

CASSIANO ROSSETTO

**DESEMPENHO DE MOTOR-GERADOR DE CICLO OTTO OPERADO COM
GASOLINA E BIOGÁS PROVENIENTE DE SUINOCULTURA E DE UMA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS**

**CASCADEL
PARANA – BRASIL
JANEIRO DE 2014**

CASSIANO ROSSETTO

**DESEMPENHO DE MOTOR-GERADOR DE CICLO OTTO OPERADO COM
GASOLINA E BIOGÁS PROVENIENTE DE SUINOCULTURA E DE UMA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS**

.

Projeto proposto para exame de qualificação apresentado à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agrícola, área de concentração: Fontes Renováveis e Racionalização de Energia na Agroindústria e Agricultura - Nível Mestrado, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

Coorientado: Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti

**CASCABEL
PARANA – BRASIL
JANEIRO DE 2014**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9ª/965

R829 Rossetto, Cassiano
Desempenho de motor-gerador de ciclo Otto operado com gasolina e biogás proveniente de suinocultura e de uma estação de tratamentos de esgoto./Cassiano Rossetto. Cascavel, 2014.
50 p.

Orientador^a: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Baricatti
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Energia Agrícola

1. Energia. 2. Emissões. 3. Efluentes. 4. Suinocultura. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 22.ed. 631.371
665.776

CASSIANO ROSSETTO

**"Desempenho de motor-gerador de ciclo Otto operado com gasolina
e biogás proveniente de efluente de tratamento de esgoto e suinocultura"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:


Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira –
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Carlos Henrique Coimbra Araújo
Universidade Federal do Paraná – UFPR/Palotina

Cascavel, 27 de fevereiro de 2014.

Agradecimento

A Deus, por me dar capacidade e força para alcançar esse objetivo em minha vida.

A minha família que sempre me apoio incondicionalmente, em especial minha esposa, Cristina S. W. e minha filha Maria Helena S.W., meus pais e minha irmã que serviram de inspiração e motivação.

Ao meu Professor Orientador Samuel Nelson Melegari de Souza, que neste período me auxiliou a buscar respostas para o estudo proposto.

A todos os professores do programa de pós-graduação em Energia na Agricultura que contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico.

A SANEPAR por acreditar e possibilitar a realização do experimento em suas dependências.

A CNPQ pela bolsa que tanto ajudou.

A todos os amigos que de alguma forma contribuíram para realização do meu trabalho.

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Peso específico e poder calorífico inferior do biogás.....	11
Tabela 2 - Especificações técnicas do motor gerador utilizado	16
Tabela 3 - Media do consumo de gasolina em gramas	26
Tabela 4 - Poder Calorifico Inferior da Gasolina.....	27
Tabela 5 - Amostras de biogás com o percentual de gás metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂) e gás sulfídrico H₂S. ETE.	28
Tabela 6- Amostras de biogás com o percentual de gás metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂) e gás sulfídrico H₂S. Biogás Suinocultura....	29
Tabela 7 - Consumo do biogás em m³	29

Lista de Figuras

Figura 1 - Biodigestor modelo indiano.....	7
Figura 2 - Biodigestor modelo chinês	8
Figura 3 - Biodigestor modelo tubular.	8
Figura 4 - Biodigestor modelo RALF/UASB.....	9
Figura 5 - Esquema de funcionamento de um motor ciclo Otto.....	13
Figura 6 - Misturador tipo Venturi	14
Figura 7 - Banco de resistências	15
Figura 8 - Painel de controle	16
Figura 9 - Motor ciclo Otto.....	17
Figura 10 - Balança semi analítica	17
Figura 11 - Cronometro digital.....	18
Figura 12 - Recipiente adiabático	19
Figura 13 - Bomba de pressurização	20
Figura 14 - Calorímetro E2K.....	20
Figura 15 - Kit de coleta Alfakit.....	21
Figura 16 - Analisador de gases Drager xl 7000	21
Figura 17 - Ponto de coleta	22
Figura 18 - Medidor de vazão de gases	22
Figura 19 - Analisador de gases Bacharach	23
Figura 20 - Analisador de cargas AE 200	24

Índice

AGADECIMENTO.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
INDICE	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 - ESGOTOS SANITÁRIOS.....	3
2.2 - TRATAMENTO DOS EFLUENTES	4
2.3 - BIOGÁS	5
2.4 - BIODIGESTORES.....	5
2.4.1 - Biodigestor Indiano	6
2.4.2 - Biodigestor Chinês	7
2.4.3 - Biodigestor Tubular.....	8
2.5 - PRODUÇÃO DE BIOGÁS	10
2.6 - CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS	10
2.7 MOTORES CICLO OTTO.....	12
3 - MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 - Descrição do experimento	15
3.2 - Motor utilizado.....	16
3.3 - Consumo de combustível.....	17
3.4 - Poder calorífico da gasolina	18
3.5 - Coleta do biogás.....	20
3.6 - Ponto de coleta	21
3.7 - Método para determinação do consumo do biogás.....	22

3.8 - Poder calorífico do biogás.....	23
3.9 - Análise de emissões	23
3.10 - Análise das cargas geradas.....	24
3.11 - Eficiência global.....	24
3.12 - Consumo específico do biogás e gasolina.....	25
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.2 - Poder calorífico da gasolina	26
4.3 - Características do Biogás coletado	27
4.4 - Consumo de biogás.....	29
4.5 - Comparativo das emissões de gases biogás x gasolina.....	30
4.5.1 - Emissões de dióxido de carbono (CO ₂)	30
4.5.2 - Emissões de monóxido de carbono (CO)	31
4.5.3 - Emissões óxido de nitrogênio (NO _x).....	32
4.6 – Eficiência global do conjunto motor-gerador	32
4.7 – Consumo específico do biogás e da gasolina	33
5- Conclusão	35
6 – REFERÊNCIAS	36

RESUMO

A busca por novas fontes energéticas que não poluam o meio ambiente, bem como a mitigação dos impactos ambientais gerados pelo aumento da população, abre uma nova perspectiva no campo da pesquisa do biogás provenientes do resultado de tratamento de efluentes. O processo de transformação de energia gerada pela combustão do biogás para energia em motores no ciclo Otto e posterior transformação em energia elétrica é de fácil realização sendo necessárias algumas adaptações no motor, neste trabalho foi realizada apenas a substituição do carburador por um misturador de ar/combustível tipo Venturi. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de motor-gerador ciclo Otto alimentado com biogás proveniente de duas fontes, tratamento de efluentes humanos e de suinocultura. Como testemunha foram utilizados ensaios com gasolina, simulando diferentes condições de trabalho, com cargas de 0; 0,250 kW (10 % da carga); 0,500 kW (20 % da carga); 0,750 kW (30 % da carga); 1 kW (40 % da carga); 1,250 kW (50 % da carga); 1,500 kW (60 % da carga); 1,750 kW (70 % da carga); 2 kW (80 % da carga); 2,250 kW (90 % da carga) e 2,500 kW (100 % da carga). Onde foram avaliadas as emissões de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e óxido de nitrogênio (NO_x), e analisado o rendimento do motor-gerador que foi baixo em torno de 76 % menor quando comparado com gasolina, sendo necessários ajustes para o melhor desempenho.

Palavras-chave: Emissões, Energia, Efluentes, Suinocultura.

ROSSETTO, Cassiano. State University of West Paraná, January 2014.
**PERFORMANCE MOTOR-GENERATOR OPERATED WITH OTTO CYCLE
GASOLINE AND BIOGAS FROM THE PIG INDUSTRY AND A PLANT
WASTEWATER**

Dr. Samuel Nelson de Souza Melegari

ABSTRACT

The search for new energy sources that do not pollute the environment as well as the mitigation of environmental impacts caused by population increase, opens a new perspective in the research field of biogas from the wastewater treatment outcome. The process of transformation of energy generated by the combustion of biogas for energy in Otto engines and subsequent transformation into electric energy cycle is easy to perform some adjustments on the motor, this work was being performed only necessary to replace the carburetor by a mixer / air fuel type Venturi. The aim of this study was to evaluate the performance of Otto cycle engine-generator powered with gas from two sources, treatment of human and swine effluent. As witness testing with gasoline were used, simulating different working conditions, with loads of 0; 0.250 kW (10% load); 0.500 kW (20% load); 0.750 kW (30% load); 1 kW (40% load); 1,250 kW (50% load); 1,500 kW (60% load); 1,750 kW (70% load); 2 kW (80% load); 2,250 kW (90% load) and 2,500 kW (100% load). Where emissions of carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO) and nitrogen oxide (NO_x) were evaluated and analyzed the performance of motor-generator that was down around 76% lower when compared with gasoline, and necessary adjustments for better performance.

Key-words: Emissions, Energy, Wastewater, Swine.

1 - INTRODUÇÃO

Segundo a Organização das Nações Unidas (2013) a população mundial atingiu os sete bilhões de pessoas no ano de 2011. Sendo que dessas a metade já vive em áreas urbanas. Até 2015 esta proporção subirá para 70%. Com isso a produção de efluentes para tratamento apresentará um aumento considerável.

A busca de novas fontes energéticas, bem como a diminuição da poluição ambiental e a sustentabilidade nos sistemas de produção, trás uma nova visão sobre a produção de energia elétrica a partir do biogás, que tem um potencial energético imenso e ainda pouco explorado no Brasil (BLEY JUNIOR, 2012).

No Brasil, o aproveitamento do biogás ainda é incipiente, com apenas 52 MW de capacidade instalada e 18 MW em construção (ANEEL, 2012). Considerando a elevada concentração da população brasileira em grandes centros urbanos e a expressiva produção agropecuária e agroindustrial, a sua produção a partir dessa fonte poderia ter um valor mais expressivo.

Segundo Sanquetta (2004), o metano (CH_4) presente no biogás de esgoto é cerca de 20 vezes mais prejudicial (mais agressivo) para o meio ambiente do que o CO_2 , sendo os principais responsáveis pelo aumento da concentração de gases de efeito estufa em consequências das emissões de causa antrópica. Torna-se, portanto, muito interessante o aproveitamento energético desse biogás, conciliando a geração de energia elétrica renovável com a questão do saneamento ambiental, através da redução dos gases de efeito estufa.

A implantação de biodigestores para o tratamento de dejetos resolve assim o passivo ambiental e permite a geração de um novo produto, o biogás, além da aquisição do biofertilizante, que tem uma grande quantidade de nutrientes de alto valor para a agricultura (PECORA, 2006).

O biogás se assemelha ao gás natural com um elevado poder calorífico, podendo substituí-lo em muitas aplicações. A vantagem do biogás em relação do gás natural é o fato de ser renovável e produzido em todos os locais onde haja biomassa. A desvantagem seria seu menor poder calorífico e a presença de sulfeto de hidrogênio e umidade (SALOMON, 2007).

Os motores de ignição por centelha, movidos a gasolina ou os motores diesel convertidos a ciclo Otto podem ser facilmente convertidos para motores a gás. As mesmas técnicas de conversão do motor a gasolina para gás natural são utilizadas para o biogás. O biogás tem um poder calorífico de aproximadamente a metade do gás natural; logo, o sistema de carburação tem que ser dimensionado para que o fluxo de biogás seja o dobro do gás natural para que a mesma potência seja mantida (MUELLER, 1995; MACARI; RICHARDSON, 1987). A principal modificação de um motor a gasolina para biogás é a instalação de um misturador de gás com comburente (ar) no lugar do carburador. O controle do motor é efetuado pelo controle da mistura ar/combustível, por meio de uma válvula de variação de pressão, semelhante à válvula borboleta dos motores a gasolina. Outras modificações incluem a mudança na taxa de compressão e avanço de ignição.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de motor-gerador ciclo Otto alimentado com biogás proveniente de duas fontes, tratamento de efluentes humanos e de suinocultura e como testemunha foi utilizados ensaios com gasolina, simulando diferentes condições de trabalho, com cargas de 0; 0,250 kW (10 % da carga); 0,500 kW (20 % da carga); 0,750 kW (30 % da carga); 1 kW (40 % da carga); 1,250 kW (50 % da carga); 1,500 kW (60 % da carga); 1,750 kW (70 % da carga); 2 kW (80 % da carga); 2,250 kW (90 % da carga) e 2,500 kW (100 % da carga).

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - ESGOTOS SANITÁRIOS

Considerando os esgotos domésticos, estes são constituídos de resíduos resultantes do asseio pessoal, das necessidades fisiológicas, da lavagem de roupas e de utensílios domésticos e da preparação de alimentos. Também são encontrados resíduos sólidos nos esgotos domésticos, que são indevidamente lançados e que deveriam ser dispostos junto ao lixo doméstico (como por exemplo, absorventes, preservativos, trapos etc.) (PEREIRA, 2004).

Para Spellman (2009), as águas residuais de uma cidade são geradas por cinco fontes:

a) Resíduos humanos ou de animais: são aqueles produzidos por humanos e animais e são considerados mais perigosos do ponto de vista de saúde pública, pois estão carregados de bactérias, vírus e outros micros organismos.

b) Resíduos domésticos: são os descartados das residências, contendo papel, produtos de limpeza, detergentes, lixo e outras substâncias descartadas no sistema de coleta.

c) Resíduos industriais: materiais descartados no processo industrial, e contêm, normalmente, produtos químicos, ácidos, álcalis, detergentes e materiais altamente tóxicos.

d) Escoamento de águas pluviais: muitas redes coletoras são preparadas para receber água de chuvas.

e) Infiltração de águas subterrâneas: podem ocorrer infiltrações por canos rachados.

Com isso há uma pequena parcela de sólidos, os esgotos sanitários contêm, aproximadamente, 99,9% de água. A fração restante inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos. Portanto, é devido a essa fração de 0,1% que há necessidade de tratar-se os esgotos (CHERNICHARO, 2007).

2.2 - TRATAMENTO DOS EFLUENTES

Como afirma Lima (2005), a implantação de um sistema de tratamento de esgoto tem por objetivo a remoção dos principais poluentes presentes nas águas residuárias, retornando ao corpo d'água sem alteração de sua qualidade.

O processo de tratamento do esgoto pode adotar diferentes tecnologias para depuração do efluente, mas, de modo geral, segue um fluxo que compreende as seguintes etapas (PECORA, 2006):

a) Preliminar – remoção de sólidos grandes e areia para proteger as demais unidades de tratamento, os dispositivos de transporte (bombas e tubulações) e os corpos receptores. A remoção da areia previne, ainda, a ocorrência de abrasão nos equipamentos e tubulações e facilita o transporte dos líquidos. As caixas de areia são feitas com o uso de grades que impedem a passagem de trapos, papéis, pedaços de madeira, etc.; e os tanques de areia servem para retirada de óleos e graxas em casos de esgoto industrial com alto teor destas substâncias.

b) Primário – os esgotos ainda contêm sólidos em suspensão de porte pequeno cuja remoção pode ser feita em unidades de sedimentação, reduzindo a quantidade de matéria orgânica contida no efluente. Os sólidos sedimentáveis e flutuantes são retirados por meio de mecanismos físicos, via decantadores. Os esgotos fluem vagarosamente pelos decantadores, permitindo que os sólidos em suspensão de maior densidade sedimentem gradualmente no fundo, formando o lodo primário bruto. Os materiais flutuantes como graxas e óleos, de menor densidade, são removidos na superfície. A eliminação média da DBO, nesta fase, é de 30%.

c) Secundário – ocorre, principalmente, a remoção de sólidos e de matéria orgânica não sedimentável e, eventualmente, nutrientes como nitrogênio e fósforo. Após as fases primária e secundária, a redução da DBO deve alcançar 90%. É a etapa da remoção biológica dos poluentes e sua eficiência permite produzir um efluente em conformidade com o padrão de

lançamento previsto na legislação ambiental. Basicamente, são reproduzidos os fenômenos naturais de estabilização da matéria orgânica que ocorrem no corpo receptor, sendo que a diferença está na maior velocidade do processo, na necessidade de utilização de uma área menor e na evolução do tratamento em condições controladas.

d) Terciário – remoção de poluentes tóxicos ou não biodegradáveis ou eliminação adicional de poluentes não degradados na fase secundária.

2.3 - BIOGÁS

O biogás era simplesmente encarado como um subproduto obtido a partir da decomposição anaeróbia (sem presença de oxigênio) de resíduos orgânicos. No entanto, a crise ambiental, a ratificação do Protocolo de Kyoto, a implementação do MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) e o rápido desenvolvimento econômico dos últimos anos, bem como a crescente elevação do preço dos combustíveis convencionais, vêm aumentando as pesquisas e investimentos na produção de energia partir de novas fontes alternativas e economicamente atrativas que possibilitem a preservação dos recursos naturais esgotáveis (SALOMON, 2007).

Segundo Costa (2002), a conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, tratamento de esgoto doméstico e aterros sanitários, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica, agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos.

2.4 - BIODIGESTORES

Um biodigestor é uma câmara hermeticamente fechada, sem nenhum contato com o ar atmosférico, onde a matéria orgânica diluída em água sofre um processo de degradação

anaeróbia, ou seja, sem concentração de oxigênio junto a matéria orgânica, resultando na produção de um efluente final com características fertilizantes e produzindo o gás metano ou biogás (CASTANHO & ARRUDA, 2008; FERREIRA et al., 2009). Há mais de dois séculos se tem conhecimento de que este tipo de equipamento satisfaz o aproveitamento e o tratamento de resíduos, a geração de energia e a produção de biofertilizantes. No Brasil, os biodigestores ficaram conhecidos com a crise do petróleo, na década de 1970, sendo que os principais modelos implantados foram o Chinês e o Indiano (CASTANHO & ARRUDA, 2008).

2.4.1 - Biodigestor Indiano

O modelo de biodigestor Indiano pode ser considerado o modelo mais popular para resíduos rurais (NOGUEIRA, 1986). Este modelo de biodigestor caracteriza-se por possuir uma campânula móvel como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação; a parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, acarretando a movimentação do resíduo por todo o biodigestor. O modelo Indiano, Figura 1, possui pressão interna constante, pois quando o biogás é produzido e não é consumido, a campânula expande-se, aumentando o volume destinado para o armazenamento do biogás, garantindo que a pressão não se altere (DEGANUTTI et al., 2002).

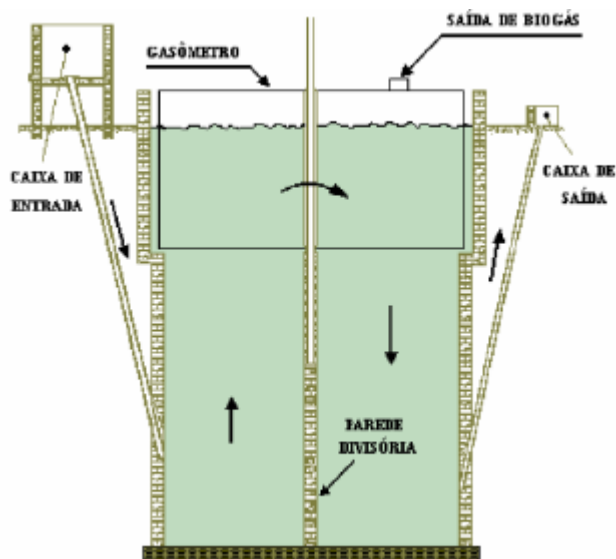


Figura 1 - Biodigestor modelo indiano.
Fonte: Prati, 2010.

2.4.2 - Biodigestor Chinês

O biodigestor contínuo Chinês foi inspirado no modelo Indiano e houve adaptação do seu projeto para as condições locais da China. A necessidade da adaptação do modelo Indiano é evitar o uso do gasômetro móvel, pois este representa uma parcela considerável do custo de construção daquele modelo (NOGUEIRA,1986).

Segundo Deganutti (2002) o biodigestor chinês é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria para a fermentação, com teto impermeável, destinado ao armazenamento do biogás, o qual fica em contato com a matéria orgânica. Ao contrario do modelo Indiano, esse modelo possui variação da pressão interna, funcionando com base no princípio de prensa hidráulica, de modo que o aumento de pressão resultará em deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre descompressão.

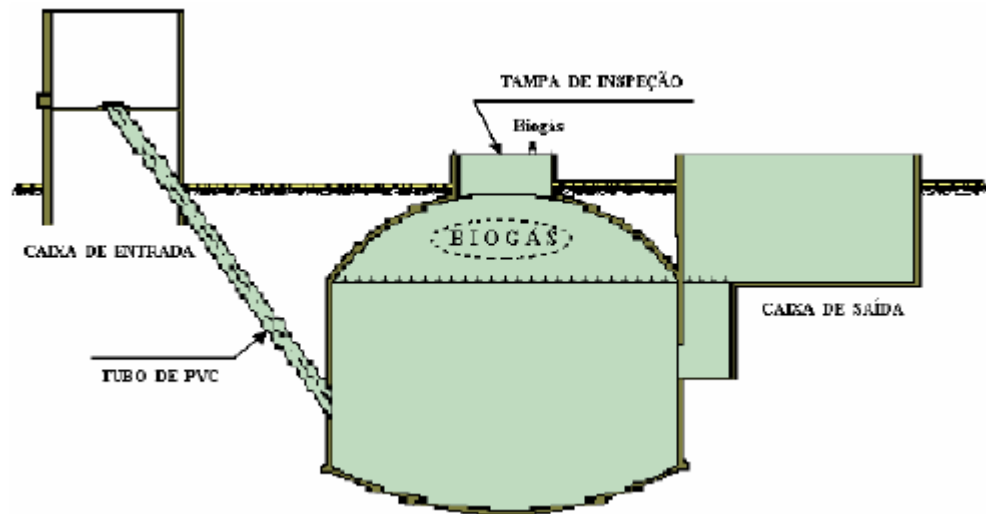


Figura 2 - Biodigestor modelo chinês
Fonte: Prati, 2010.

2.4.3 - Biodigestor Tubular

O biodigestor tubular possui uma construção horizontal e a dimensão é alongada, cuja câmara de biodigestão é escavada no solo. O qual é revestido com material plástico. O gasômetro é do tipo inflável e feito de material plástico reforçado. No biodigestor tubular, a biomassa tem entrada contínua em uma das extremidades do biodigestor, passa através do mesmo e é descarregada na outra extremidade (BRENNEISEN, 2013) como vemos na figura 3.

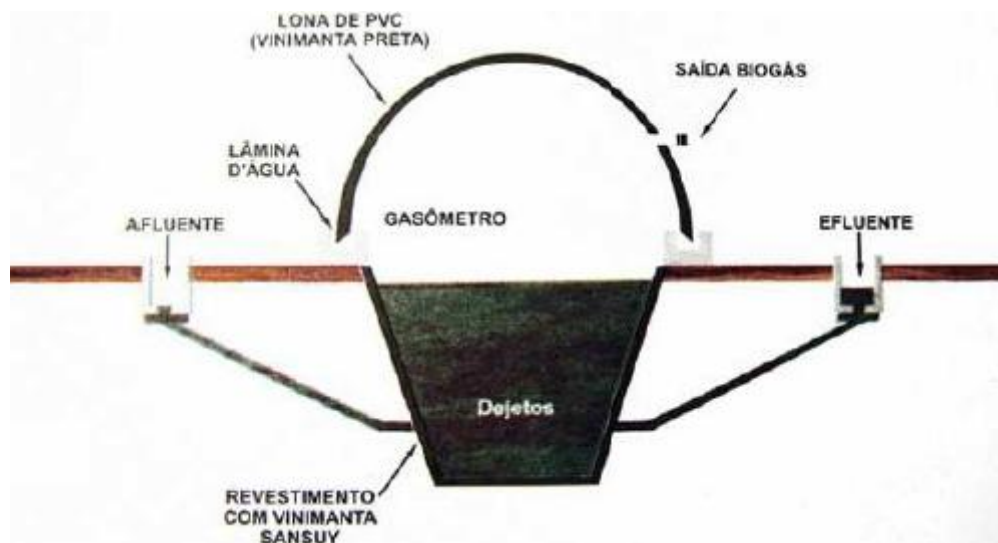


Figura 3 - Biodigestor modelo tubular.
Fonte: Oliver, 2008.

2.4.4 - Biodigestor modelo RALF/UASB

Segundo Andrade Neto (1997), o funcionamento do RALF consiste, inicialmente, em conduzir o esgoto bruto para um gradeamento fino, a fim de remover os sólidos flutuantes e em suspensão, e a um desarenador para remover sólidos sedimentáveis prejudiciais ao processo. Após o esgoto estar gradeado e desarenado, é conduzido até uma câmara no centro superior do reator, onde é dividido em partes iguais para alimentar tubos difusores, que conduzem o esgoto até o fundo do mesmo. Na parte inferior do reator, o esgoto em fluxo ascendente é misturado com o lodo contido em um manto previamente formado ou inoculado, rico em bactérias anaeróbias. A matéria orgânica contida no esgoto fica retida nesse manto de lodo e é degradada e estabilizada por meio da atividade metabólica das bactérias.

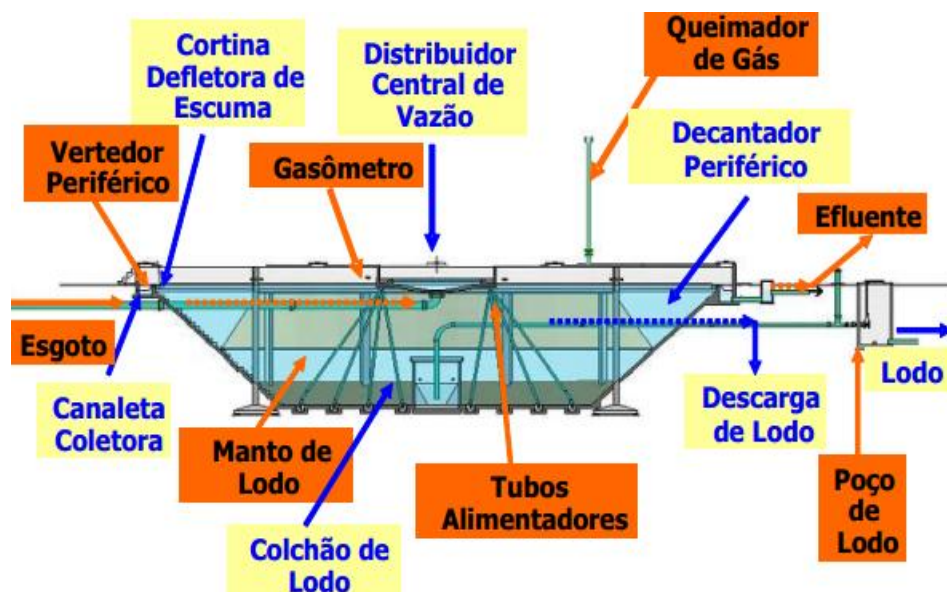


Figura 4 - Biodigestor modelo RALF/UASB.
Fonte: Sanepar, 2008.

2.5 - PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Para que ocorra a formação do biogás é necessário um processo de digestão anaeróbia que é composto de quatro fases distintas, a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. De acordo com Caron et al.(2009), na fase da hidrólise, as moléculas orgânicas complexas (proteínas, lipídios e carboidratos) são convertidos em material orgânico mais simples pelas enzimas extracelulares – exoenzimas, produto da fermentação de bactérias hidrolíticas. Na fase ácida ou de acidogênese, os compostos gerados na hidrólise são convertidos em H_2 , CO_2 , sais e alcoóis. Na fase da acetogênese, os ácidos voláteis e os álcoois são metabolizados e produzem acetato e H_2 a partir das bactérias acetogênicas. Na fase de metanogênese, as bactérias acetotróficas produzem o metano e (CH_4).

2.6 - CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como a água e o dióxido de carbono prejudicam o processo de queima, o tornando menos eficiente. Esta substância absorve parte da energia gerada. Além disto, também há a presença de gás sulfídrico (H_2S) que pode acarretar corrosão, diminuindo tanto o rendimento, quanto à vida útil do motor térmico utilizado. A maioria dos digestores anaeróbios produz um biogás que contém entre 0,3 a 2 % de H_2S , observando-se também a presença de traços de nitrogênio (COELHO, 2006).

O poder calorífico do biogás varia em função da concentração de metano, a qual influencia não apenas o poder calorífico inferior, mas também a densidade e/ou peso específico do biogás. Na Tabela 1, pode-se observar a variação entre o poder calorífico inferior do biogás e a densidade em função da quantidade de metano presente no biogás (IANNICELLI, 2008).

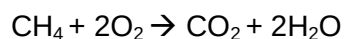
Tabela 1 - Peso específico e poder calorífico inferior do biogás.

Composição química	Peso específico (kg.m ⁻³)	PCI (Kcal.kg ⁻¹)
10% CH ₄ e 90% CO ₂	1,8393	465,43
40% CH ₄ e 60% CO ₂	1,4600	2333,85
60% CH ₄ e 40% CO ₂	1,2143	4229,98
65% CH ₄ e 35% CO ₂	1,1518	4831,14
75% CH ₄ e 25% CO ₂	1,0268	6253,01
95% CH ₄ e 05% CO ₂	0,7768	10469,60
99% CH ₄ e 01% CO ₂	0,7268	11661,02

Fonte: Iannicelli, (2008)

A porcentagem mínima e máxima de um combustível numa mistura de ar, para que essa mistura entre em combustão, é chamada de limite de inflamabilidade. Para o biogás com 58% de metano, está entre 9 a 17% de biogás no ar e com o aumento do percentual de metano esses valores tendem a decrescer. A velocidade da chama é a velocidade de uma frente de chama da mistura ar e combustível, efetuada sob determinadas condições. É uma propriedade importante para o dimensionamento e modificações de queimadores, pois ajuda a estabelecer a estabilidade da combustão. Também é utilizada na determinação do avanço de ignição nos motores de combustão interna. O seu valor é de 0,25 m/s no ar para o biogás com 58% de metano (BIOGASBURNER, 2011).

No processo de combustão, o combustível deve ser misturado a um comburente para que haja a combustão. A reação de combustão completa do biogás, com oxigênio é (BIOGASBURNER, 2011)



Onde um volume de metano requer dois volumes de oxigênio, para produzir um volume de dióxido de carbono e dois de vapor de água, assumindo-se que há 58% de metano no biogás e 21% de oxigênio no ar. Logo 1,72 volumes de biogás necessitam de 9,52 volumes de ar ou 1.0 volume de biogás para 5,53 de ar. Com isso, a razão estequiométrica para combustão do biogás é 15,3% de biogás no ar, ou seja, nessa proporção a combustão é completa. Em situações onde a mistura for pobre em biogás e

com excesso de ar, a mistura é chamada de pobre. Quando há biogás em maior quantidade em relação ao ar a mistura é rica.

2.7 MOTORES CICLO OTTO

O motor de combustão interna é assim chamado por realizar trabalho queimando uma mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro. O trabalho mecânico é gerado com a transformação do movimento retilíneo do pistão em circular por meio de um virabrequim. É um mecanismo amplamente utilizado, por ser um processo prático e apresenta grande durabilidade (CORREA, 2003).

De acordo com Castro (2006) os motores do ciclo Otto funcionam em 4 etapas, descritas a seguir.

Primeiro tempo: abertura da válvula de admissão através da qual é injetada no cilindro a mistura ar-combustível e o pistão é empurrado para baixo com o movimento do virabrequim.

Segundo tempo: fechamento da válvula de admissão e compressão da mistura (taxa da ordem de 10:1) e conforme o pistão sobe (antes de chegar à parte superior) a vela gera uma faísca.

Terceiro tempo: explosão da mistura e expansão dos gases quentes formados na explosão. Esta expansão promove uma força que faz com que o pistão desça.

Quarto tempo: Abertura da válvula de escape através do qual os gases são expulsos pelo pistão.

Na figura 5, podemos ver como Pecora (2006) descreve o funcionamento de um motor ciclo Otto.

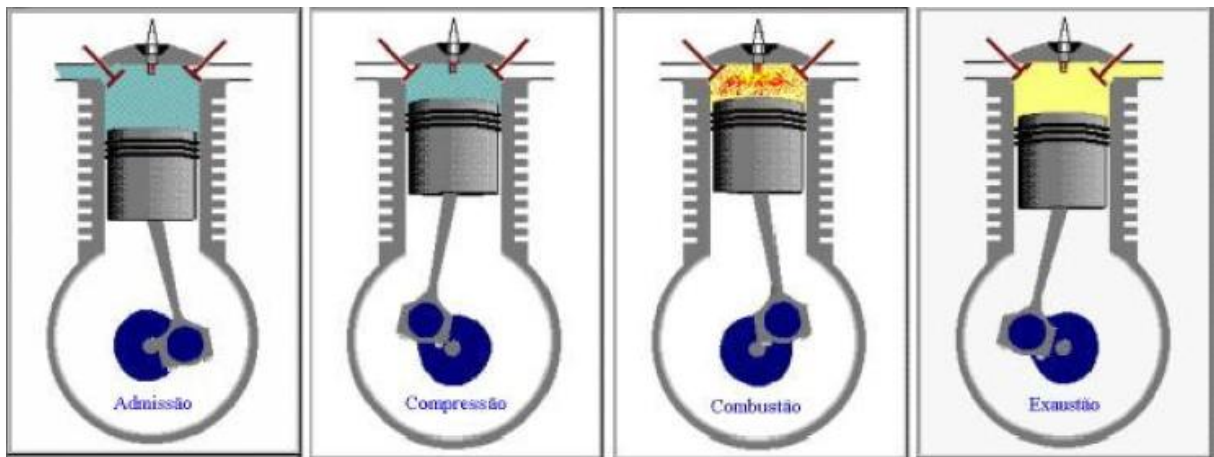


Figura 5 - Esquema de funcionamento de um motor ciclo Otto.

Fonte: Pecora, 2006.

Os motores de ignição por centelha, movidos a gasolina ou os motores diesel convertidos a ciclo Otto podem ser facilmente convertidos para motores a gás. As mesmas técnicas de conversão do motor a gasolina para gás natural são utilizadas para o biogás. A principal modificação de um motor a gasolina para biogás é a instalação de um misturador de gás com comburente (ar) no lugar do carburador. O controle do motor é efetuado pelo controle da mistura ar/combustível, por meio de uma válvula de variação de pressão, semelhante à válvula borboleta dos motores a gasolina. Outras modificações incluem a mudança na taxa de compressão e avanço de ignição.

O misturador utilizado na maioria dos motores a biogás é do tipo Venturi e é instalado antes da entrada da mistura ar combustível na câmara de combustão. O sistema é composto de um filtro, por onde entra o ar (comburente), uma entrada de biogás para um misturador Venturi, uma válvula para controlar a entrada da mistura ar/combustível para o cilindro do motor (SOUZA, 2012), como podemos ver na figura 6.



Figura 6 - Misturador tipo Venturi
Fonte: Souza 2004.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Descrição do experimento

O experimento foi realizado em dois locais na Estação de Tratamento Norte (ETE Rio das Antas), da Companhia de Saneamento do Paraná – Brasil (SANEPAR), a uma latitude 24° 92' Sul, longitude 53° 48' oeste com altitude de 682 metros, no município de Cascavel - Paraná – Brasil. E na Granja Martelli no município de Medianeira - Paraná – Brasil.

Os testes foram realizados em um conjunto moto-gerador ciclo Otto de 5,5 KVA utilizando como combustível biogás resultante do processo de tratamento de efluentes em um reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado – RALF e biogás resultante do tratamento de efluentes de suinocultura e como testemunha foi realizado testes com gasolina.

Para a simulação das diferentes condições de trabalho foi utilizado um banco de resistências Fig.7, com controle de potência em um painel de controle, Fig. 8. O banco simulou as seguintes cargas: 0; 0,250 kW (10 % da carga); 0,500 kW (20 % da carga); 0,750 kW (30 % da carga); 1 kW (40 % da carga); 1,250 kW (50 % da carga); 1,500 kW (60 % da carga); 1,750 kW (70 % da carga); 2 kW (80 % da carga); 2,250 kW (90 % da carga) e 2,500 kW (100 % da carga). Durante o período de tempo de dois minutos com cinco repetições cada tratamento.



Figura 7 - Banco de resistências



Figura 8 - Painel de controle

3.2 - Motor utilizado

A tabela 2 mostra as especificações técnicas do motor que foi utilizado no experimento. O modelo do equipamento é Gerador 4T – B4T – 6500 L / B4T – 6500 LE.

Tabela 2 - Especificações técnicas do motor gerador utilizado

Equipamento	Motor-gerador Branco
Motor	4 tempos
Combustível	Gasolina
Potência Máxima	5,5 kVA
Potência nominal	5,0 kVA (regime contínuo)
Tensão de Saída	110 ou 220 V
Capacidade do Tanque	25 Litros
Fases	Monofásicos
Peso	82 Kg
Ruído	76 dBa
Dimensões (DxLxA)	680x540x550 mm

O motor-gerador utilizado é do ciclo Otto, tipo monofásico da marca Branco de 13 cv de potência e 5,5 kVA de potência nominal, com tensão de saída de 120/240 V. Para o

funcionamento com biogás foi necessário realizar uma adaptação junto à aspiração do ar com um Venturi, Fig. 9.

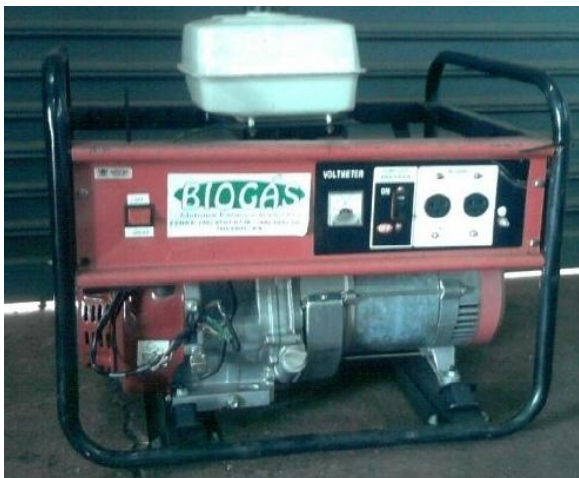


Figura 9 - Motor ciclo Otto

3.3 - Consumo de combustível

O consumo da gasolina foi determinado com uma proveta plástica de 300 ml e uma balança semi analítica, da marca Mettler, modelo PB 3000, Fig. 10, com capacidade máxima de 2000 gramas e resolução de 0,01 gramas, em função do tempo dos tratamentos, determinados com o auxílio de cronometro digital Fig. 11.



Figura 10 - Balança semi analítica



Figura 11 - Cronometro digital

O consumo horário da gasolina no sistema foi determinado com o auxílio de um cronômetro digital. Conforme a Eq 1.

$$\text{Con} = \frac{M_i - M_f}{T} \quad (1)$$

Con = Consumo do combustível (g.h^{-1})

M_i = Massa inicial do combustível (g)

M_f = Massa final do combustível (g)

T = Tempo (h)

3.4 - Poder calorífico da gasolina

O poder calorífico superior da gasolina utilizada no experimento foi determinado no laboratório de biocombustíveis da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Cascavel, onde foi utilizado um calorímetro de bomba modelo E2k. Sendo o procedimento descrito a seguir:

Amostras de 0,6 gramas foram utilizadas na determinação do poder calorífico superior da gasolina, sendo colocadas individualmente em um recipiente adiabático, Fig. 12 e sofrendo uma pressurização em uma bomba Fig. 13 de 30 atm (3,04 MPa).

Com o recipiente pressurizado levou-se ao calorímetro E2K Fig.14. O recipiente com a amostra foi acoplado em um fio de ignição, chamado de fio de queima. Desta forma se determinou o poder calorífico superior do combustível. Os ensaios em que a queima não foi completa foram desprezados.



Figura 12 - Recipiente adiabático



Figura 13 - Bomba de presurização



Figura 14 - Calorímetro E2K

3.5 - Coleta do biogás

Para a coleta de amostras do Biogás foi utilizado o Kit fornecido pela empresa Alfakit, em parceria com a Embrapa Suínos e Aves, sendo esse patenteado. O Kit empregado possui o número de serie KBA 0123, Fig. 15. As amostras seguiram para o laboratório de gaseificação da Unioeste, campus de Cascavel, onde foi quantificada a presença de metano com o analisador de gases Drager xl 7000, Fig. 16.



Figura 15 - Kit de coleta Alfakit



Figura 16 - Analisador de gases Dräger xl 7000

3.6 - Ponto de coleta

A coleta do biogás para as análises e para a alimentação do motor-gerador foram realizadas logo após o filtro em um ramal que segue para a tubulação principal que alimenta o flare onde o biogás é queimado, Fig. 17.



Figura 17 - Ponto de coleta

Na saída do filtro ocorre a conexão com a saída para o mostrador de coleta de gases, também denominado BAG. No decorrer do experimento foram realizadas 10 amostras, que seguiram para o laboratório de gaseificação da Unioeste para a determinação dos gases presentes.

3.7 - Método para determinação do consumo do biogás

Para a determinação do consumo do biogás foi utilizado um medidor de vazão de gases e um cronômetro digital, Fig. 11, estipulando o consumo do motor-gerador em cada intervalo de tempo, como podemos ver na Fig.18.



Figura 18 - Medidor de vazão de gases

3.8 - Poder calorífico do biogás

Segundo Nogueira e Lara (2003), o poder calorífico de um gás pode ser calculado a partir da sua composição volumétrica, segundo a fórmula 2.

$$PCI = PCI_{\text{metano}} \times \frac{\%}{100} \quad (2)$$

Onde:

PCI = Poder calorífico Inferior do biogás (kg/kJ);

PCI_{metano} = Poder calorífico do metano (kg/kJ);

% = Concentração volumétrica de metano no biogás (%).

A variação do poder calorífico inferior está ligada à relação de metano e gás carbônico nele presente (COSTA, 2006).

3.9 - Análise de emissões

Na análise das emissões do motor-gerador, foi usado o analisador de gases Bacharach, Fig. 19 realizando a amostragem dos gases que eram expelidos pelo escapamento do motor.

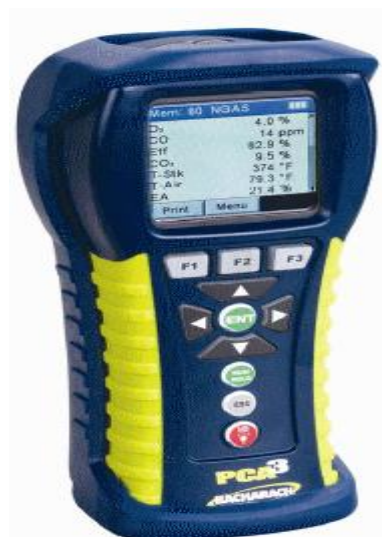


Figura 19 - Analisador de gases Bacharach

Primeiro foi realizado a calibragem do aparelho deixando coletar ar por sessenta segundos. Após, com a haste de coleta posicionada a dois centímetros do escapamento, foi

realizada a coleta de dados a cada dois minutos gerando um banco de dados para comparação das emissões dos dois combustíveis em diferentes condições de trabalho.

Os gases coletados foram o dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e óxido de nitrogênio (NO_x).

3.10 - Análise das cargas geradas

Para a análise das cargas geradas em função da potência requerida se utilizou o analisador de cargas AE 200, Fig. 20. Conectando os coletores de dados nos cabos de tensão que partiam do gerador para o painel de controle da resistência.



Figura 20 - Analisador de cargas AE 200

3.11 - Eficiência global

A entrada de energia total para o gerador para cada potência foi quantificada como o produto da taxa de fluxo e o poder calorífico inferior do combustível. Assim, a eficiência global do gerador foi determinada para cada potência.

$$E = \frac{E_c}{E_u} \times \%$$

Onde que,

E = Eficiência global em %;

E_C = Energia Consumida, kJ m^{-3} ;

E_U = Energia Útil, kJ m^{-3} ;

3.12 - Consumo específico do biogás e gasolina

A avaliação do consumo específico de biogás foi determinada em função da variação da carga do motor gerador utilizando como combustível o biogás em função do tempo. A equação mostra o cálculo do consumo específico de biogás em um intervalo de tempo:

$$CEB = \frac{1}{P_c} \times E_{fi}.$$

Onde:

CEB = Consumo específico de biogás, $\text{m}^3 \text{kWh}^{-1}$;

P_c = Poder calorífico do combustível, kJ/m^3 ;

E_{fi} = Eficiência do motor.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Consumo de gasolina

O consumo de gasolina aumentou à medida em que a carga exigida foi elevada, como podemos ver na Tabela 3, com as médias de consumo em função dos diferentes tratamentos e seu respectivo desvio padrão.

Tabela 3 - Média do consumo de gasolina em gramas no intervalo de tempo de dois minutos

Tratamento kW	Média	Desvio Padrão
0	40,28	1,62
250	40,43	1,17
500	40,41	1,33
750	48,36	1,87
1000	48,44	1,87
1250	48,76	2,23
1500	50,68	2,92
1750	55,54	2,81
2000	58,48	2,22
2250	58,66	2,21
2500	58,89	2,88

4.2 - Poder calorífico da gasolina

O poder calorífico de um determinado combustível refere-se à quantidade de calor que pode ser liberada em sua queima por unidade de massa ou de volume. Quando se considera que a água presente no combustível condensa e permanece em estado líquido, tem-se o poder calorífico superior (PCS). O poder calorífico inferior (PCI) é calculado quando se considera que a água presente na biomassa fique na forma de vapor. Na prática, pode-se dizer que o PCI é a quantidade de calor que pode efetivamente ser extraído do combustível, sendo em média 10 a 20% menor que o PCS (NOGUEIRA & RENDEIRO, 2008).

O resultado dos ensaios com as amostras coletadas da gasolina utilizada no experimento podem ser vistos na Tabela 4, com a determinação média do poder calorífico.

Tabela 4 - Poder Calorífico Inferior da Gasolina

Amostra	Poder calorífico Superior em kJ/kg	Poder calorífico Inferior em kJ/kg
1	54143	45482
2	51536	43308
3	52727	44309
4	50943	42813
5	48722	40943
6	50657	42569
7	52076	43762
8	53538	44992
Média	51790	43522
Desvio Padrão	1,61	1,45

Segundo Muraro (2006), o poder calorífico inferior da gasolina sofre alterações devido a sua origem e concentração de aditivos, podendo apresentar uma variação de 4189,3 kJ/kg podendo chegar a 4621,1 kJ/kg.

4.3 - Características do Biogás coletado

Na Tabela 5, constam os resultados das coletas de biogás, realizadas no decorrer do experimento na estação de tratamento de esgotos, as quais seguiram para o laboratório de gaseificação da Unioeste, campus Cascavel. Para avaliação com o analisador de gases Drager xl 7000, Fig. 16.

Tabela 5 - Amostras de biogás com o percentual de gás metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂) e gás sulfídrico H₂S. Estação de Tratamento de Esgoto.

Amostra	CH ₄ %	CO ₂ %	O ₂ %	H ₂ S PPM
1	69	29,11	0,09	0,9
2	69	29,6	0,1	1,3
3	70	28,9	0,1	1
4	70	28,97	0,1	0,93
5	70	28,68	0,12	1,2
6	70	28,68	0,12	1,2
7	70	29	0,1	0,9
8	70	28,89	0,11	1
9	69	29,88	0,12	1
10	68	30	0,9	1,1
Média	69,5	29,17	0,18	1,05

Na tabela 5, podemos observar que as concentrações de gás Metano (CH₄) giram em torno de 69,5 %, Dióxido de Carbono (CO₂) em torno de 29,17 %, oxigênio em torno de 0,18% e de gás sulfídrico de 1,05 % no biogás produzido.

Segundo Coelho, et al. (2006), foram encontrados valores semelhantes, conseguindo as concentrações para o gás Metano (CH₄) de 65,5 % para o Dióxido de Carbono (CO₂) 30,5 % e para o gás sulfídrico foi de 134 ppm, com um poder calorífico inferior próximo a 5300 kcal/kg.

Portanto, a produção de biogás pelo reator RALF apresentou uma alternativa potencial para a produção de energia.

A Tabela 6, mostra os resultados do biogás proveniente de suinocultura, coletadas na saída do biodigestor e avaliadas com o analisador de gases Drager xl 7000, figura 16.

Tabela 6- Amostras de biogás com o percentual de gás metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂) e gás sulfídrico H₂S. Biogás Suinocultura.

Amostra	CH ₄ %	CO ₂ %	O ₂ %	H ₂ S ppm
1	67	30	0,9	2,1
2	68	29,6	0,1	2,3
3	69	28,9	0,1	2
4	69	28,6	0,1	2,3
5	68	29,48	0,12	2,4
Média	68,2	29,316	0,264	2,22

4.4 - Consumo de biogás

Na tabela 7, podemos observar o consumo do biogás em função das diferentes cargas.

Tabela 7 - Consumo do biogás em m³ a cada dois minutos

Tratamento W	Bio ETE	Bio Suíno
0	0,061	0,060
250	0,062	0,062
500	0,064	0,063
750	0,071	0,075
1000	0,073	0,089
1250	0,075	0,090
1500	0,078	0,092
2000	0,085	0,101
2250	0,090	0,109
2500	0,099	0,114

A grande quantidade de metano presente no biogás proporcionou um desempenho satisfatório na simulação de diferentes condições de trabalho.

Para Wildner (2006), o consumo de um motor do ciclo Otto está ligado às condições de carga e de conservação do mesmo, podendo apresentar grandes variações de consumo sem nenhuma razão aparente.

4.5 - Comparativo das emissões de gases biogás x gasolina

Os gráficos a seguir mostram os resultados das emissões de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e óxido de nitrogênio (NO_x), coletadas no escapamento do motor através do analisador de gases Bacharach Fig. 19.

4.5.1 - Emissões de dióxido de carbono (CO_2)

O gráfico 1, mostra que em media as emissão de CO_2 foram maiores pelo biogás na ordem de 39 % em relação as emissões da gasolina. Com o biogás de suinocultura com um comportamento mais uniforme enquanto o biogás de tratamento de esgoto apresentando uma maior variação com o acréscimo de carga.

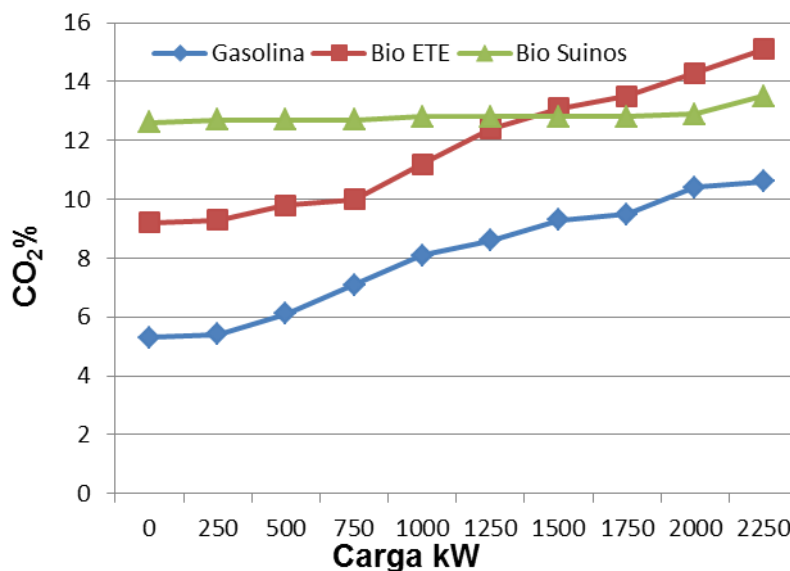


Gráfico 1 - Emissões de CO_2 em %

Segundo Rakopoulos et. al. (2006), a maior liberação de CO_2 se deve à grande quantidade deste gás em sua composição e também pelo motor apresentar maior consumo quando operado com esse combustível, o que irá refletir também nas emissões.

4.5.2 - Emissões de monóxido de carbono (CO)

Na análise do monóxido de carbono (CO), as emissões de gasolina superaram as do biogás, apesar de que quando submetido a uma maior carga as emissões de CO cessaram, como podemos ver no gráfico 2.

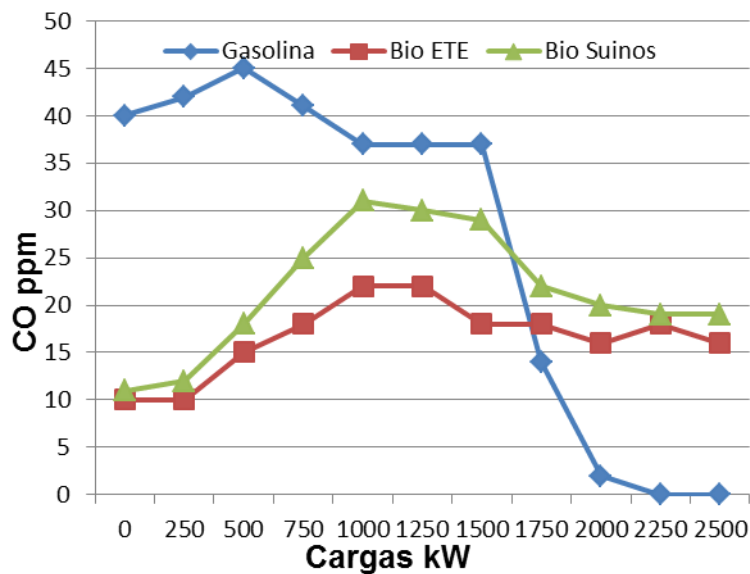


Gráfico 2 - Emissões de CO em ppm

Para Korakianitis et al. (2011), motores operando com gás natural apresentam redução de 50 a 90% das emissões de CO quando comparados com os motores originalmente utilizados para operar com gasolina. Este fato se deve principalmente a menor razão de equivalência com que o primeiro motor funciona.

Segundo Lemos (2013), as emissões de CO estão ligadas a combustão mais completa do combustível, alcançadas a maiores temperaturas, com o maior aquecimento da substância há a quebra da molécula e maior liberação de calor, restando menor quantidade de partículas carbono.

4.5.3 - Emissões óxido de nitrogênio (NO_x)

Podemos observar no gráfico 3, as emissões de óxido de nitrogênio em partes por milhão, em que o biogás emite cerca de 21 % mais partículas que a gasolina, essa diferença se acentua ao ponto que as cargas aumentam e assim há uma maior temperatura do motor.

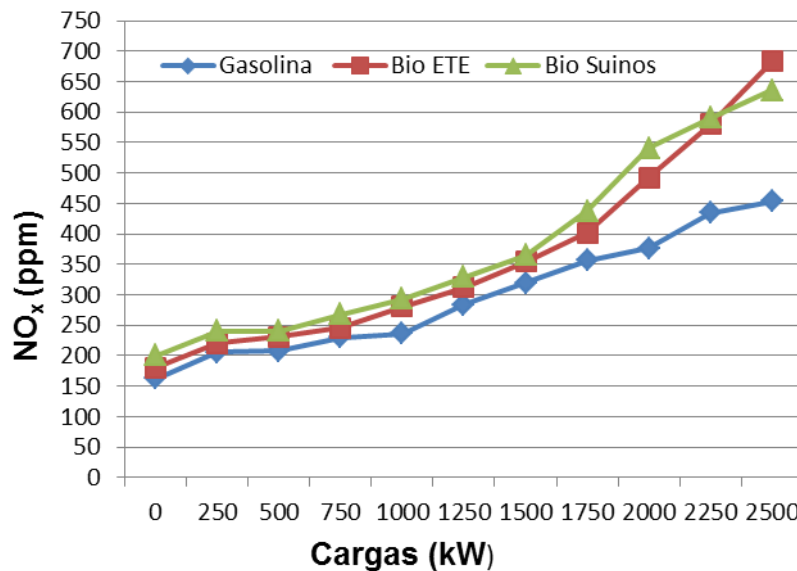


Gráfico 3 - Emissões de NO_x em ppm

Segundo Kapadia (2006), a formação de NO_x está relacionada à maior liberação de calor na combustão e, conseqüentemente, às maiores temperaturas atingidas.

Para Crookes (2006), a gasolina por ter um poder calorífico maior não exerce pressão sobre o motor, enquanto o biogás por ser um combustível rico em CO_2 , submete o motor a um maior aquecimento, favorecendo a formação de NO_x .

4.6 – Eficiência global do conjunto motor-gerador

No gráfico 4, temos a eficiência global do motor operando com biogás de uma estação de tratamento de esgotos (Bio ETE), biogás proveniente de suinocultura (Bio Suíno) e gasolina, levando em consideração a energia gerada em relação a queima do combustível e posterior transformação da energia mecânica em energia elétrica. Obteve-se um rendimento

muito baixo quando trabalhado com biogás como combustível, chegando à carga máxima de 20 % da capacidade do motor-gerador, o que refletiu na sua eficiência, apresentando uma redução de 76 % quando comparado com gasolina.

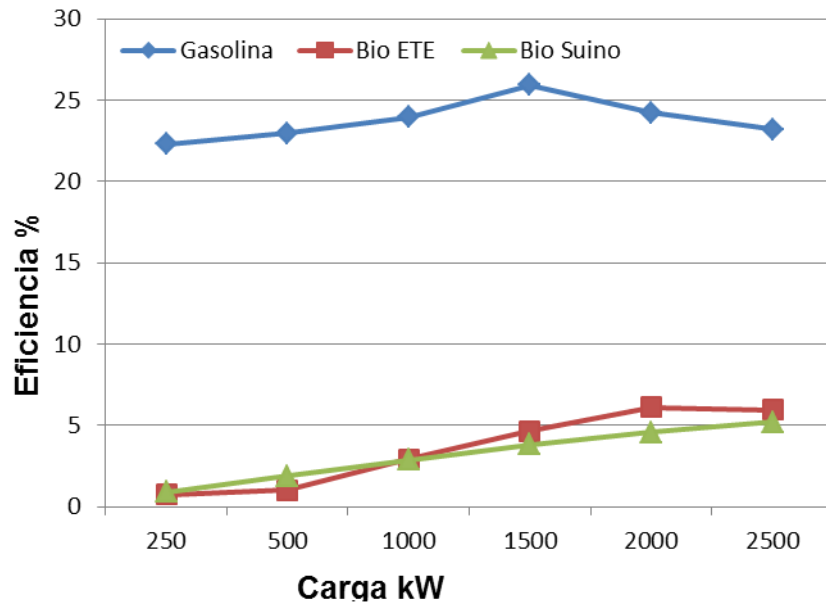


Gráfico 4 – Eficiência Global

De acordo com Gallo (1990), motores originalmente projetados para operar com gasolina, necessitam de ajustes na câmara de compressão e no tamanho do pistões. Para Souza (2004), os melhores resultados de um motor ciclo Otto alimentado com biogás são obtidos quando há o ajuste da taxa de compressão e o avanço no ponto de ignição em 45°. O motor utilizado apenas foi adaptado para o uso do biogás com a substituição do carburador por um misturador ar/combustível tipo Venturi Fig. 5.

4.7 – Consumo específico do biogás e da gasolina

O gráfico 5, trás o consumo específico do biogás e da gasolina em kWh, como o rendimento do motor foi baixo para os ensaios realizados com biogás, refletiu em um consumo específico alto gerando pouca energia.

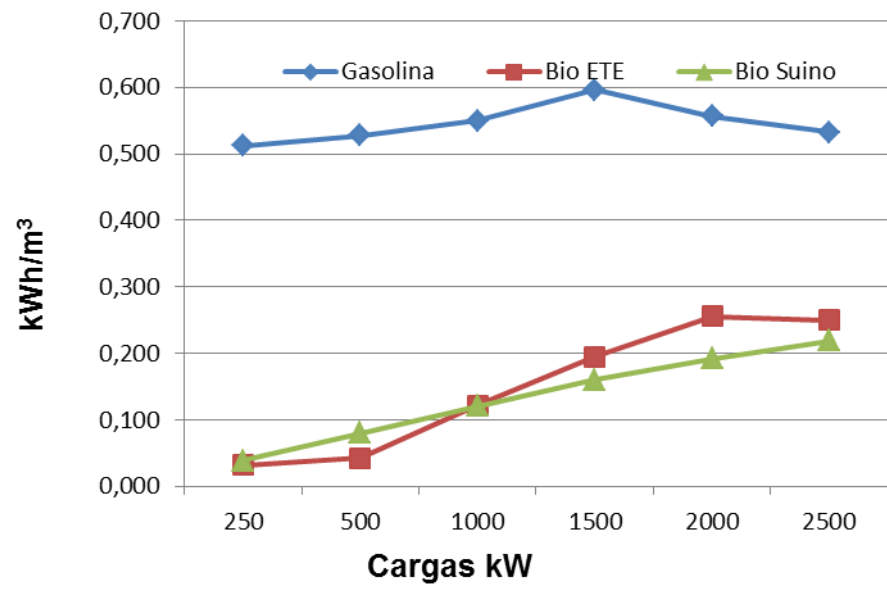


Gráfico 5 – Consumo específico

5- Conclusão

A utilização do biogás proveniente de biodigestores tipo Ralf, utilizados em Estações de tratamento de esgoto é uma alternativa para geração de energia elétrica, apresentando uma elevada concentração de metano em torno de 69,5%, assim como, o biogás resultante de dejetos suínos com uma concentração média de 68,2%.

As emissões dos ensaios com biogás foram maiores que aquelas com gasolina, nos melhores resultados com 27% para o dióxido de carbono (CO_2), e 21 % de óxido de nitrogênio (NO_x) pelo biogás de suinocultura e 13 % para o dióxido de carbono (CO_2), e 24% de óxido de nitrogênio (NO_x) pelo biogás da Estação de Tratamento de Esgoto e uma diminuição respectivamente de 16% e 43% para o monóxido de carbono (CO), tais resultados foram influenciado pelo baixo rendimento do motor. Ressaltando a possibilidade de usar esse biogás que seria liberado in natura na atmosfera, como fonte energética, transformando o gás metano presente em grande quantidade no mesmo em outros gases mencionados acima de menor potencial poluente.

Com o baixo rendimento do motor-gerador apresentado no trabalho, observou-se que há a necessidade de maiores adaptações no motor, sendo inviável para o aproveitamento energético a sua utilização apenas com a substituição do carburador por um misturador de ar tipo Venturi, tendo ainda que alterar a taxa de compressão e avanço de ignição.

Com a presença do gás sulfídrico (H_2S) em maiores quantidades no biogás de suinocultura em média 2,22% do que no biogás da Estação de Tratamento de Esgoto em média 1,05%, há a necessidade de um sistema de filtragem para diminuição desse percentual, já que o presente gás provoca a oxidação de ligas metálicas do motor.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomendo testes utilizando diferentes taxas de compressão e avanço na ignição, para um maior rendimento.

6 – REFERÊNCIAS

ANDRADE Neto, C. O. **Sistemas Simples para Tratamento de Esgotos Sanitários – Experiência Brasileira**. 301p. Rio de Janeiro, ABES, 1997.

ANEEL, **Banco de Informações de Geração distribuída no Brasil, 2012**. 8º Edição. Brasília, 2012. Disponível em www.aneel.org.br Acesso 21 de dezembro de 2013.

BIOGASBURNER. **Design equations for gás burner**. Disponíveis em: www.biogas.wikispaces.com/Biogasburners. Acesso em: 25 dez.2013.

BLEY JUNIOR, C. J. **Economia do Biogás**. Informativo plataforma Itaipu de energias renováveis. Itaipu. Foz do Iguaçu, 2012.

BRENNEISEN, P. J., **Desempenho de motogerador de ciclo diesel operando com gás de gasificação/diesel ou biogás/diesel**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013. p. 54.

CARON, C.F., MESSIAS, J.N., FILHO, J.S.C., RUSSI, J.C.V., WEBER, M.I., **Geração de energia no campo a partir da biodigestão anaeróbica**. Tuiuti: Ciência e Cultura, n°. 42, p 63-73, Curitiba, 2009.

CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H.J. Biodigestores. IN: **VI Semana de tecnologia em Alimentos. Anais**. Ponta Grossa, 2008.

CASTRO, R. **Energias renováveis e produção descentralizada**. DEEC, Área científica de energia, Instituto superior técnico da Universidade técnica de Lisboa, 2006.

CORREA, A. S. **A influencia da folga de válvulas na geração de ruído e vibração no motor fire 999cc 8v**. (Dissertação de Mestrado). Universidade federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2003.

COSTA, D. F. **Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização**. (Monografia). Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CROOKES, R. **Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines**, Biomass and Bioenergy, vol. 30, pp. 461-468, 2006.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. In **Encontro de energia do meio rural**. Anais. Bauru, 2002.

FERREIRA, J.C.B.; SILVA, J.N. **Biodigestor: aplicação e potencialidades. Um estudo de caso do IFMG campus Bambuí**. In: **II Semana de Ciência e tecnologia do IFMG. Campus Bambuí**. Anais. Bambuí, 2009.

GALLO, W.L.R. **Análise Exergética de Motores a Gasolina e a Álcool**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1990.

IANNICELLI, L. A. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira**. Taubaté: DEM/UNITAL, 2008. Dissertação mestrado.

KAPADIA, B. K. **Development of a single cylinder SI engine for 100% biogas operation, Bangalore**: Indian Institute of Science, 2006.

KORAKIANITIS, T.; NAMASIVAYAM, A. ; CROOKES, R. **Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions**, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 37, pp. 89-112, 2011.

Lemos, M. V. D. **Uso Eficiente de Biogás de Esgoto em Motores Geradores** – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

MACARI, N. C., RICHARDSON, R.D. **Operation of a Caterpillar 3516 spark-ignited engine engine on low-Btu fuel**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Transactions of the ASME, V.109, pp.443-447, 1987.

MARTINS, Lydimilla Santos. **Geração de Energia através de Biomassa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal

do Espírito Santo, Vitória, ES: UFES, 2006.

MUELLER, G. P. **Landfill gas application development of the cartepillar G3600 spark-ignited gas engine**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Transactions of the ASME, V.117, pp.820-825, 1995.

MURARO, Wilson. **Avaliação do Funcionamento de Motor Ice com Gás de Baixo Poder Calorífico Proveniente da Gaseificação da Casca de Arroz**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 2006.

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

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e aplicações**. 2ª ed. - Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2004.

NOGUEIRA, M. F. M., RENDEIRO, G. **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal**. In : MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME. Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida – Soluções Energéticas para a Amazônia. 1º Edição. Brasília, 2008. p. 52-63.

OLIVER, A.P.; SOUZA, A.A.; QUADROS, D.G.; VALLADARES, R.E. **Manual de treinamento em biodigestão**. Salvador- BA. WINROCK, 2008. p. 23.

ONU, **Relatório da concentração populacional mundial**. Unic, Rio de Janeiro 2013. Disponível em www.onu.org.br/onu-mais-de-70-da-populacao-mundial-vivera-em-cidades-ate-2050/.

PECORA, V., **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de caso** (Dissertação de Mestrado). Programa interunidades de Pós-Graduação em energia (PIPGE) do Instituto de eletrotécnica e energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA, R. S. **Poluição hídrica causas e consequências**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas UFRGS, 19p. 2004.

PRATI, L. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores**. Curitiba: UFP, 2010. p. 83. Monografia.

RAKOPOULOS, C. D. ; ANTONOPOULOS, K. A.; HOUNTALAS D. T.; GIAKOURIS E. G.; **Comparative performance and emissions study of a direct injection diesel engine using blends of diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins**, Energy Conversion and Management, vol. 47, p. 3272– 3287, 2006.

SALOMON, K.R. **Avaliação Técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Universidade federal de Itajubá, UFI tajuba-MG, 128f.

SOUZA, S. N. M. **Production potencial of biogás n sugar and ethanol plants for use in urban buses in Brazil**. International Journal of Food, Agriculture and Environmet (print), p. 910, 2012.

SOUZA, J.; Souza S.M.N.; Machado P.R.M. **Desempenho de um motor ciclo Otto utilizando Biogás como combustível**. Scielo, Energia e meio rural. 2004.

SPELLMAN, F.R. **Handbook of water and wastewater treatment plants operations**, Boca Raton, FL, CRC PRESS, 2009, 2 ed., cap. 19, p. 667.