup>/tonelada de biogás.

#### **Efluentes**

- Vinhaça – com 1,51 TS pode-se produzir 9,04nm<sup>3</sup>/tonelada de biogás;
- 1m<sup>3</sup> de efluente líquido da suinocultura é capaz de produzir 21nm<sup>3</sup> de biogás. 1 porco produz aproximadamente 6,5kg de efluente por dia, o que geraria algo em torno de 0,14nm<sup>3</sup>/dia de biogás

Um importante dado a salientar seria o poder calorífico dos vegetais que devido à maior quantidade de substratos, possui a maior utilização. A tabela abaixo demonstra alguns valores obtidos dos principais vegetais.

Figura 16 – Tabela do poder calórico dos vegetais mais utilizado na biodigestão

Substrato	TS %	Poder calórico Kcal/kg	Densidade Kg/m <sup>3</sup>	Comentário
Bagaço de cana (in natura)	50	2.275	150	Baixa eficiência, alto custo de manutenção
bagaço (seco)	80	3.641	500	Em forma de pó, alto risco de explosão
bagaço (compactado / briquetes)	85 até 90	3.800 3.985	650	Volume até 10x reduzido / armazenagem em silos, Alta eficiência e controle operacional, modo operacional seguro, Baixo custo de manutenção
Restos de biodigestão	85	3.800	550	briquetes Cerca de 30% menos biomassa, perda de massa pela biodigestão. Consideravelmente mais energia disponível / possível uso como adubo

A importância da instalação de uma unidade que possa produzir o biogás seria devido à recuperação e secagem de leveduras, produção de adubos orgânicos, recuperação térmica no processo para secagem do substrato, ganho de energia e estabilidade no processo, recuperação da água de processo e compactação dos substratos sólidos. Posteriormente, a aplicação do biogás em motores para a frota de veículos da unidade.

## 4.2 Aplicações

### 4.2.1 Motores convencionais de pistão

Os motores apresentados pela BIOSOLAR possuem uma capacidade nominal de 380 kW. É utilizado um motor Otto com injeção gasosa chamada Blue Rail. Os motores, neste caso, como em sua maioria são motores convencionais munidos de pistão, etc., e utilizam um sistema híbrido com uso de diesel a 5% (cinco por cento). O motor de acionamento, embreagem e gerador têm uma vida útil total projetada, neste caso, de 50.000 horas (aproximadamente 6 anos). O cabeçote alcança uma vida útil de até 25.000 horas devido a componentes especialmente adaptados. Os motores apresentam necessidade de baixa manutenção e os intervalos para realização dos serviços serão feitas a cada 2.000 horas por se tratarem de velas de ignição de liga de irídio e óleo de nova geração para motores a gás. Os motores possuem braçadeiras de cinta tipo V e



fechos de liberação rápida, o que encurtam consideravelmente os tempos de montagem e desmontagem.

Os motores utilizados nos projetos da empresa possuem modelos que preveem uma parada técnica de manutenção e revisão de 160 horas por ano, o que não compromete em nenhum momento a performance produtiva dos equipamentos, dentre os quais são destacados:

- Os motores possuem outra particularidade especial por ser unidade de operação paralela à ligação da rede.
- O processo tem monitorização remota com modem GPRS padrão para pronto gerenciamento, acesso on-line via servidor do fornecedor entre outros requisitos.

Nesta aplicação, trata-se de um motor diesel, modificado operacionalmente para a funcionalidade de ciclo Otto sem velas de ignição. Funciona tal como num motor a gasolina, o combustível gasoso é aspirado com o ar de admissão em conjunto. No entanto, a ignição não ocorre com uma vela de ignição, mas como um motor diesel por injeção de um combustível líquido, que inflama a uma temperatura elevada no próprio cilindro (O aumento de temperatura é devido à compressão forte, 12x o seu volume inicial). A quantidade de combustível líquido necessário (diesel ou biodiesel) é bastante baixa de modo que a maior parte da energia fornecida (cerca de 90% a 98%) é oriunda da combustão do gás aspirado. Outra linha, muito similar, injeta combustível gasoso com alguns outros diferenciais como velas de ignição.

Uma terceira linha funciona como um motor de ciclo Otto com velas de ignição somente com biogás. Em uma pré-câmara, especialmente projetada da câmara de combustão, uma pequena parte do biogás fornecido é inflamada. O jato de chama resultante inflama a mistura de gás e ar da câmara de combustão. Através da forma modificada do pistão e o controle eletrônico das velas, o gás é queimado com altamente eficientes e com baixos índices de emissões. Os resultados são particularmente altas eficiências do motor gás-Otto.

As diferenças e a opção por um sistema ou outro se mostram pela melhor performance de um caso para um investimento maior ou menor e custo mais elevado de operação de outros. Assim sendo, há de escolher o sistema dependendo de cada projeto, qualidade do biogás (tipo de biomassa), dimensão do projeto, entre outros.

### 4.2.2 Motores *Stirling*

O motor *Stirling* se classifica como motor de ar quente ou expansão. Ao contrário dos motores a combustão, em que o pistão é movimentado pela expansão de gases de combustão interna, no motor *Stirling* o pistão é movimentado pela expansão de um gás encapsulado, o qual se dilata pela entrada de calor de uma fonte de energia externa. Como há uma dissociação da fonte de energia/calor e da geração de força do motor propriamente dita, o calor necessário pode ser fornecido de diferentes fontes energéticas, tais como de um queimador alimentado por biogás.

O princípio de funcionamento do motor se baseia no efeito de que um gás, quando sujeito a uma alteração de temperatura, ocasiona uma modificação de volume que se converte em trabalho. Movimentado entre um espaço com temperatura constante elevada e um espaço com temperatura constante baixa, o gás de trabalho permite a operação contínua do motor. Isso faz com que o gás de trabalho seja circulado.

O gás é utilizado nos modelos mais simples é o ar, o gás hélio ou hidrogênio pressurizado. Estes são empregados nas versões de alta potência e rendimento, por serem gases com condutividade térmica mais elevada e menor viscosidade, isto é, transportam energia térmica (calor) mais rapidamente e têm menor resistência ao escoamento, o que implica menos perdas por atrito. Ao contrário dos motores de combustão interna, o fluido de trabalho nunca deixa o interior do motor; trata-se, portanto, de uma máquina de ciclo fechado.

Em função da combustão contínua, os motores *Stirling* se caracterizam por baixas emissões de ruídos e poluentes e exigem pouca manutenção. Como os seus componentes sofrem pouco desgaste e o gás circula em uma câmara fechada, seu custo de manutenção esperado é baixo. A eficiência elétrica é inferior à de motores a gás do ciclo Otto convencionais, situando-se entre 24% e 28%.

Esse tipo de motor apresenta diversas vantagens: é pouco poluente pois a combustão é contínua, e não intermitente como nos motores Ciclo de Otto e Ciclo Diesel, permitindo uma queima mais completa e eficiente do combustível. Por isso é muito silencioso e apresenta baixa vibração. É verdadeiramente multi-combustível, pode utilizar praticamente qualquer fonte energética: gasolina, etanol, metanol, gás natural, óleo diesel, biogás, GLP, energia solar, calor geotérmico e outros. Basta gerar uma diferença de temperatura significativa entre a câmara quente e a câmara fria para produzir trabalho.

Possivelmente, a maior vantagem do motor *Stirling* sobre motores convencionais de combustão de biogás é o fato de dispensar o tratamento preliminar do gás. A desvantagem é a lenta reação a variações de carga, o que tem menor importância em equipamentos estacionários como usinas de cogeração, sendo um fator restritivo, por exemplo, em veículos.

A principal desvantagem é, por ora, o custo destes sistemas, sem considerarmos algumas questões técnicas.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi demonstrado a produção e algumas possíveis utilizações do biogás na área térmica como motores de combustão interna, a partir de dados fornecidos pela Biosolar sobre um projeto de uma unidade que utiliza a biodigestão o que para os tempos de hoje tem uma grande importância devido à busca de energias alternativas, no caso a energia renovável, pelo fato de diminuir os impactos ambientais por ser tratar de uma energia limpa e olhando para do lado econômico pode se tornar uma saída muito interessante para agricultores ou empresário que atua no ramo agrícola, pois uma unidade em funcionamento permite a ele que utilize o biogás como fonte de energia elétrica de toda a unidade e ainda, dependendo do tamanho do projeto instalado, permite a ela ter a alternativa de vender essa energia elétrica para a rede.

Se não bastasse essa questão da energia, o substrato que resta da biodigestão logo após passar por um processo de separação de fase se torna um excelente biofertilizante que pode ser utilizado nas plantações da própria unidade ou para vendas externas.

E ainda na área de motores de combustão interna, a utilização do biogás em motores convencionais de combustão a diesel com algumas modificações do ciclo Otto sem velas de ignição ou até mesmo com velas, dependendo da linha de atuação, utiliza-se também em motores stirling.

Com isso, o trabalho conseguiu demonstrar uma alternativa de fonte energética para os dias de hoje que possui uma rentabilidade alta se for aplicado de maneira correta em uma unidade devido à utilização de tudo o que é produzido conseguir se transformar em energia, sendo ela elétrica para o funcionamento da unidade ou seja ela como combustível para o funcionamento da frota de veículos que utilizam o motor diesel. Fazendo com que se torne uma unidade limpa, ou seja, causando poucos impactos ao meio ambiente, que é algo tão procurado atualmente.

## 6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G. V. B. P. **Biodigestão anaeróbica na suinocultura**. 2008. 54f. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Medicina Veterinária do Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas. Disponível em: <<http://arquivo.fmu.br/prodisc/medvet/gvbp.pdf>>. Acesso em: 22. Out. 2015.

BALMANT, W. **Concepção, construção e operação de um biodigestor e modelagem matemática da biodigestão**. Processos Térmicos e Químicos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2009. Disponível em <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/150%282%29.pdf>> Acesso 26 abr.2015.

DEGANUTTI, Roberto et. al. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores\\_000g76qdzev02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores_000g76qdzev02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf)>. Acesso em: 22. Out. 2015.

FREIRE, F. **Biogás**. Gestão de Energia Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra. 2003. Disponível em : <[http://www2.dem.uc.pt/fausto.freire/gestao\\_energia/\\_folders/GE\\_02\\_03\\_trab\\_aluno\\_pdf/3-biogas.pdf](http://www2.dem.uc.pt/fausto.freire/gestao_energia/_folders/GE_02_03_trab_aluno_pdf/3-biogas.pdf)>. Acesso 24 mar.2015.

FRY, L.J. & MERRILL, R. **Methane digesters for fuel gas and fertilizer with complete instructions for two working models**. Santa Bárbara, Calif., 1973.

JÚNIOR, F. A. O. **Manual de construção do biodigestor rural**. Disponível em:<[http://www1.pucminas.br/imagedb/documento/DOC\\_DSC\\_NOME\\_ARQUI20140917140023.pdf](http://www1.pucminas.br/imagedb/documento/DOC_DSC_NOME_ARQUI20140917140023.pdf)>. Acesso em 22. Out. 2015.

LETTINGA, G., et al. Use of the upflow sludge blanket reactor concept for biological waste water treatment especially for anaerobic treatment. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 22, p.697-732, 1980.

LOMAS, J. M., C. URBANO, AND L. M. CAMARERO. Evaluation of a pilot scale downflow stationary fixed film anaerobic reactor treating piggery slurry in the mesophilic range. **Biomass & Bioenergy**, v. 17, p. 49-56, 1999.

LYBERATOS, G.; SKIADAS, I.V. Modelling of anaerobic digestion - a review. **The International Journal of Global Nest**, v. 1, p. 63-74, 1999.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1986.

OLESZKIEWICZ, J.A.; KOZIARSKI, S. Anerobic Treatment in Novel Contact Digester. **Journal of the Environmental Engineering Division**, v. 108, p. 367-374, 1982.

PEÇA, J. O. **Motor diesel**: sua aplicação em equipamentos agrícolas. Escola de Ciência e Tecnologia. Departamento de Engenharia Rural. Universidade de Évora. 2012. Disponível em: <[https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/8133/1/MOTOR\\_DIESEL.pdf](https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/8133/1/MOTOR_DIESEL.pdf)>. Acesso em: 27. Out. 2015.

PUIG, T. C.; NETO, E. A. F. **Motores stirling**. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/stirling/stirling.htm>>. Acesso em: 27 out. 2015.

SATHIANATHAN, M .A. **Bio-gas**: achievements & challenges. New Delhi, Association of Voluntary Agencies for Rural Development, 1975

STATISTA. **Anzahl der Biogasanlagen in Deutschland in den Jahren 1992 bis 2015**. Disponível em: <<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/167671/umfrage/anzahl-der-biogasanlagen-in-deutschland-seit-1992/>>. Acessos em: 27 out. 2015.

YOUNG, J.C., MCCARTY, P.L. The anaerobic filter for waste water treatment. **J.WPCF**, v. 4, p. 160-170. 1969.

