

**DESEMPENHO DO CONJUNTO
MOTOGERADOR ADAPTADO A BIOGÁS**

RODRIGO GOMIDE DE SOUZA

2006

RODRIGO GOMIDE DE SOUZA

**DESEMPENHO DO CONJUNTO MOTOGERADOR
ADAPTADO A BIOGÁS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Automação Agrícola, para a obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Fábio Moreira da Silva

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2006

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Souza, Rodrigo Gomide de

Desempenho do conjunto motogerador adaptado a biogás /
Rodrigo Gomide de Souza. -- Lavras : UFLA, 2006.

40 p. : il.

Orientador: Fábio Moreira da Silva.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Combustível alternativo. 2. Motor a combustão. 3. Carburador.
4. Energia gerada. 5. Avanço de centelha. I. Universidade Federal
de Lavras. II. Título.

CDD-665.776

RODRIGO GOMIDE DE SOUZA

**DESEMPENHO DO CONJUNTO MOTOGERADOR
ADAPTADO A BIOGÁS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Automação Agrícola, para a obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 22 de março 2006

Prof. Dr. Rogério Alexandre Alves de Melo

UNINCOR – BH

Prof. Dr. Gilmar Tavares

UFLA

Prof. Dr. Fábio Moreira da Silva

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL

A Deus,
por iluminar meu caminho, guiar meus passos e proteger a minha
caminhada rumo aos meus objetivos,

OFEREÇO

Aos meus pais, Vicente Augusto, Elizabeth Gomide e familiares, pelo
amor e incentivo;

À Jaciara, pelo apoio,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade de realização do curso.

Em especial, ao professor Dr. Fábio Moreira da Silva, por orientar-me durante todo o mestrado.

Aos professores Carlos Eduardo Silva Volpato, Nilson Salvador, Giovanni Francisco Rabelo, Fábio Moreira da Silva e Cláudio Milton Montenegro Campos, por contribuírem com seus conhecimentos nas disciplinas ministradas.

Aos colegas Ezequiel, Ariston, Reginaldo, Daniela e Adriano e, especialmente, ao meu pai, pela ajuda e contribuição prestada ao experimento.

À minha família, por incentivar-me sempre, apoiar-me e encorajar-me nos momentos difíceis e, em especial, à minha namorada, pela compreensão.

MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral.....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 Histórico.....	4
2.2 Biogás.....	5
2.3 Biofertilizante.....	9
2.4 Vantagens do biogás.....	10
2.5 Motores de combustão interna.....	10
2.6 Motores 4 tempos.....	11
2.7 Carburador.....	12
2.8 Carburador a gás.....	14
2.9 Considerações sobre avanço de centelha.....	15
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1 Local do experimento.....	17
3.2 Biodigestor modelo indiano.....	17
3.3 Motogerador.....	18
3.4 Método utilizado para medir o consumo de biogás.....	19
3.5 Método utilizado para medir o consumo de gasolina.....	20
3.6 Dimensionamento do carburador tipo venturi.....	21
3.7 Método utilizado para determinar a eficiência do motor.....	24
3.8 Método utilizado para determinar a energia calorífica.....	24
3.9 Ensaio do conjunto motogerador.....	25

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1	Resultados obtidos.....	28
4.2	Desempenho operacional do conjunto motogerador a gasolina.....	28
4.3	Desempenho operacional do conjunto motogerador a biogás com carburador tipo venturi dimensionado.....	30
4.4	Desempenho operacional do conjunto motogerador a biogás com carburador adaptado.....	32
4.5	Desempenho operacional do conjunto motogerador a biogás com carburador adaptado e centelha avançada.....	34
5	CONCLUSÕES.....	38
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

LISTA DE SÍMBOLOS

Ai	Área da Seção de Saída do Carburador (m^2)
Ci	Velocidade do Escoamento do Fluxo na Saída do Carburador ($m.s^{-1}$)
di	Diâmetro de Saída do Carburador (m)
d_v	Diâmetro do Venturi (m)
Ec	Energia Calorífica (kJ)
Hc	Poder Calorífico Inferior do Combustível ($kJ.kg^{-1}$)
Hd	Poder Calorífico Inferior da Gasolina ($kJ.kg^{-1}$)
Hg	Poder Calorífico Inferior do Biogás ($kJ.kg^{-1}$)
I	Corrente (Ampére)
m_c	Vazão Mássica de Combustível ($kg.h^{-1}$)
m_g	Vazão Mássica de Gasolina ($kg.h^{-1}$)
$m_{\dot{G}}$	Vazão Mássica de Biogás ($kg.h^{-1}$)
n	Diferença de Nível na Coluna da Proveta (cm)
N	Rotação do Motor (rpm)
P	Potência Fornecida pelo Gerador (Watt)
Pa	Pressão Barométrica local (kPa)
PA	Potência Ativa no Gerador (Watt)
p_{CH_4}	Proporção Mássica do Metano no Biogás ($kg.kg^{-1}$)
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
Pr	Potência Resistiva (Watt)
Qc	Vazão Volumétrica de Combustível ($l.h^{-1}$)
Qg	Vazão Volumétrica de Biogás ($l.h^{-1}$)
Qgas.	Vazão Volumétrica de gasolina ($l.h^{-1}$)

R	Resistência (Ω)
t	Tempo de Operação do Motor (h)
tg	Temperatura do Biogás ($^{\circ}\text{C}$)
U	Tensão (Volt)
Vd	Volume de Gasolina Consumido pelo Motor (ml)
Vg	Volume de Biogás Consumido pelo Motor (l)
Vi	Volume Admitido pelo Motor ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Vh	Cilindrada do Motor (l)
ρ_c	Massa Específica do Combustível ($\text{kg} \cdot \text{l}^{-1}$)
ρ_{δ}	Massa Específica da Gasolina ($\text{kg} \cdot \text{l}^{-1}$)
ρ_g	Massa Específica do Biogás ($\text{kg} \cdot \text{l}^{-1}$)
$\rho_{g.n}$	Massa Específica Norma do Biogás ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
η_{conj}	Eficiência do Conjunto Moto-Gerador (%)
$\eta_{\text{Vol.}}$	Eficiência Volumétrica (%)

RESUMO

SOUZA, Rodrigo Gomide. **Desempenho do conjunto motogerador adaptado a biogás, Lavras: UFLA, 2006. 40p.** (Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola)*

O presente trabalho foi desenvolvido na Estação de Produção e Uso de Biogás, da Universidade Federal de Lavras e o seu objetivo foi desenvolver e avaliar o sistema de alimentação a biogás de um motor estacionário de 4 tempos com 4077W de potência nominal à rotação de 4200 rpm acoplado a um gerador de 2400W com rotação operacional de 3600rpm. Os experimentos foram realizados com o motor operando a gasolina na sua versão original e adaptado para biogás. O biogás utilizado foi produzido em um biodigestor modelo indiano a partir de esterco bovino, contendo, em média, 63% de metano. Para todos os ensaios foram medidas as rotações e o consumo do motor, além da tensão e corrente gerada para alimentar três potências resistivas iguais a 1000, 1200 e 1500W. Para o conjunto motogerador alimentado a gasolina na sua versão original, observou-se uma potência média gerada de 840,2W com tensão média de 109 volts e eficiência média do conjunto de 12,14%. Para o conjunto motogerador operando a biogás foram experimentadas duas opções de carburação: uma com o carburador tipo venturi especialmente dimensionado, em que a potência média gerada foi de 859,7W com tensão média de 103volts e eficiência média de 6,71%, e a outra com o próprio carburador original do motor adaptado para operar com biogás. Foram ensaiados com o carburador original adaptado, operando com a centelha no ponto normal e com a centelha no ponto avançado, quando observaram-se respectivamente, uma potência média gerada de 795,40W, tensão média de 99,10 volts e eficiência média de 6,56% contra uma potência média de 934,59W, tensão média 100,90 volts e eficiência média de 8,22%. Este último teve o melhor desempenho obtido do conjunto operando a biogás, o que foi conseguido avançando-se a centelha em +4,82° em relação ao ponto original.

Comitê Orientador: Prof. Dr. Fábio Moreira da Silva – UFLA (Orientador)

ABSTRACT

SOUZA, Rodrigo Gomide. **ACTING OF THE GROUP ADAPTED MOTORCYCLE-GENERATOR BIOGAS**, Lavras: UFLA, 2006. 40p. (Dissertation - Master's degree in Agricultural Engineering) *

The present work was conducted in the Unity of Production and Use of Biogas, at the Universidade Federal de Lavras. Its objective was to develop and to evaluate the biogas powering system of a 4 -timing stationary motor with 4077W nominal potency to a 4200 rpm rotation,, coupled to a generator of 2400W with operational rotation of 3600rpm. The experiments were accomplished with a gasoline operating motor on its original version and adapted for biogas. The used biogas was produced in a biodigestor Indian model starting from bovine manure, containing, an average of 63% of methane. For all the experiments, it was measured the rotations and the consumption of the motor, besides the tension and generated current to feed the three resistive potencies equal to 1000, 1200 and 1500W. For the motor-generator group using gasoline in its original version, it was observed a medium potency of 840,2W with medium tension of 109 volts and medium efficiency of the group of 12,14%. For the motor-generator operating with biogas, it was experienced two carburetion options: one with the venturi-type carburetor especially calculated, in which the generated medium potency was of 859,7W with medium tension of 103volts and medium efficiency of 6,71%; and the other with the original carburetor of the adapted motor to operate with biogas. They were experienced with the adapted original carburetor, operating with the spark-plug on the normal position and with the spark-plug on the advanced position, being observed respectively, a generated medium potency of 795,40W, medium tension of 99,10 volts and medium efficiency of 6,56% against a medium potency of 934,59W, medium tension of 100,90 volts and medium efficiency of 8,22%. This last one had the best performance for the biogas operating machine, which was obtained by moving the spark-plug to + 4,82° in relation to the original position.

Guiding committee: Dr. Fábio Moreira da Silva - UFLA (Major Professor)

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das nações está diretamente relacionado à oferta de componentes energéticos, água e alimentos, sendo muito difícil analisar a prioridade de um deles independente dos demais, bem como das questões de ordem ambiental. A crise de petróleo, nos anos 1970, fez com que o mundo despertasse para a busca de formas alternativas de energia. O Brasil determinou a criação do Proálcool nos anos 1980 e outros programas de incentivo ao uso de combustíveis alternativos, como óleo vegetal, gasogênio, gás natural, biogás, etc.

Na década de 1990, a preocupação mundial passou a ser a da qualidade do ambiente. Em 1992, na cidade do Rio de Janeiro, foi realizada a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como RIO 92, que teve, como resultado e plano de ação, a Agenda 21, que estabelece a substituição de 20% das fontes energéticas por renováveis até o ano 2000 e 50% até o ano 2020. Mais uma vez, os combustíveis alternativos e renováveis vêm à tona, como uma das soluções para o desenvolvimento auto-sustentado, Agenda 21(1992).

Contribuindo também com o nobre objetivo de preservar o planeta Terra, traçado pela Agenda 21, Protocolo de Kyoto, o Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras oferece, na modalidade de especialização lato Sensu, um curso denominado Formas Alternativas de Energia. Neste curso, além de energia solar, energia eólica, gaseificação da madeira, microcentrais hidrelétricas, carneiro hidráulico e roda movida por água, e célula combustível, abordam-se também o biogás e os biocombustíveis.

Na atual conjuntura mundial, os combustíveis alternativos e renováveis estão em destaque uma vez que o preço do barril de petróleo supera os setenta

dólares. Especificamente no meio rural, a utilização do biogás é uma opção que pode ser mais explorada.

A utilização do biogás como combustível para o acionamento de equipamentos estacionários, sem dúvida, é a maneira mais prática, simples e, muito provavelmente, mais econômica de se aproveitar esta forma de energia alternativa.

O biogás é, basicamente composto de 60% a 75% de CH₄ (metano), 25% a 40% de CO₂ (dióxido de carbono) e traços de H₂S, N₂, H₂, CO, O, etc. Ele tem sido utilizado por meio da combustão em fogões, aquecedores, incubadoras e pequenos motores, etc., normalmente equipamentos de uso estacionário. Em motores estacionários, pode-se utilizar o biogás diretamente produzido nos biodigestores para o acionamento de bombas hidráulicas e geradores de energia, sendo, assim, uma grande vantagem o seu uso no meio rural.

Como os equipamentos estacionários podem ser alimentados com biogás diretamente dos biodigestores, não se justifica fazer a purificação do biogás para a obtenção do metano. É sempre importante lembrar que a queima *in natura* do biogás, devido à presença do CO₂, é mais lenta e, energeticamente, libera menos calor por unidade de massa ou volume que os gases combustíveis convencionais, como o gás liquefeito de petróleo, ou GLP e o gás natural, o que deve ser considerado no dimensionamento dos equipamentos ou redimensionamento dos já existentes. O poder calorífico do GLP, em média, é da ordem de 46.000kJ/kg e o do gás natural de 43.500kJ/kg, contra 19.500kJ/kg do biogás.

1.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver e avaliar o sistema de alimentação a biogás de um motor estacionário de 4 tempos acoplado a um gerador.

1.2 Objetivos específicos

Especificamente, este trabalho buscou:

- avaliar o desempenho operacional do conjunto motogerador, operando originalmente com gasolina e adaptado para biogás;
- desenvolver o carburador tipo venturi para a alimentar o motogerador com biogás e avaliar seu desempenho;
- adaptar o carburador original do motor para operar com biogás e avaliar seu desempenho;
- determinar as curvas da potência ativa do gerador e eficiência do conjunto motogerador, em função do consumo nas diversas condições ensaiadas, com gasolina e biogás.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico

A história registra que o gás metano foi identificado em 1776, por Alessandro Volta, na Itália, como resultado da decomposição de resíduos vegetais em ambientes confinados. Segundo Arcuri (1986), Alessandro Volta foi o primeiro estudioso a reconhecer a relação íntima entre a decomposição de material vegetal no fundo de lagos e o aparecimento do gás combustível. Por outro lado, a história científica da digestão anaeróbia de resíduos agrícolas teve início em 1808.

A decomposição anaeróbia ocorre em ambientes naturais onde existam matéria orgânica em excesso e ausência de oxigênio, como em pântanos, lagos e tratos intestinais de animais. Da atividade metabólica dos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia pode resultar uma mistura gasosa combustível conhecida como “*Ignis fatuus*”, vulgarmente conhecido como fogo fátuo, gás dos pântanos e biogás, Arcuri (1986).

Só em 1857, perto de Bombaim, na Índia, foi construída num leprosário a primeira instalação destinada a produzir gás combustível. A Índia tem desenvolvido uma larga propagação com biodigestores, com uma estimativa de um total de mais de meio milhão de unidades instaladas, dados do ano de 1983 da Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras (CAEEB,1981).

A China é o país que mais desenvolveu o biogás no âmbito rural, visando prover, principalmente, energia para cozimento e iluminação doméstica, Seixas et al. (1980).

No Brasil, os estudos com biogás foram iniciados de maneira mais intensa em 1976, entretanto, os resultados alcançados já asseguram um bom domínio tecnológico, podendo qualificar o país apto a desenvolver um vasto

programa no âmbito nacional com biogás, seja no setor agrícola ou no setor industrial, Seixas et al. (1980).

2.2 Biogás

O biogás é um gás inflamável produzido por microorganismos, quando matérias orgânicas são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez, em um ambiente impermeável ao ar.

O metano, principal componente do biogás, não tem cheiro, cor ou sabor, mas, os outros gases presentes conferem-lhe um ligeiro odor de alho ou de ovo podre, Seixas et al. (1980). Esse é um processo natural que ocorre em pântanos, mangues, lagos e rios, e é uma parte importante do ciclo biogeoquímico do carbono, (Arcuri, 1986).

A produção de biogás também é possível a partir de diversos resíduos orgânicos, como esterco de animais, lodo de esgoto, lixo doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas. Nesse caso, quando a digestão anaeróbia é realizada em biodigestores especialmente planejados, a mistura gasosa produzida pode ser usada como combustível, o qual, além de seu alto poder calorífico, de não produzir gases tóxicos durante a queima e de ser uma ótima alternativa para o aproveitamento do lixo orgânico, ainda deixa como resíduo um lodo, que é um excelente biofertilizante.

O processo de produção do biogás depende da temperatura e do pH do substrato, da concentração de nutrientes e de sólidos da solução. As dimensões dos biodigestores devem levar em conta, também, a produção de resíduos disponíveis para abastecê-los (Teixeira, 1998).

A produção do gás tem sua ótima velocidade com pH entre 7 e 7,1 e temperatura ao redor de 35° C. Em pH menores que 6,4, a geração do gás é

paralisada e, em temperaturas abaixo de 15°C, a produção é muito pequena. (Teixeira, 1998).

Segundo Arcuri (1986), a produção média diária de biogás é afetada pela temperatura ambiente. Em seu trabalho, foram feitas observações durante períodos mais quentes e mais frios do ano de 1984 e 1985 e foi observado que a produção média diária máxima de biogás no período mais quente do ano ficou em torno de 30,8m³ biogás/dia no mês de março de 1985. As temperaturas média do ambiente e da massa naquele mês foram de 25°C e 27,3°C, respectivamente. No período mais frio, a produção média caiu para 21,8m³ biogás/dia, no mês de setembro de 1984 e a temperatura naquele mês foi de 20,4°C e da massa 21,9°C, representando uma queda considerável de 70,78% na produção média diária. Nos dias atuais, esse problema pode ser minimizado com uma adaptação de um aquecedor solar próximo ao biodigestor, como foi feito na Estação de Produção e Uso de Biogás do Departamento de Engenharia da UFLA, para se fazer a mistura de água aquecida com água em temperatura ambiente e dejetos animais. Dessa forma, pode-se amenizar o problema na queda de produção em meses mais frios.

TABELA 1. Correlação das características térmicas do biogás e metano com outros combustíveis convencionais.

Combustível	Biogás*	Metano	Álcool	Gasolina
Quantidade	1 m ³	1 m ³	1 litro	1 litro
Calor liberado (kJ)	23.400	36.000	19.812	32.486
Massa específica (kg/m ³)	1,2	0,72	809	739
Poder calorífico Inferior (KJ/kg)	19.500	50.000	24.490	43.960
Iso-octanas	130	100	99	85
Razão de compressão	15 – 20	10 - 18	6 - 12	6 - 10
Temperatura de ignição no ar (°C)	650	650	-	220
Ar/combustível Estequiométrico (kg/kg)	10,2	17,2	9,0	14,8
1 m ³ de metano equivale	1,5 m ³	1,0 m ³	1,8 litro	1,1 litro
1 m ³ de biogás equivale	1,0 m ³	0,65 m ³	1,2 litro	0,72 litro

* Biogás com 65% de metano

Fontes: Taylor (1971), Barra (1985) e Mitzlaff (1988)

Pelos dados da Tabela 1, pode-se observar que o biogás possui um baixo poder calorífico em relação aos outros combustíveis, o que se deve à presença de dióxido de carbono (CO₂) no biogás. Sendo assim, não é indicado o seu uso *in natura* em motores automotivos, pelo fato de gerar perda de potência. Mas, em questão de segurança, ele é um combustível bastante seguro, possuindo alta temperatura de ignição no ar (650°C contra e da gasolina) e também um alto índice de iso-octanas em relação à gasolina e uma boa taxa de compressão, quando equiparado com outros combustíveis do ciclo Otto. Assim sendo, pode-se indicar seu uso, mesmo *in natura*, em motores do ciclo Otto estacionários como combustível para a geração de potência, fogões, aquecedores, incubadoras, etc.

No meio rural, principalmente onde existem grandes quantidades de animais confinados capazes de gerar uma enorme quantidade de dejetos, é viável a existência de biodigestores para a produção de biogás, evitando-se assim, a poluição do meio ambiente e contribuindo para geração de uma forma de energia limpa e renovável.

Benincasa et al. (1991) relatam que a partir da produção média diária de esterco de um bovino adulto, cerca de 25 kg, pode-se obter 1m³ de biogás, correspondente a 0,72 litros de gasolina.

Segundo Seixas et al. (1980), a decomposição bacteriana de matéria orgânica sob condições anaeróbias é feita em três fases: 1) fase de hidrólise, 2) fase ácida e 3) fase metanogênica, as quais são descritas a seguir:

1) fase de hidrólise - nesta fase, as bactérias liberam no meio as chamadas enzimas extracelulares, as quais irão promover a hidrólise das partículas e transformar as moléculas maiores em moléculas menores e solúvel ao meio;

2) fase ácida - nesta fase, as bactérias produtoras de ácidos transformam moléculas de proteínas, gorduras e carboidratos em ácidos orgânicos (ácido láctico e ácido butírico), etanol, amônia, hidrogênio e dióxido de carbono, entre outros;

3) fase metanogênica - as bactérias metanogênicas atuam sobre o hidrogênio e o dióxido de carbono, transformando-os em metano (CH₄). Esta fase limita a velocidade da cadeia de reações, devido, principalmente, à formação de microbolhas de metano e dióxido de carbono, em torno da bactéria metanogênica, isolando-a do contato direto com a mistura em digestão. Por essa razão, a agitação no digestor é prática sempre recomendável, por meio de movimentos giratórios do gasômetro.

2.3 Biofertilizante

De acordo com Seixas et al. (1980), depois de passarem no digestor, os resíduos sobrantes apresentam alta qualidade para uso como fertilizante agrícola, devido, principalmente, aos seguintes aspectos:

- diminuição no teor de carbono do material, pois a matéria orgânica ao ser digerida perde exclusivamente carbono na forma de CH_4 e CO_2 ;
- aumento no teor de nitrogênio e demais nutrientes em consequência da perda de carbono;
- diminuição na relação C/N da matéria orgânica, o que melhora as condições do material para fins agrícolas;
- maior facilidade de imobilização do biofertilizante pelos microrganismos do solo, devido ao material já se encontrar em grau avançado de decomposição o que vem aumentar a eficiência do biofertilizante;
- solubilização parcial de alguns nutrientes.

De acordo com a Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras (CAEEB,1981), o resíduo decorrente da decomposição da matéria orgânica, por processo anaeróbio, apresenta as seguintes vantagens:

- a) o conteúdo de matéria orgânica do resíduo resulta em uma capacidade de retenção de umidade pelo solo, evitando demora no crescimento das plantas durante o tempo seco;
- b) um melhoramento na estrutura do solo, especialmente em argilas, permitindo maior penetração de ar e, conseqüentemente, um estímulo de oxidação da matéria orgânica pelos organismos do solo;
- c) introdução de certos minerais necessários ao crescimento das plantas;

2.4 Vantagens do biogás

A produção de biogás representa um avanço importante no sentido da solução do problema da disponibilidade de combustível no meio rural, por interessar a toda a população nele residente.

A redução das necessidades de lenha poupa as matas. A produção de biogás representa um importante meio de estímulo à agricultura, promovendo a devolução de produtos vegetais ao solo e aumentando o volume e a qualidade de adubo orgânico. Os excrementos fermentados aumentam o rendimento agrícola. O biogás, substituindo o gás de petróleo no meio rural, elimina também os custos do transporte de bujão de gás dos estoques do litoral ao interior. O uso do biogás na cozinha é higiênico, não desprende fumaça e não deixa resíduos nas panelas. As donas de casa ficam livres de pesadas tarefas domésticas, como mobilizar carvão e lenha para a cozinha.

O desenvolvimento de um programa de biogás também representa um recurso eficiente para tratar os excrementos e melhorar a higiene e o padrão sanitário do meio rural.

Segundo Seixas et al. (1980), "o lançamento de dejetos humanos e animais num digestor de biogás soluciona os problemas de dar fins aos ovos dos esquistossomos e ancilóstomos, bem como de bactérias, bacilos desintéricos e paratíficos e de outros parasitas."

2.5 Motores de combustão interna

Os motores de combustão podem ser classificados como do tipo de combustão externa, no qual o fluido de trabalho está completamente separado da mistura ar-combustível e o calor dos produtos da combustão são transferido através das paredes da caldeira, e do tipo de combustão interna, no qual o fluido

de trabalho consiste nos produtos da combustão da mistura ar-combustível propriamente (Taylor, 1971).

Segundo Andrade et al. (1975), os motores de combustão interna são máquinas que transformam a energia calorífica do combustível em energia mecânica diretamente utilizável. São chamados de combustão interna porque a mistura ar-combustível é queimada internamente em um cilindro.

Definições Gerais

Motores de ignição por centelha (ICE) são motores que admitem, para o interior do cilindro, uma mistura de ar e combustível e o início do processo de combustão se dá por uma centelha elétrica, através da vela de ignição. Geralmente, esses motores usam como combustível gasolina, álcool, gases derivados do petróleo, gasogênio, biogás, etc.

Motores com carburação são motores nos quais o combustível é combinado com o ar antes de fechar a válvula de admissão (Taylor, 1971).

Motores com carburadores são motores com carburação em que o combustível é combinado com o ar por meio do carburador. A maioria dos motores de ignição por centelha também são motores desse tipo (Taylor, 1971).

2.6 Motores 4 tempos

O ciclo se completa a cada quatro cursos do êmbolo, de onde vem a sua denominação. Dessa forma, um ciclo de trabalho estende-se por duas rotações da árvore de manivelas.

No primeiro tempo, com o êmbolo se deslocando do PMS para o PMI, em movimento descendente, dá-se a admissão, que se verifica, na maioria dos casos, por aspiração da mistura ar-combustível (nos motores Otto).

No segundo tempo, com o êmbolo se deslocando do PMI para o PMS, com o pistão em movimento ascendente, ocorre a compressão. Pouco antes do êmbolo completar o curso, inicia-se a ignição por meio da emissão de uma centelha elétrica (no motor Otto).

No terceiro tempo, com o êmbolo se deslocando do PMS para o PMI, com o pistão em movimento descendente, ocorre a expansão dos gases, com a transferência de energia ao êmbolo (tempo motor).

No quarto tempo, com o êmbolo se deslocando do PMI para o PMS, com o pistão em movimento ascendente, ocorre a expulsão dos gases de escape para a atmosfera.

Durante os quatro tempos, ou duas rotações da árvore de manivelas, transmitiu-se trabalho do êmbolo uma só vez. Para fazer com que as válvulas de admissão e escapamento funcionem corretamente, abrindo e fechando as passagens nos momentos exatos, a árvore de comando de válvulas (ou eixo de cames) gira a meia rotação do motor, completando uma volta a cada ciclo de quatro tempos (Silva, 1995).

2.7 Carburador

O termo carburação significa misturar hidrocarboneto ao ar e, depois da invenção do carburador, em 1887, os motores de combustão interna passaram a usar gasolina como combustível, em lugar do gás de carvão.

A carburação consiste na divisão do líquido combustível em finas gotículas (pulverização) e sua mistura em proporções convenientes com o ar atmosférico que é fonte de oxigênio para a queima da mistura gasosa dentro do cilindro (Andrade et al., 1975).

A composição teórica da mistura gasosa para se ter combustão completa é de aproximadamente, 1g de combustível para 15 g de ar. Porém, obtém-se uma

maior potência do motor com uma relação de aproximadamente 1:12 (Andrade et al., 1975).

Componente dos motores de combustão interna, o carburador é um dispositivo destinado à produção da mistura ar-combustível que, ao ser comprimida pelo êmbolo, entra em combustão ao contato da centelha da vela de ignição. Ele é constituído de duas partes: uma cuba de nível constante ou reservatório com bóia, onde o combustível se mantém em volume constante, e a câmara de carburação, que consiste em um tubo de venturi ou difusor, dentro do qual se encontra um tubo vaporizador ligado ao depósito com bóia; é onde ocorre a mistura ar-combustível.

Da cuba, o combustível passa com pressão uniforme para a câmara de carburação, através do giclê de alta rotação, um orifício rigorosamente calibrado. Simultaneamente, o ar é aspirado pela depressão criada ao movimentar-se o êmbolo.

É sempre necessário que a quantidade de combustível seja proporcional ao volume de ar admitido; o giclê dosa a quantidade de combustível, enquanto o pistão dosa o volume de ar.

Uma borboleta, ligada ao comando do acelerador, controla a quantidade da mistura combustível, a carga de enchimento do cilindro e, conseqüentemente, a potência do motor.

Os carburadores possuem, ainda, um sistema de marcha lenta, que permite ao motor funcionar em regime de baixa rotação, quando a borboleta está quase fechada.

2.8 Carburador a gás

Para a alimentação de motores do ciclo Otto com combustíveis gasosos é utilizado um carburador tipo venturi. Este tipo de carburador utiliza o mesmo efeito de um carburador standard. O difusor “venturi” causa uma mudança na velocidade de escoamento da corrente do ar e, conseqüentemente, com este aumento na velocidade do ar, provocará uma queda na pressão no venturi (Mitzlaff,1988). Com essa queda de pressão no venturi, o combustível gasoso é dosado através da válvula diafragma reguladora de fluxo e o combustível gasoso é misturado na corrente principal de ar, em uma proporção exigida para o motor funcionar de forma uniforme.

Características básicas para um sistema carburador:

- formar e dosar a mistura combustível;
- variar a mistura combustível de acordo com as necessidades do motor.

Segundo Pinto (s.d), os motores adaptados para metano, por não terem sido projetados para operarem com combustível gasoso, sofrem redução de potência da ordem de 10% em relação ao combustível original e, principalmente, perda de resposta de aceleração.

Obert (1971) cita que a razão de compressão no ciclo Otto é limitada pelas características do combustível, como o número de iso-octanas. Neste ciclo admite-se mistura combustível próxima da estequiométrica, garantindo maior velocidade de combustão e facilidade de ignição. Um avanço no sistema de ignição também é recomendado para compensar a menor velocidade de combustão do gás. O metano possui peso específico próximo ao do oxigênio e se combina com facilidade ao ar atmosférico, formando mistura homogênea que

alimenta igualmente os cilindros, além de proporcionar queima completa, o que ocasiona menor poluição.

2.9 Considerações sobre o avanço de centelha

Nos motores ciclo Otto, a mistura ar-combustível introduzida no cilindro é comprimida e tem sua inflamação iniciada por uma centelha elétrica produzida pelo sistema de ignição.

A mistura deve ser inflamada no curso de compressão, antes do pistão atingir o PMS, para garantir altas pressões de combustão, no início do curso de expansão. A centelha deve ser ajustada para se ter o máximo rendimento nas diferentes condições e regimes de operação do motor.

O momento ideal para a inflamação da mistura é aquele que proporciona o maior torque e varia em função da rotação do motor, densidade da mistura aspirada, razão ar-combustível, características do combustível, projeto do motor e condições de operação.

A centelha deve ser ajustada para se obter o máximo rendimento nas diferentes condições de operação do motor.

As variações de carga e velocidade angular que ocorrem no motor exigem alterações no ângulo de avanço da centelha. Nos regimes de carga parcial, a razão ar-combustível pobre e a menor massa de mistura aspirada pelo motor diminuem a velocidade de propagação de chama no interior da câmara de combustão. Em regime de máxima potência, o enriquecimento da mistura, aliada à maior quantidade de massa aspirada pelo motor, favorece a propagação da frente de chama (combustão mais rápida)

O instante ideal da ocorrência da centelha também varia em função da velocidade angular do motor, isto é, quanto maior for a rotação, mais adiantada deverá ser a centelha, uma vez que o intervalo de tempo entre a centelha e a combustão completa é praticamente constante (Barbosa, 1990).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

Os ensaios experimentais foram desenvolvidos na Estação de Produção e Uso de Biogás, do Setor de Máquinas e Mecanização, do Departamento de Engenharia, da Universidade Federal de Lavras. A referida Estação consta de um biodigestor modelo indiano para a produção, estrutura de purificação e armazenamento do biogás. No caso deste trabalho, foi utilizado biogás *in-natura*.

3.2 Biodigestor modelo indiano

O biodigestor utilizado nos experimentos foi um modelo indiano contínuo de dois compartimentos, com volume útil de 7 m³, construído em alvenaria com uma campânula de chapa de aço-carbono servindo com gasômetro, conforme ilustrado na Figura 1. Como substrato, foram utilizados dejetos bovinos frescos coletados na fazenda experimental da FAEPE, no município de Ijaci, MG. As cargas de substrato do biodigestor eram constituídas de 50% de esterco bovino fresco diluído em 50% de água em volume. A pressão de serviço do biogás foi de 190 mm.c.a., com composição média de 63% de CH₄ e 37% de CO₂, conforme análise cromatográfica, realizada no Laboratório de Biodigestão do Departamento de Engenharia da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal/UNESP.

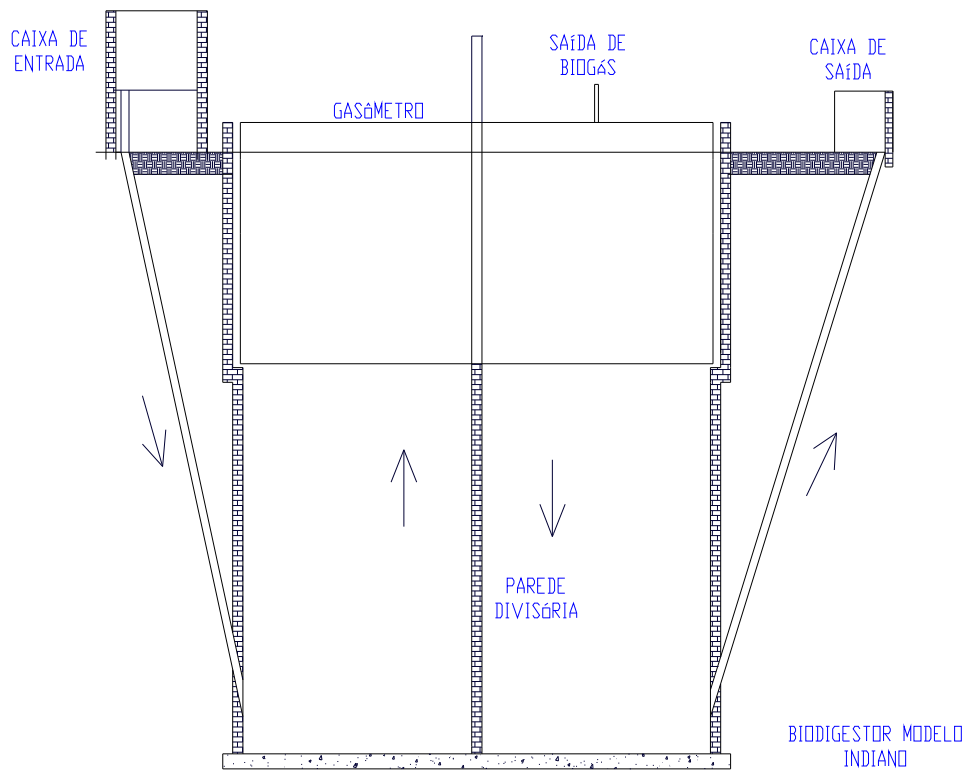


FIGURA 1 Biodigestor modelo indiano (fora de escala)

3.3 Motogerador

O conjunto motogerador utilizado nos ensaios foi da marca Briggs & Stratton, originalmente a gasolina, de 4 tempos, com potência nominal de 4077W (5,5 cv), a rotação de 4200 rpm, acoplado a um gerador de 2400W, com rotação operacional de 3600 rpm.

3.4 Método utilizado para medir o consumo de biogás

Para a medida do consumo de biogás pelo conjunto motogerador foi utilizado, a exemplo de Ortiz-Canavate et al. (1981), um medidor volumétrico para gás. Este medidor é de fabricação de Liceu Indústria e apresenta as seguintes especificações técnicas:

- Marca: LAO
- Modelo: MG-6
- Carga nominal: $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Vazão mínima: $0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Pressão máxima de trabalho: 1000mmca
- Aplicação: medida volumétrica de metano/biogás

O medidor descrito foi especialmente calibrado pelo fabricante, verificando-se que, para medidas volumétricas de gás, correspondentes às vazões de 0,04 a $8,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, sob pressão de 200 mmca, o erro máximo foi de +0,6% a -1,0% com perda de carga de 1 a 17 mmca.

O volume de gás consumido (V_g) é dado pela diferença de leitura registrada analogicamente pelo medidor, em metro cúbico, para um dado intervalo de operação do motor. Todas as tomadas de tempo relacionadas com o ensaio do motor foram feitas por meio de um cronômetro digital, com precisão de leitura de décimos de segundos. A vazão mássica de biogás ($m\dot{G}$) do motor se definiu pelo volume medido em determinado intervalo de tempo de operação, como segue:

$$m\dot{G} = (V_g/t) \cdot \rho_g$$

$$\text{sendo } V_g/t \text{ igual a } Q_g, \text{ portanto: } m\dot{G} = Q_g \cdot \rho_g$$

Atenção especial deve ser dada à massa específica do biogás que, basicamente, depende de sua composição e é significativamente influenciado pelas condições atmosféricas do ambiente, como pressão e temperatura.

Amestoy e Ferreira (1987) apresentam a seguinte relação para o cálculo da massa específica do gás metano em função da porcentagem volumétrica de seus componentes:

$$\rho_{g,n} = (0,72 \%CH_4 + 1,96 \%CO_2)/100$$

Quanto à influência das condições atmosféricas locais sobre a massa específica do biogás, Mitzlaff (1988) apresenta a seguinte relação:

$$\rho_g = [\rho_{g,n} \cdot (288/101,33) \cdot Pa / (t_g + 273)] / 1000$$

O poder calorífico inferior do biogás (Hg) pode ser definido pela expressão que segue:

$$H_g = p_{CH_4} \cdot 50.000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Assim, para o biogás com 63% de metano, têm-se:

- $\rho_{g,n}$ - massa específica normal ($1,1788 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- p_{CH_4} - proporção mássica do metano no biogás ($0,385 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
- H_g - poder calorífico inferior ($19.250 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
- ρ_g - massa específica em condições ambiente ($0,001022 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$)

Obs.: pressão ambiente de 90 KPa e temperatura do biogás de 22°C.

3.5 Método utilizado para medir consumo de gasolina

Como combustíveis para operar, o motor nos ensaios, utilizou-se gasolina fornecida pelos postos de abastecimento automotivo, com as seguintes especificações:

- H_d - poder calorífico inferior = $43.960 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
- ρ_δ - massa específica = $0,739 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$

A medida do consumo de gasolina do motor foi obtida pela diferença de nível em coluna graduada, para um determinado intervalo de tempo de operação do motor. A escala graduada da proveta é dividida em milímetros e a correspondência volumétrica é de $0,305 \text{ ml} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Assim, o volume de gasolina consumido foi determinado em mililitros pela seguinte relação:

$$V_d = n \cdot 0,305$$

O cálculo da vazão mássica (mg) de gasolina do motor se definiu pelo volume consumido em determinado intervalo de tempo de operação do mesmo, como segue:

$$m\dot{g} = (V_d/t) \cdot \rho\delta$$

$$\text{sendo } V_d/t \text{ igual a } Q_d, \text{ portanto, } m\dot{g} = Q_d \cdot \rho\delta$$

3.6 Dimensionamento do carburador tipo venturi

Para operar o motor do conjunto gerador com biogás foi dimensionado um carburador específico para biogás, seguindo a metodologia proposta por Mitzlaff (1988). O carburador foi dimensionado considerando as características técnicas do motor, como cilindrada, rotação de trabalho e eficiência volumétrica. A partir desses dados, o carburador foi dimensionado e construído como segue:

Para o diâmetro do venturi (d_v em m) foi utilizada a seguinte equação:

$$d_v = \sqrt{\frac{4 \cdot A_i \cdot C_i}{\pi \cdot 150}}$$

Para o cálculo da área da seção de saída do carburador (A_i) foi utilizada a seguinte expressão:

$$A_i = \frac{1}{4} \cdot d_i^2 \cdot \pi$$

Para o diâmetro de saída do carburador, adotou-se o valor de 0,022 m ou 22 mm, que é o mesmo diâmetro da entrada da tubagem de admissão do motor.

Para o cálculo da velocidade de escoamento do fluxo na saída do carburador C_i , usou-se a seguinte equação:

$$C_i = V_i/A_i$$

Para o cálculo do volume admitido pelo motor (V_i) foi usada a equação:

$$V_i = V_h/2000 \cdot n/60 \cdot \eta_{tot}$$

Foi utilizada, para os cálculos, uma rotação operacional de 3600 rpm, sendo a rotação de serviço do gerador, conforme especificação do fabricante e uma eficiência volumétrica de 80%.

A cilindrada do motor foi determinada colocando-se o êmbolo no PMS e enchendo o cilindro com óleo lubrificante através do orifício da vela de ignição. Em seguida, o êmbolo foi posicionado do PMI e o cilindro foi completado com óleo medindo-se o volume. Também através do orifício da vela foi medido o curso do êmbolo utilizando-se a agulha do paquímetro e foram encontrados os seguintes valores:

- 53,3mm de curso do êmbolo;
- 67,4mm de diâmetro do cilindro;
- 190cm³ cilindrada do motor.

Assim, para o carburador com um diâmetro (d_i) de 22mm e cilindrada de 190cm³, têm-se:

A_i – área da seção de saída do carburador (0,00038m²)

V_i – admissão volumétrica do motor (0,00456m³.s⁻¹)

C_i – velocidade do escoamento do fluxo na saída do carburador (12m.s⁻¹)

d_v – diâmetro do venturi (0,00622m)

O carburador foi construído no Laboratório de Protótipos do Departamento de Engenharia da UFLA, sendo adaptado no motor. A entrada de biogás foi construída em latão e todo conjunto vedado com cola especial para não haver vazamento e entrada falsa de ar. O carburador foi dividido em três partes para facilitar a construção e, em seguida, estas foram montadas de modo a formá-lo. Uma barra maciça de alumínio foi usinada dando início ao tubo principal do carburador; em outra barra, foi feito o venturi específico para o motor.

Dentro destas medidas, o carburador a biogás foi construído e adaptado no motor, conforme mostra o Figura 2.



FIGURA 2 Carburador dimensionado

Os ensaios preliminares do conjunto motogerador com o carburador a biogás demonstraram que o motor não operou satisfatoriamente, por insuficiência de alimentação da mistura ar-biogás. Este comportamento pode ter ocorrido, uma vez que a rotação adotada para o cálculo do volume admitido pelo motor (V_i) foi de 3600 rpm, enquanto a rotação máxima é de 4200 rpm. Utilizando-se a rotação de 4200 rpm, o diâmetro do venturi seria de 6,72mm. Mesmo abrindo o diâmetro do venturi para 6,72mm, o motor não operou satisfatoriamente, a partir do quê, o diâmetro do venturi foi aberto experimentalmente, chegando-se ao valor de 12 mm. As dimensões finais do carburador para o funcionamento estável do motor foram ajustadas experimentalmente como seguem:

- comprimento do corpo interno: 150mm;
- diâmetro do corpo interno: 22 mm;
- diâmetro do venturi: 12mm.

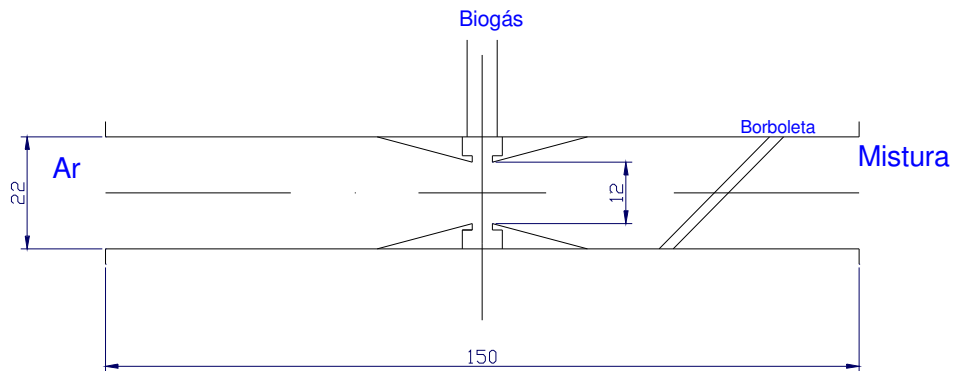


FIGURA 3 Carburador dimensionado

3.7 Método utilizado para determinar a eficiência do conjunto.

Para calcular a eficiência do conjunto motogerador, trabalhando com os carburadores original a gasolina, original adaptado para biogás e dimensionado, utilizou-se a seguinte equação:

$$\eta_{\text{conj.}} = [(P \cdot 1000^{-1}) \cdot 3600] / (\text{m}^3 \cdot H_c)$$

3.8 Método utilizado para determinar a energia calorífica

Para calcular a energia calorífica nas diversas condições de ensaio, utilizou-se a seguinte equação:

$$Ec = Hc.pc. Qc. t$$

3.9 Ensaio no conjunto motogerador

Os ensaios foram feitos, inicialmente, com o motor operando dentro de suas características originais utilizando gasolina. As dimensões de entrada, saída e do venturi desse carburador estão especificadas no desenho da Figura 4, assim como o diâmetro do bocal de entrada de biogás feito no venturi, que é de 5 mm.

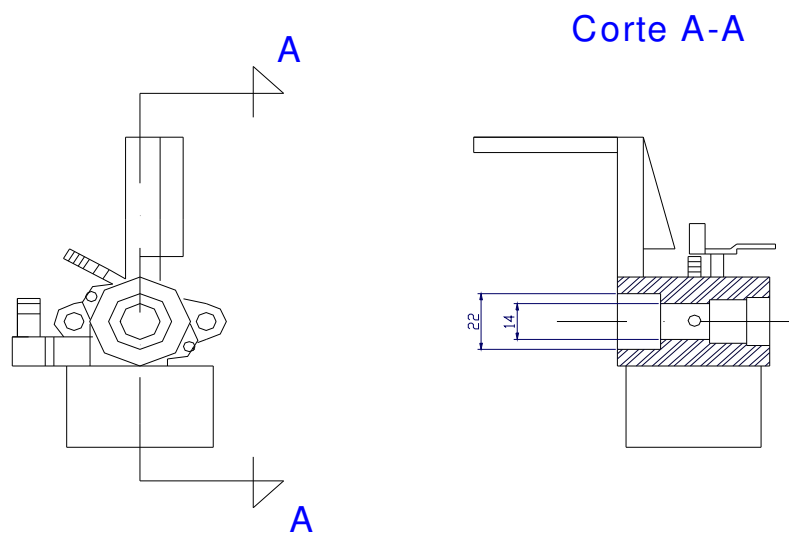


FIGURA 4 Carburador original

Para os ensaios nas condições originais do motor, foi medido consumo de combustível, rotação, potência gerada, tensão, corrente para diferentes cargas no gerador, sobre o quê foram traçados gráficos da potência gerada e eficiência do conjunto, em função do consumo de combustível para três diferentes

potências resistivas (1000, 1200 e 1500 watts). Em seguida, foi feita a substituição do carburador original pelo carburador tipo venturi dimensionado e os ensaios foram repetidos.

Associada ao carburador a biogás, foi utilizada uma válvula de fluxo de baixa pressão, que possibilita controlar a vazão de biogás na entrada do carburador, permitindo o fluxo somente no tempo de admissão do motor, quando a pressão cai no venturi. O motor foi alimentado com biogás *in natura* vindo diretamente do biodigestor, passando somente pelo filtro de H₂S.

Ensaio do conjunto motogerador foram feitos também utilizando o carburador original do motor adaptado para operar com biogás (Figura 4), sendo feito um orifício no venturi do mesmo, no qual adaptou-se um tubo com diâmetro interno de 5 mm para a alimentação de biogás.

Assim, o conjunto motogerador foi ensaiado com o carburador original a gasolina, com o carburador original adaptado para biogás e com o carburador tipo venturi especialmente dimensionado para biogás, como mostrado nas Figuras 3 e 4.

Os ensaios também foram feitos avançando-se a centelha em +4,82°, o que foi feito deslocando-se a bobina que gera a centelha da vela do motor em relação ao ponto fixo normal especificado pelo fabricante do motor. A centelha foi avançada, buscando-se obter melhor desempenho do motor, a exemplo do que cita Barbosa (1990).

Para as avaliações do conjunto gerador, utilizou-se um multímetro para a medida da tensão e corrente e para a medida de rotação, utilizou-se um tacômetro digital com sensor reflectivo, que foi instalado no volante do motor.

O conjunto motogerador adaptado com o carburador tipo venturi dimensionado é mostrado na Figura 5 e os carburadores originais do motor e tipo venturi dimensionado, na Figura 6.



FIGURA 5 Conjunto motogerador e carburador dimensionado

Os carburadores originais do motor e o carburador dimensionado podem ser vistos na Figura 6.



FIGURA 6 Carburador original e carburado dimensionado

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados obtidos

As tabelas e os gráficos a seguir permitem visualizar o desempenho do conjunto motogerador com cargas variáveis nas seguintes situações: motor operando com o carburador original a gasolina, motor operando com o carburador tipo venturi dimensionado para biogás e motor operando com o carburador original adaptado para biogás com centelha da vela no ponto fixo e avançado em +4,82°.

4.2 Desempenho operacional do conjunto motogerador à gasolina

Por meio dos resultados apresentados podem-se verificar os desempenhos do conjunto motogerador acionado nas diferentes condições de ensaio. O gráfico da Figura 7 mostra o desempenho do conjunto acionado à gasolina nas condições originais e pode-se observar um aumento da vazão mássica ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$), em função do aumento da potência no gerador em (W). Foi possível manter constante a rotação operacional do motor operando nessas condições, em torno de 3500rpm. Para a potência resistiva de 1000W, obteve-se uma vazão mássica ($\text{m}\dot{\text{g}}$) de 0,54 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a uma potência no gerador de 806,06W e uma potência ativa foi de 725,94 W, sendo o co-seno do ângulo de fase do gerador igual a 0,9 e a energia calorífica obtida, de 395,79kJ. Para a potência resistiva de 1200W, obteve-se uma vazão mássica ($\text{m}\dot{\text{g}}$) de 0,55 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, a uma potência no gerador de 822,9W e uma potência ativa de 740,66W, para uma energia calorífica de 405,54kJ. Para a potência resistiva de 1500W, observou-se uma vazão mássica ($\text{m}\dot{\text{g}}$) de 0,61 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a uma potência no gerador de 891W e uma potência ativa de 801,90W, com uma energia calorífica de 444,52kJ. A

eficiência do conjunto motogerador operando originalmente a gasolina foi em média, de 12,14%.

Estes resultados foram tomados como padrão de comparação para o motor operando com biogás.

TABELA 3. Ensaio do conjunto motogerador acionado a gasolina.

Pr (W)	R. (Ω)	U (V)	I (A)	PA (W)	P (W)	N (rpm)	Q _{gas.} (l/h)	Ec (kJ)	η_{conj} (%)	m _g (kg/h)
1000	14,73	109	7,40	725,94	806,6	3500	0,731	395,79	12,23	0,54
1200	14,44	109	7,55	740,66	822,9	3500	0,749	405,54	12,18	0,55
1500	13,58	110	8,10	801,90	891,0	3500	0,821	444,52	12,03	0,61
Média	14,25	109	7,68	756,17	840,2	3500	0,77	415,28	12,14	0,57

Pr: Potência Resistiva; R: Resistência; U: Tensão; I: Corrente; PA: Potência ativa; P: Potência; Q_{gas.}: Vazão volumétrica; Ec: Energia calorífica; η_{conj} : Eficiência do conjunto, m_g: Vazão mássica

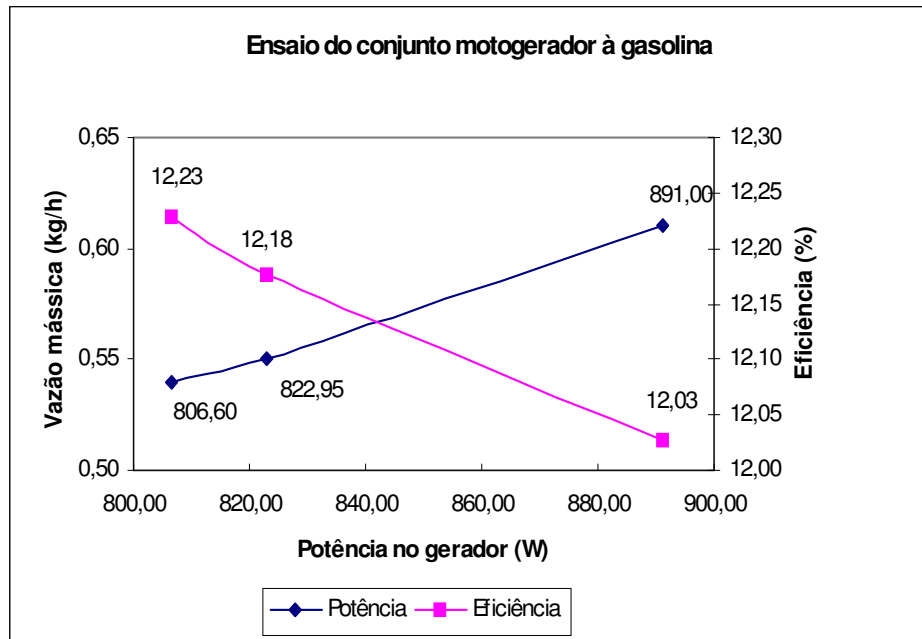


FIGURA 7 - Consumo de gasolina do motor e potência gerada

4.3 Desempenho operacional do conjunto motogerador a biogás com carburador tipo venturi dimensionado

O Gráfico da Figura 8 nos mostra o desempenho do conjunto acionado a biogás, utilizando o carburador tipo venturi dimensionado, pelo qual pode-se observar também um aumento da vazão mássica em função do aumento da potência gerada e uma diminuição da eficiência do conjunto. Com o biogás não foi possível manter a rotação constante para as três potências resistivas utilizadas e observou-se uma variação na rotação entre 3415 a 3430rpm, como mostrado na Tabela 4. Para a potência resistiva de 1000W, obteve-se vazão mássica ($m\dot{G}$) de $2,33\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ para uma potência no gerador de 846,4W e uma potência ativa de 761,94W, com uma energia calorífica de 747,59kJ. Para a potência resistiva de 1200W, obteve-se uma vazão mássica ($m\dot{G}$) de $2,4\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a uma potência no gerador de 859W e uma potência ativa de 773,12W, com uma energia calorífica de 770,55kJ. Para a potência resistiva de 1500W, obteve-se uma vazão mássica ($m\dot{G}$) de $2,45\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a uma potência no gerador de 873,6W e uma potência ativa de 786,24W, com uma energia calorífica de 786,94kJ.

Nesta condição, observou-se também uma redução da potência máxima obtida no gerador de 1,99% em relação ao motor operando originalmente com gasolina, o que pode ser explicado pelo menor poder calorífico do biogás e, sobretudo, pelo fato do biogás ser admitido na forma gasosa junto a mistura combustível, ocupando espaço do ar o que, indiretamente, diminui a eficiência volumétrica.

Este comportamento de queda de potência está de acordo com o encontrado por Pinto (s.d), que cita redução de potência da ordem de 10% em relação ao combustível original e, principalmente, perda de resposta de aceleração, pelo fato do motor não ter sido projetado para operar com combustível gasoso.

Contudo, pode-se considerar que o desempenho do motor operando a biogás com o carburador dimensionado foi satisfatório, tendo o motor operado estável em todas as potências resistivas.

TABELA 4. Ensaio do conjunto motogerador acionado a biogás (carburador tipo venturi dimensionado)

Pr (w)	R. (Ω)	U (V)	I (A)	PA (W)	P (W)	N (rpm)	Qg. (l/h)	Ec (kJ)	η_{conj} (%)	m \dot{G} (kg/h)
1000	12,29	102	8,30	761,94	846,6	3420	2280	747,59	6,79	2,33
1200	12,35	103	8,34	773,12	859,0	3415	2350	770,55	6,69	2,4
1500	12,38	104	8,40	786,24	873,6	3430	2400	786,94	6,66	2,45
Média	12,34	103	8,35	773,77	859,7	3422	2343	768,36	6,71	2,39

Pr: Potência Resistiva; R: Resistência; U: Tensão; I: Corrente; PA: Potência ativa; P: Potência; Q_g: Vazão volumétrica; Ec: Energia calorífica; η_{conj} : Eficiência do conjunto, m \dot{G} : Vazão mássica

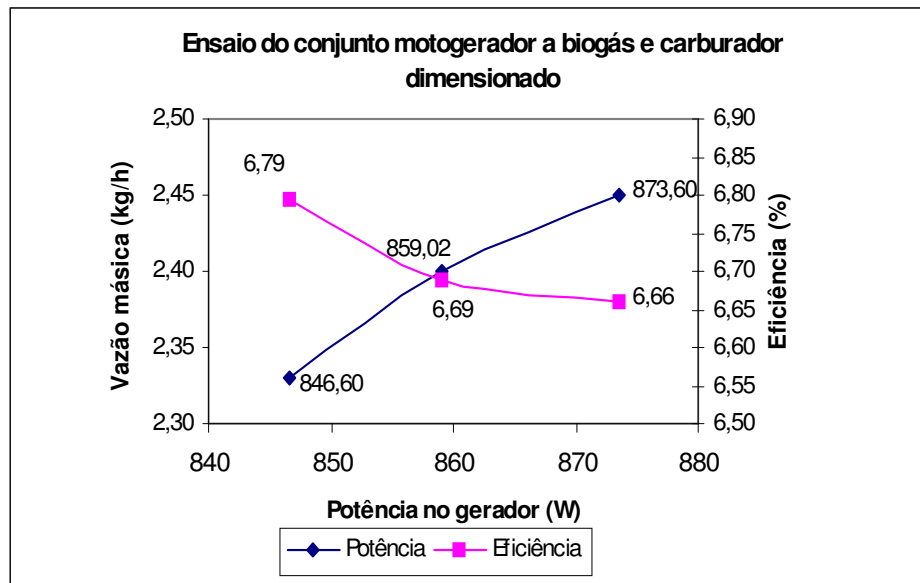


FIGURA 8 - Consumo de biogás do motor e potência gerada (carburador dimensionado)

4.4 Desempenho operacional do conjunto motogerador a biogás com carburador adaptado

O gráfico da Figura 9 nos mostra o desempenho do conjunto acionado a biogás utilizando o carburador original adaptado. Nesta condição, o motor apresentou queda relativa da vazão mássica com o aumento gradativo da potência gerada. Este comportamento não é o normalmente esperado e pode ser explicado pela queda da rotação do motor que variou de 3415rpm para 3304rpm. Com o aumento da potência resistiva, o carburador adaptado demonstrou que, para operar com biogás, não proporcionou suficiente alimentação do motor, ocorrendo, inclusive, queda da potência máxima de 2,91% em relação ao motor operando originalmente com gasolina.

Com a potência resistiva de 1000W, obteve-se uma vazão mássica ($m\dot{G}$) de $2,33\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, a uma potência no gerador de 750,5W e uma potência ativa de 675,43W, com uma energia calorífica de 747,59 kJ. Para a potência resistiva de 1200W, observa-se uma vazão mássica ($m\dot{G}$) de $2,27\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, para uma potência no gerador de 769,9W e uma potência ativa de 692,90W com uma energia calorífica de 727,92kJ. Para a potência resistiva de 1500W, observou-se uma vazão mássica ($m\dot{G}$) de $2,21\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, a uma potência no gerador de 865,8W e uma potência ativa de 779,24W, com uma energia calorífica de 708,25kJ. Essa queda no consumo de biogás se deve à variação na rotação do motor. Aumentando a potência resistiva de 1000 para 1200 e, em seguida, para 1500W, a rotação do motor caiu e, conseqüentemente, o consumo de biogás e a energia calorífica também. Não foi possível manter uma rotação constante.

Mesmo considerando que o conjunto motogerador alimentado a biogás através do carburador original adaptado apresentou um desempenho inferior ao carburador tipo venturi dimensionado, observa-se que a eficiência média do conjunto foi praticamente a mesma, 6,56% e 6,71%, respectivamente.

Outro fator que deve ser considerado para o carburador original adaptado é a possibilidade de operar o motor tanto com biogás como com gasolina e esta versatilidade foi útil, sobretudo na partida a frio do motor. Para o carburador tipo venturi dimensionado, a partida do motor com biogás foi difícil, necessitando de injeção suplementar de gasolina. No caso do carburador original adaptado, a partida do motor foi feita com gasolina, mantendo-se a alimentação de biogás fechada. Após o motor estabilizar a rotação, gradativamente o fluxo de gasolina foi cortado e o de biogás aberto, o que tornou a partida mais fácil e a estabilização da rotação do motor mais rápida.

Considerando este fator da partida a frio mais facilitada e, ainda, a fácil adaptação do carburador original, optou-se por esta proposta de alimentação do motor a biogás, buscando melhor o seu desempenho.

A exemplo da citação de Barbosa (1990), buscou-se operar o motor com biogás utilizando o carburador original adaptado, alterando-se o ponto de ignição, avançando a centelha, cujos resultados são demonstrados pela Tabela 6 e gráfico da Figura 10 .

TABELA 5. Ensaio do conjunto motogerador acionado a biogás (carburador original adaptado)

Pr (W)	R. (Ω)	U (V)	I (A)	PA (W)	P (W)	N (rpm)	Qg. (l/h)	Ec (kJ)	η_{conj} (%)	m \dot{G} (kg/h)
1000	15,06	106,30	7,06	675,43	750,5	3415	2280	747,59	6,02	2,33
1200	12,53	98,20	7,84	692,90	769,9	3372	2200	727,92	6,35	2,27
1500	9,95	92,80	9,33	779,24	865,8	3304	2160	708,25	7,33	2,21
Média	12,51	99,10	8,08	715,86	795,4	3364	2220	727,92	6,56	2,27

Pr: Potência Resistiva; R: Resistência; U: Tensão; I: Corrente; PA: Potência ativa; P: Potência; Qg: Vazão volumétrica; Ec: Energia calorífica; η_{conj} : Eficiência do conjunto, m \dot{G} : Vazão mássica

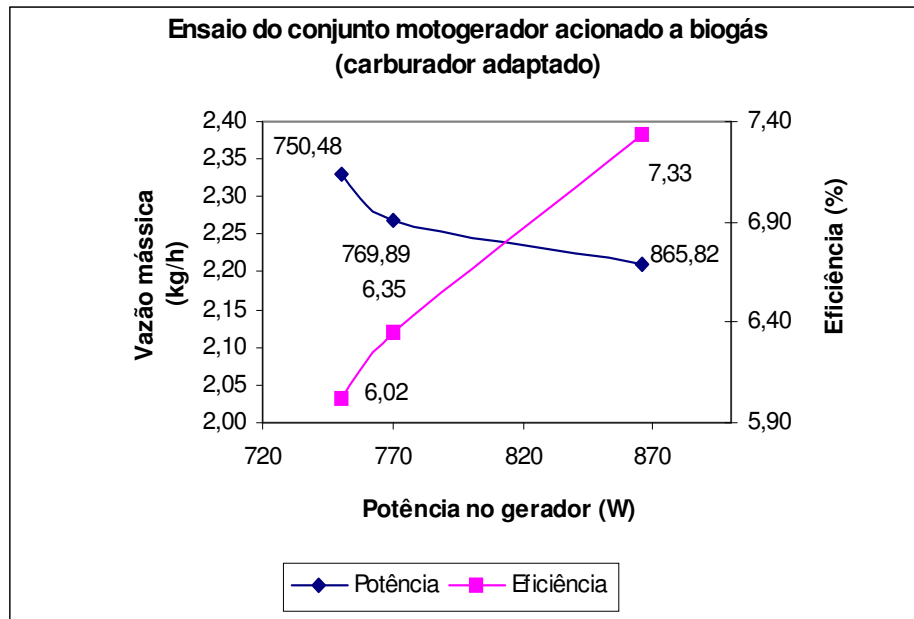


FIGURA 9 - Consumo de biogás do motor e potência gerada (carburador original adaptado para biogás)

4.5 Desempenho operacional do conjunto motogerador a biogás com carburador adaptado e centelha avançada

O gráfico da Figura 10 mostra o desempenho do conjunto acionado a biogás com o carburador original adaptado para biogás e centelha avançada em +4,82°, em relação ao ponto original. Neste ensaio, o motor teve aumento da vazão mássica com aumento considerável da potência gerada em relação a todos os ensaios anteriores. Não foi possível manter rotações constantes para as potências resistivas ensaiadas, tendo variado entre 3340 e 3460rpm, como mostrado na Tabela 6. Observou-se uma vazão mássica ($m\dot{G}$) de 2,02 $kg.h^{-1}$ no primeiro ensaio, com potência no gerador de 847,08W e uma potência ativa de 762,37W, para uma energia calorífica de 649,23kJ. Para a potência resistiva de

1200W, obteve-se uma vazão mássica (\dot{m}_G) de $2,15 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ para uma potência no gerador de 965,71W e uma potência ativa de 869,14W com uma energia calorífica de 688,70kJ e, para a potência resistiva de 1500W, observou-se uma vazão mássica (\dot{m}_G) de $2,21 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, para uma potência no gerador de 990,97W e uma potência ativa de 891,88W, com uma energia calorífica de 708,25kJ. Nesta condição a potência máxima gerada obtida foi 11,22% maior que a potência máxima obtida com o motor operando a gasolina.

A eficiência média do conjunto motogerador operando com a centelha avançada foi de 8,22%, com aumento considerável em relação ao motor operando com biogás nas outras condições (6,56% e 6,71%), porém, ainda menor que a eficiência média do conjunto operando a gasolina. Isto deve-se ao fato do poder calorífico da gasolina ser maior do que o poder calorífico do biogás e também pelo fato do motor ter sido projetado para operar com gasolina.

Com os melhores resultados obtidos com o motor operando a biogás, utilizando o carburador original adaptado e com centelha avançada, a exemplo de Barbosa (1990) e, ainda, considerando-se as questões da facilidade de partida do motor a frio e a facilidade e o baixo custo de adaptação do carburador, esta se mostrou a melhor e mais viável opção para alimentar o conjunto motogerador com biogás, possibilitando, assim, o uso de combustível renovável e alternativo a gasolina.

TABELA 6. Ensaio do conjunto motogerador acionado a biogás (carburador original adaptado com centelha avançada)

Pr (W)	R. (Ω)	U (V)	I (A)	PA (W)	P (W)	N (rpm)	Qg. (l/h)	Ec (kJ)	η_{conj} (%)	m \dot{G} (kg/h)
1000	13,92	108,60	7,80	762,37	847,08	3460	1980	649,23	7,83	2,02
1200	10,50	100,70	9,59	869,14	965,71	3400	2100	688,70	8,41	2,15
1500	8,80	93,40	10,61	891,88	990,97	3340	2160	708,25	8,40	2,21
Média	11,07	100,90	9,33	841,13	934,59	3400	2080	682,06	8,22	2,13

Pr: Potência Resistiva; R: Resistência; U: Tensão; I: Corrente; PA: Potência ativa; P: Potência; Q_g: Vazão volumétrica; Ec: Energia calorífica; η_{conj} : Eficiência do conjunto, m \dot{G} : Vazão mássica

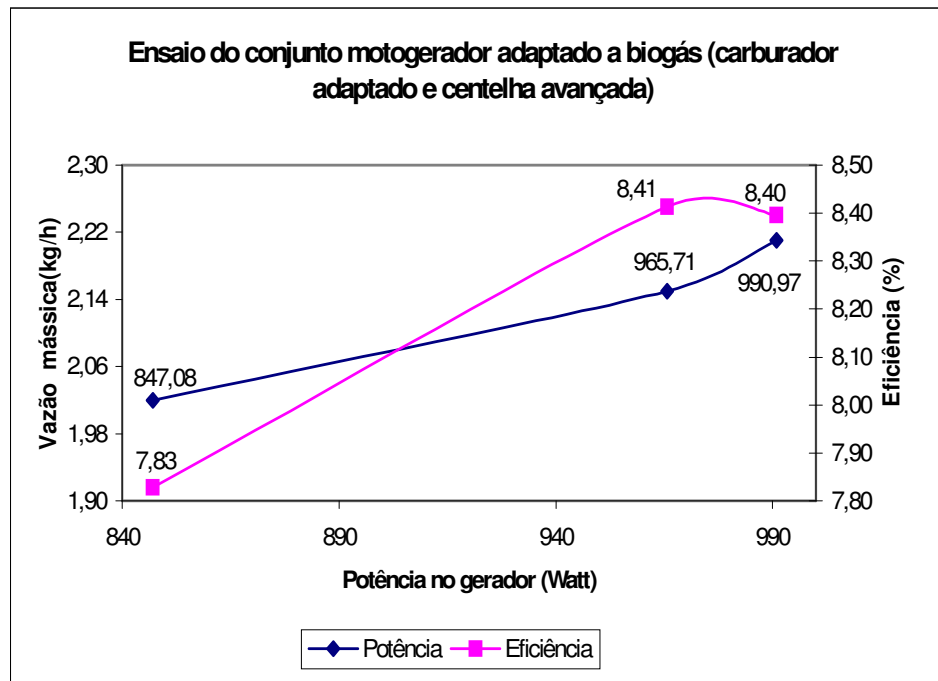


FIGURA 10 - Consumo de biogás do motor e potência gerada (carburador original adaptado para biogás e com avanço da centelha)

A gráfico da Figura 11 apresenta as potências geradas em função das eficiências nas diversas condições de ensaios realizados no conjunto motogerador sendo, assim, possível compará-las.

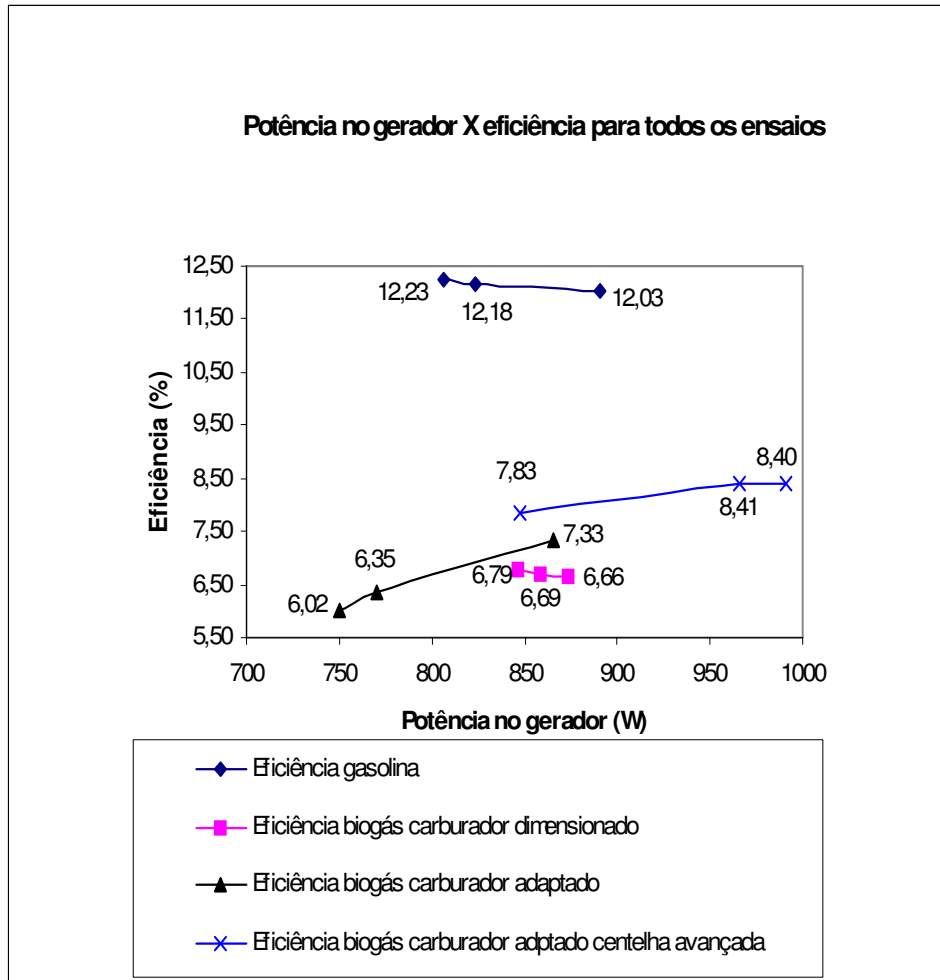


FIGURA 11 - Potência gerada X eficiência para todos os ensaios do conjunto.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios do conjunto motogerador operando com combustível original (gasolina) e operando com o combustível alternativo (biogás), pôde-se concluir o seguinte:

- para o conjunto alimentado com gasolina, obteve-se potência média gerada de 840,2W e eficiência média do conjunto de 12,14%;
- para o conjunto alimentado com biogás, utilizando o carburador tipo venturi dimensionado, a potência média gerada observada foi de 859,7W e eficiência média do conjunto de 6,71%;
- para o conjunto alimentado com biogás, utilizando o carburador original adaptado, a potência média gerada observada foi de 795,4W e eficiência média do conjunto de 6,56%;
- para o conjunto alimentado com biogás, utilizando o carburador original adaptado operando com centelha avançada, a potência média gerada observada foi de 934,59W e eficiência média do conjunto de 8,22%.

Com o avanço da centelha do motor de $+4,82^\circ$ em relação ao ponto original, obteve-se um aumento da potência gerada média de 17,5% e a eficiência média do conjunto aumentou de 6,56% para 8,22%.

Foi possível operar o conjunto motogerador com biogás estavelmente, utilizando-se o próprio carburador adaptado e avançando-se o ponto de ignição, obtendo-se, assim, em média, uma potência gerada de 934,59W, tensão de 100,9 volts e consumo médio de biogás de 2080 l.h^{-1} , o que equivale ao consumo energético de 682,06kJ

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21. **Plano de ação da declaração do Rio.** Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, RIO 92. Rio de Janeiro, 1992.

AMESTOY, E.A.; FERREYRA, R.D. **Utilização del biogas.** In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE BIODIGESTION ANAEROBIA, 1987, Montevideo. Anais... Montevideo: Comisión de agroenergia, FAO, 1987. 63p.

ANDRADE, G.I. et al. **Tratores e motores.** Lavras: ESAL, 1975. Apostila.

ARCURI, P.B. **Efeito da temperatura ambiental na produção e na qualidade do biogás em biodigestor modelo indiano na zona da mata de Minas Gerais.** 1986. 92p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BARBOSA, C.R.F. **Otimização da curva de avanço de centelha de um motor otto bicomustível alimentado com gás natural comprimido.** 1990. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

BARRA, M.E. Utilização do gás metano em veículos pesados. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA 2., 1985, Brasília. **Anais...** Brasília: MIC, 1985. p.265-290.

BENINCASA, M.; ORTOLANI, A.F.; LUCAS JR., J. **Biodigestores convencionais.** 2.ed. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 25p.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras. Diretoria Técnica. **O Biogás e sua tecnologia.** Rio de Janeiro, 1981. (Series Estudos e Pesquisas, 2).

OBERT, E.F. **Motores de combustão interna.** Porto Alegre: Globo, 1971. 618p.

ORTIZ-CAÑAVATE, J.; HILLS, D.J.; CHANCELLOR, W.J. **Diesel engine modification to operate on biogas.** *Trans. ASAE*, p.808-13, 1981.

PINTO, C.C. **O metano e a experiência da SABESP.** São Paulo, (s.d.). SABESP

SEIXAS, J.; FOLLE, S.; MACHETTI, D. "**Construção e funcionamento de biodigestores**". Brasília: EMBRAPA - DID, 1980. 60p. (EMBRAPA – CPAC. Circular Técnica, 4).

SILVA, F.M. **Sistema de alimentação de motores a duplo combustível-metano e diesel**. 1995. 121p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Universidade de São Paulo. Faculdade de Engenharia de São Carlos, SP.

TAYLOR, C.F. **Análise dos motores de combustão interna**. São Paulo: E. Blucher, 1971. v1, 558p.

TEIXEIRA, V.H. **Fontes alternativas de energia, Biogás. Lato - Sensu**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. p.144. (Cadernos Acadêmicos).

PROJETO BIOGÁS. Disponível em:

< www.net11.com.br/eccc/biogas/biogas.html > Acesso em 15 jan. 2005.

MITZLAFF, K. VAN, **Engines for biogás**. Viesbaden, Veiweg, 1988. 133p.