

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE
MOTOR ICE COM GÁS DE BAIXO
PODER CALORÍFICO PROVENIENTE
DA GASEIFICAÇÃO DE CASCA DE
ARROZ**

**Autor: Wilson Muraro
Orientador: Caio Glauco Sánchez**

35/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE
FLUIDOS**

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE
MOTOR ICE COM GÁS DE BAIXO
PODER CALORÍFICO PROVENIENTE
DA GASEIFICAÇÃO DE CASCA DE
ARROZ**

Autor: Wilson Muraro

Orientador: Caio Glauco Sánchez

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmica e Fluido

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós - Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2006.
S.P. – Brasil.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE
FLUIDOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE
MOTOR ICE COM GÁS DE BAIXO
PODER CALORÍFICO PROVENIENTE
DA GASEIFICAÇÃO DE CASCA DE
ARROZ**

Autor: **Wilson Muraro**

Orientador: **Caio Glauco Sánchez**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação

Prof. Dr. Caio Glauco Sanchez.
DETF / FEM / UNICAMP

Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo.
DETF / FEM / UNICAMP

Prof. Dr. Antonio Moreira dos Santos
USP / EESC / Engenharia Mecânica

Campinas, 24 de Fevereiro 2006

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	M931a
V	EX
TOMBO BC/	69811
PROC	16-123-00
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	30-8-06

BIB ID: 385806

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M931a Muraro, Wilson
Avaliação do funcionamento de motor ICE com gás de baixo poder calorífico proveniente da gaseificação de casca de arroz / Wilson Muraro. --Campinas. SP: [s.n.]. 2006.

Orientador: Caio Glauco Sánchez
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Biomassa. 2. Gaseificação. 3. Gás. 4. Biogás. 5. Gás de gasogenio. 6. Cinza de casca de arroz. 7. Motores de combustão interna. I. Sánchez, Caio Glauco. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Evaluation of an SI engine running with gas of flow power heat trate from gasification of rice husk

Palavras-chave em Inglês: Biomass. Gasification. Natural gas. Lower power heat rate. Engine cycle OTTO. Rice husk

Área de concentração: Engenharia Térmica e de Fluidos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Waldir Antonio Bizzo e Antonio Moreira dos Santos

Data da defesa: 24/02/2006

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus amigos, Maurício Monte e Celso Argachoy, que me incentivaram a voltar a estudar após 20 anos ausente da universidade e a minha família que me deu todo apoio para vencer mais esta etapa.

Agradecimentos

Gostaria de iniciar agradecendo todo o apoio oferecido pelo professor Dr. Caio Glauco Sánchez, pelo colega Marcelo Côrtes Fernandes e da equipe de alunos e técnicos do DETF que foi de grande importância para realização deste trabalho com a parceria com a empresa DaimlerChrysler no setor de desenvolvimento de motores Leves.

De modo todo especial gostaria de agradecer ao Sr. Nilton Mitsuro Shiraiwa, que valoriza a realização de trabalhos de pesquisa e desenvolvimento, permitindo e dando apoio ao projeto.

Da empresa DaimlerChrysler, gostaria de agradecer o empenho e dedicação do Sr. Marcos Antonio Piccinin, João Carlos Michelini e Ronaldo Rocha Ribeiro, pelo apoio prestado para realizar os testes experimentais.

Mensagem.

Preocupações, Problemas diversos, angústias, contratempos, dores, fazem parte da vida. Saibamos voltar nossos olhos para Nossa Senhora de Fátima, nestes momentos difíceis de sofrimento e provação. Ela esta sempre conosco para nos proteger e amparar. Nunca se esqueça da mensagem da Virgem Nossa Senhora de Fátima aos pastorinhos: **"Não temais. Tendes confiança. Eu vos assistirei sempre"**.

(João S. Clá Dias, 2005)

Nomenclatura:

α_i : coeficiente de transferência de calor;

[C]: teor de carbono na biomassa, % massa;

[H]: teor de hidrogênio na biomassa, % massa;

[O]: teor de oxigênio na biomassa, % massa;

[S]: teor de enxofre na biomassa, % massa;

C_{carb} : concentração de carbono nas cinzas, nos gases, %;

C_{CH_4} : concentração de CH_4 nos gases, %;

c_{cin} : calor específico das cinzas, nos gases, $\text{MJ}/\text{Nm}^3\text{ }^\circ\text{C}$;

C_{CO} : concentração de CO nos gases, %;

C_{H_2} : concentração de H_2 nos gases, %;

$C_{p_{a1}}$: calor específico do ar na temperatura t_{a1} , $\text{MJ}/\text{Nm}^3\text{ }^\circ\text{C}$;

$C_{p_{a2}}$: calor específico do ar na temperatura t_{a2} , $\text{MJ}/\text{Nm}^3\text{ }^\circ\text{C}$;

DCBR: DaimlerChrysler do Brasil;

DETF – Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos

FA: $(\text{Var}/m_c)/\text{VA}$, fator de ar;

F_i : área na secção do reator, numa secção i ;

GN – Gás Natural;

GNC: Gás Natural Comprimido;

GNV: Gás Natural Veicular;

GP – Gás Pobre;

h_{a1} : entalpia do ar na entrada do compressor, MJ/kgcomb;
 h_{ar} : entalpia do ar na saída do compressor, MJ/kgcomb;
 h_{CO} : entalpia do gás CO a t_s , MJ/kgcomb;
 h_{CO_2} : entalpia do gás CO₂ a t_s , MJ/kgcomb;
 $h_{gás}$: entalpia do gás a t_s , MJ/kgcomb;
ICE – Motores de Ignição por Centelha;
 m_c : vazão de combustível, kg/s;
 m_{cin} : vazão de cinzas, kg/s;
 M_d : Torque do Motor, ft.lbs;
n.d. : dado não disponível;
 N_e : Potência do Motor, kW;
 P_1 : Restrição de Admissão, mmH₂O
 PCI : poder calorífico inferior do combustível, MJ/kgcomb;
 PCI_{carb} : poder calorífico inferior do carbono fixo = 32,804 MJ/kg;
 $PCI_{gás}$: poder calorífico inferior do gás combustível, MJ/ Nm³;
 P_{max} : Pressão máxima de Combustão, PA e Bar.
 P_{mist} : Depressão no Misturador, Pol/Hg;
 Pot_{motor} : potência de eixo do motor, kW;
 Q_{amb} : perda de calor para o meio-ambiente, MJ/kgcomb;
 Q_{ar} : energia do ar do compressor, MJ/kgcomb;
 Q_{cin} : perda de energia com o arraste das cinzas, MJ/kgcomb;

Q_d : energia disponível, MJ/kgcomb;

Q_g : perda de energia pela entalpia do gás, MJ/kgcomb;

Q_{util} : energia útil, MJ/kgcomb;

RPM: (min^{-1}) rotações do motor por minuto;

T_1 : Temperatura de Admissão, °C;

T_3 : Temperatura de Escapamento, °C;

t_{a1} : temperatura do ar na entrada do compressor, °C;

t_{a2} : temperatura do ar na saída do compressor, °C;

t_{cin} : temperatura das cinzas, no ciclone, °C;

T_d : Temperatura no Difusor, °C;

t_e : temperatura de entrada do combustível no reator, °C;

t_s : temperatura do gás antes do ciclone, °C;

t_{si} : temperatura externa do reator, numa secção i , °C;

VA: volume de ar estequiométrico, Nm^3/s ;

Var: vazão de ar, Nm^3/s ;

$V_{gás}$: vazão do gás na saída do reator, Nm^3/s ;

τ : torque no eixo do motor, N.m;

ω : velocidade angular do eixo do motor, rad/s;

Y : Relação ar / combustível;

Resumo:

Muraro, Wilson; AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE MOTOR ICE COM GÁS DE BAIXO PODER CALORÍFICO PROVENIENTE DA GASEIFICAÇÃO DE CASCA DE ARROZ.

. Campinas: FEM, UNICAMP, 2005. Dissertação (Mestrado).

Hoje no mundo há uma grande rejeição de materiais, resíduos e outros compostos orgânicos que podem ser aproveitados como fontes de energia. Exemplos podem ser observados em todo o mundo e principalmente em regiões onde a pobreza impera e que a energia elétrica pode ser de grande ajuda ou mesmo como um salva vidas.

O emprego de pequenas centrais de geração de potência integradas a um gaseificador com um motor de combustão interna (Integrated Gasefication Combustion Engine - IGCE) do ciclo OTTO e adaptado para operar com gás de baixo poder calorífico, constitui uma alternativa interessante e economicamente viável, que possibilita a produção independente de energia elétrica e térmica (Marcelo, 2004).

Para o aproveitamento de resíduos de BIOMASSA, como a casca de arroz, utilizou-se um processo de gaseificação, que é uma técnica que possibilita o uso energético da biomassa através da obtenção de um gás de baixo poder calorífico (4 a 6 MJ/Nm³). Utilizou-se um gaseificador de leito fluidizado do Laboratório de combustão da FEM, onde foi instalado um motor de 5965 litros de cilindrada total e 6 cilindros, com taxa de compressão 12:1, do ciclo OTTO, que originalmente é utilizado em veículos movidos a gás natural comprimido.

Obteve-se os seguintes valores nos ensaios:

- Potência (kW) = 40.7 @ 1800 rpm,
- Avanço (Graus do virabrequim) = 30
- Temperatura de Escapamento (°C) = 596
- Lambda = 1,12
- Pressão Máxima de Combustão (PA) = 4000000

Com o funcionamento do motor, verificou-se a necessidade de algumas alterações em seus componentes, como também mudanças nas regulagens de avanço. É necessário um sistema para aumentar a pressão do gás proveniente do gaseificador e um sistema de partida inicial.

Dessa maneira teríamos um motor para operar como grupo gerador e fazer parte de uma planta piloto para geração de energia elétrica por gaseificação de biomassa.

Palavra - Chave:

Biomassa, gaseificação, gás, baixo poder calorífico, casca de arroz, motor ciclo OTTO.

Abstract:

Muraro, Wilson; **EVALUATION OF AN SI ENGINE RUNNING WITH GAS OF LOW POWER HEAT RATE FROM GASIFICATION OF RICE HUSK.**

Campinas: FEM, UNICAMP, 2005. MASTER DEGREE MONOGRAPHY.

Nowadays there is a great waste of organic matters, residues and other substances that could be used in a power plant. Examples can mainly be observed in the whole world and in regions where the poverty reigns and where the electric energy could be of great aid.

The use of small power generation plants integrated to a gasification with an internal combustion engine (Integrated Gasification Combustion Engine- IGCE) of cycle OTTO and adapted to operate with low power heat rate gas, consists an interesting and economical viable alternative, that makes possible the independent production of electric and thermal energy.

For the exploitation of residues of BIOMASS, as the rice husk, we used a gasification process that is a form to increase the energy use of the biomass. The gasification can generate thermal energy and electric energy. It was used gasifier of fluidized bed from UNICAMP, where it was installed an engine with of 5,965 liters and 6 cylinders, with compression rate 12:1 (cycle OTTO), which was originally used in vehicles powered by compressed natural gas, to running with the gas of low power heat rate (4 - 6 MJ/Nm³) produced by gasifier.

Typical experimental result.

- Power (kW) = 40,7 @ 1800 rpm.
- Advance (Degrees) = 30
- Exhaust gas temperature (°C) = 596

- $\Lambda = 1,12$
- Maximum Combustion Pressure (PA) = 4000000

During the running of the engine, the necessity of some alterations in some components was verified as well changes in the advance regulations. A system to increase the pressure of the gas proceeding from the gasifier and a system of start are necessary. In this way we would have an engine to operate as generating group and to be part of a pilot plant for generation of electric energy for gasification of biomass in agricultural and interior cities.

Key Words:

Biomass, Gasification, Natural Gas, Lower power heat rate, Engine cycle OTTO, Rice Husk.

Índice:	pg
1- Introdução	01
2- Objetivo	05
3- Revisão Bibliografica	06
3.1- Contexto da Energia no Mundo	06
3.2.1- Energia Nuclear	07
3.2.2- Petróleo	08
3.3- Contexto da Energia no Brasil	08
3.3.1- Energia Elétrica	09
3.3.2- Energia Nuclear no Brasil	10
3.3.3- Petróleo no Brasil	11
3.3.4- Gás Natural no Brasil	12
3.3.5- Álcool no Brasil	13
3.4 - Contexto da Biomassa	14
3.4.1- Benefícios da Biomassa	15
3.4.2- Uso da Biomassa em Confinamento	15
3.5-Gaseificação de Biomassa	17
3.5.1- Processo da Gaseificação	17
3.5.2- Tipos de Gaseificadores	18
3.5.2.1- Gaseificadores de Leito Fluidizados	19
3.5.2.2- Plantas de Gaseificação	21
3.5.2.3- Limpeza dos Gases	22

3.5.2.4- Impacto Ambiental	23
3.6-Motor Movido a Gás	26
3.7- Velocidade de Chama	29
3.8- Óleo Lubrificante	30
3.9- Análise dos Componentes a GNV	30
3.9.1- Depósitos	30
3.10- Combustão e Emissões	32
3.11- Definições Construtivas	33
4-Materiais e Métodos	37
4.1- Sistema de Alimentação	37
4.2- Sistema de Ignição	37
4.2.1- Velas de Ignição	39
4.3- Ângulo da Sede de Válvulas	46
4.4- Influência da Taxa de Compressão	48
4.5-Equipamento e Metodologia	51
4.5.1- Ficha Técnica do Motor M 366 G	54
5- Resultados	55
5.1-Ensaio com Gás Pobre.	55
5.1.1-Resultados dos Testes	57

5.1.2- Composição do Gás pobre	58
5.2- Equações Estequiométricas da combustão do GP	59
5.3- Análise dos Resultados	59
5.4- Análise dos Componentes (Sistema de Admissão)	67
5.4.1- Admissão	67
5.4.2- Válvulas	68
5.5- Velas de Ignição	71
5.6- Óleo Lubrificante	71
6-Conclusões	74
6.1-Sugestões	74
Referência Bibliográfica	76

Listas de Figuras:

	pg
Figura-01- Veículo movido a gasogênio.	02
Figura-02- Esquema do motor ciclo Diesel.	27
Figura-03- Esquema do motor ciclo OTTO.	28
Figura-04- Velocidade de chama em função do avanço de ignição.	29
Figura-05- Pistão do motor a GNV.	31
Figura-06- Anéis do motor a GNV.	31
Figura-07- Camisa do motor a GNV.	31
Figura-08- Variação de lambda em função das emissões de NO _x e HC.	32
Figura-09- Esquema da câmara de combustão do motor M366G.	34
Figura-10- Potência do motor M366G (GN).	35
Figura-11- Torque do motor M366G (GN).	35
Figura-12- Consumo do motor M366G (GN).	36
Figura-13- Modulo de ignição IC 100.	38
Figura-14- Sistema de ignição.	38
Figura-15- Bobina plástica.	41
Figura-16- Bobina asfáltica.	41
Figura-17- Exemplo de detonação.	42
Figura-18- Vela de ignição instrumentada.	43
Figura-19- Regulador de rotação de diâmetro 43 mm.	44
Figura-20- Conj. Misturador regulador de rotação LSC 50.	44

Figura-21- Conj. Equipamento para funcionamento do motor a GNV.	45
Figura-22- Desenho comparativo da válvula e sede de válvula de admissão com ângulo de 45 ° e 20°.	46
Figura-23- Comparativo de swirl sede 45° x 20°.	47
Figura-24- Taxa de compressão para motor do ciclo OTTO.	49
Figura-25- Taxa de compressão para motor do ciclo Diesel.	50
Figura-26- Esquema do motor industrial operando com GN.	52
Figura-27- Esquema do motor industrial operando com GP.	53
Figura-28- Montagem do motor em bancada.	53
Figura-29- Comparativo GP e GN valores otimizados.	61
Figura-30- Valores otimizados em função de lambda GP.	62
Figura-31- Valores comp. otimizados em função do ponto de ignição GP.	63
Figura-32- Temperatura de escapamento do GN e GP.	63
Figura-33- Velocidade do ar de admissão do GP e GN.	64
Figura-34- Depressão no coletor de admissão do GP e GN.	64
Figura-35- Curva de pressão máxima a 1800 1/min.	66
Figura-36- Coletor de admissão.	67
Figura-37- Base do regulador de rotação LCS 50.	67
Figura-38- Válvula de admissão e escape.	68
Figura-39- Conj. Válvula de admissão e escape.	69
Figura-40- Conjunto cabeçote sem válvula de admissão	69
Figura-41- Conjunto cabeçote sem válvulas.	70

Figura-42- Pistão (câmara de combustão).	70
Figura-43- Velas de ignição NGK tipo T 7018 C.	71

Listas de Tabelas:	pg
Tabela-01- Faixa de Concentração de NH_3 e HCN.	25
Tabela-02- Emissões Típicas de Plantas de Gaseificação.	25
Tabela-03- Dados Experimentais Obtidos na DCBR	51
Tabela-04- Resultados dos Testes com Gás Pobre	57
Tabela-05- Composição Molar do Gás Obtido do Gaseificador	58
Tabela-06- Comparativo do PCI entre GP, GN, e Diesel.	59
Tabela-07- Comparativo de Potência x Avanço x Temperatura de Escapamento e Pressão Máxima	60
Tabela-08- Comp. de Avanço de Ignição x Temperatura de Escapamento	65
Tabela-09- Comp. de Potência x Avanço x Temperatura de Escapamento	65
Tabela-10- Comparativo de Potência e Avanço de Ignição	65
Tabela-11- Resultado da Análise do Óleo Lubrificante	72

1. INTRODUÇÃO.

Com a primeira crise do petróleo veio à tona uma tecnologia antiga, que é a gaseificação de biomassa, houve muitas iniciativas em nível de pesquisa para a gaseificação como opção energética, como a transformação do carvão em gás, facilitando desta maneira o seu transporte.

O custo benefício de um gaseificador em relação ao combustível líquido é competitivo desde que utilizado em lugares aonde a tecnologia moderna não chegou.

A conversão da biomassa ou de qualquer combustível sólido em gás é obtida em reatores e os gases produzidos têm aplicações tais como em motores de combustão interna alternativa e turbinas a gás.

As razões que definem pela utilização da gaseificação ou de outro sistema são condições locais. Ex: em uma fazenda onde haja muito excremento de gado, poderá ser instalado um biodigestor e com o gás produzido aciona-se um motor de combustão interna conectado a um gerador para produção de energia elétrica. Na produção de arroz e beneficiamento, onde temos uma grande quantidade de casca de arroz pode-se utilizar a gaseificação.

Existem algumas desvantagens da gaseificação. É uma tecnologia mais complicada que a queima direta. Tem que se ter muito cuidado com o vazamento dos gases, que são tóxicos. Com o avanço da tecnologia os problemas poderão ser superados mais facilmente.

Uma instalação de gaseificação é constituída por:

-Processamento: estoque, transporte da biomassa e redução da mesma ao tratamento necessário;

-Gaseificador, dotado de um alimentador adequado para não haver vazamento de gases;

-Tratamento dos gases: resfriamento e limpeza dos gases;

-Sistema de controle de pressão e temperatura;

-Tratamento dos resíduos, considerando o potencial tóxico dos mesmos.

A forma mais antiga conhecida de produção gás a partir de materiais orgânicos foi o aquecimento do combustível isento de oxigênio (destilação seca). O gás foi usado para iluminar Londres em 1812.

Outro método de gaseificação foi projetado por Bishoff em 1839. Depois modificado por Siemens em 1857, sendo utilizado por 100 anos. Um dos problemas era a produção do alcatrão. Para contornar foi introduzido na zona de reação produtos que promoviam o craqueamento do alcatrão.

Por volta no início da 1ª Guerra Mundial gaseificava-se carvão e turfa devido a grande disponibilidade destes produtos e a qualidade oferecida pelos mesmos.

Onde não havia tais produtos, as instalações foram adaptadas para a gaseificação da biomassa.

Durante a 2ª Guerra Mundial, devido à dificuldade de obter-se combustíveis derivados do petróleo popularizaram-se os pequenos gaseificadores móveis chamados de gasogênios.



Figura 1- Veículo movido a gasogênio

No mundo chegaram a ser usados aproximadamente em 1 milhão de veículos no final da 2ª Guerra Mundial. No Brasil cerca de 20 mil veículos usaram os gasogênios. Estes veículos utilizavam pedaços de madeira, turfa e antracito como combustível. Com a volta do suprimento barato de petróleo esta tecnologia foi abandonada.(Silva e Ruggero, 2003).

Com a crise do petróleo entre 1970 e 1980 o interesse foi renovado pelo uso da gaseificação, mas não na área automotiva, para esta teve interesse em combustíveis alternativos, como o álcool, o gás natural e o biodiesel.

Nikolaus August Otto (1832 até 1891), apresentou pela primeira vez na feira mundial Paris em 1878, um motor a gás com compressão funcionando pelo princípio de quatro tempos. (Silva e Ruggero, 2003).

A aplicação dos motores a gás vem dos anos 1944 com o Sr J. C. Clugniac que fez a adaptação de veículos da época para funcionar com gasogênio, o gás pobre. (Silva e Ruggero, 2003).

Com o aumento da utilização do petróleo, ficou para segundo plano o gás, devido às dificuldades encontradas para sua utilização em massa. Com o aparecimento da crise do petróleo nos anos 80, o gás começou a tomar novos rumos, e as pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias começaram a surgir e a se aperfeiçoar. Inicialmente para substituir o óleo diesel em motores pesados e na indústria. Nos anos 90 ficou notória a sua utilização devido ao potencial em reduzir as emissões gasosas e sua abundância no mundo.

Combustíveis com a capacidade de reduzir as emissões gasosas, o gás natural, o Biogás, gás pobre, e outros combustíveis existentes no mundo podem também contribuir para que alguns países não dependam da importação de energia para sua matriz energética. Muitas vezes o novo combustível serve como energia intermediária até o surgimento ou desenvolvimento de uma energia sustentável. Um exemplo é o gás natural, que deverá ser o combustível intermediário para a nova tecnologia de célula de combustível e, para o escopo desse trabalho, para o gás pobre vindo de um gaseificador. Poderá ajudar as comunidades distantes dos grandes centros urbanos a ter mais conforto, como a energia elétrica, refrigeração e para movimentar máquinas e para a redução de CO₂ na atmosfera, participando também do processo para o atendimento do protocolo de “Quioto”.

A utilização da casca de arroz como combustível, através de um gaseificador, mostrou-se viável em substituição à produção de energia proveniente de um motor utilizando óleo diesel como combustível. (Kapur e Kandpal, 1998).

Na Índia são utilizadas cerca de 22 milhões de toneladas de casca de arroz por ano como combustível através de um gaseificador, o sistema se mostrou eficiente com a utilização da casca de arroz como combustível, embora tenha baixo poder calorífico (4-6 MJ/Nm³), parece ser suficiente para a aplicação em motores de combustão interna, e ser possível sua operação sustentável e uma implementação de operação em condições comercial. (Natarajan e Nordin, 1998)

2-Objetivo

Avaliação do funcionamento de motor ICE com gás de baixo poder calorífico proveniente da gaseificação de casca de arroz

O presente trabalho pretende ensaiar um motor ICE com gás pobre em condições de operação a rotação constante e carga variável.

Pretende-se com isto simular a operação do motor acoplado a um gerador de energia elétrica, uso este mais adequado a este tipo de instalação.

Estas estruturas visam o suprimento de energia elétrica para localidades no qual exista excesso de biomassa e o emprego de um sistema de geração a vapor não seja economicamente viável. O sistema aqui proposto é concebido com objetivo de adequar-se à chamada GERAÇÃO DISTRIBUIDA (GD) de pequeno porte (entre 5 kW e 5 MW).

3-Revisão Bibliográfica

3.1- Contexto da Energia no Mundo

A produção mundial de energia é de 369,4 milhões de terajoules e o consumo de 351,7 milhões de terrajoules, de acordo com o mais recente anuário de estatísticas de energia da ONU (Organização das Nações Unidas, 1996)

A Ásia (34,4% do total) é a maior produtora de energia entre os continentes, seguida da América, que utiliza mais de um terço do total mundial. Quase 90% de toda a energia gerada provém dos combustíveis fósseis, carvão, gás natural e petróleo.([http://www.órbita.starmedia.com/mundo geográfico](http://www.órbita.starmedia.com/mundo_geográfico) disponível em 26/06/05)

As formas de produção de energia variam conforme a fonte, o impacto no meio ambiente e a viabilidade econômica. As fontes podem ser não renováveis ou renováveis. As não renováveis correspondem aos recursos naturais finitos, como os combustíveis fósseis. Já as renováveis, uma vez exploradas pelo homem, se reconstituem espontaneamente ou por práticas de conservação. Entre elas estão o ar, a água e a vegetação. Estimativas da ONU apontam que as reservas de petróleo existentes no mundo devem durar apenas 75 anos; as de gás natural, pouco mais de 100; e as de carvão, aproximadamente 200.

Nós últimos anos, a desaceleração do crescimento econômico mundial - em virtude de crise asiática, da recessão japonesa e do colapso russo - aponta para uma redução da demanda de energia, principalmente nos países industrializados. Até **2020**, o consumo deverá ser maior nas nações em desenvolvimento, segundo a Agência Internacional de Energia Atômica.

Nas próximas duas décadas, o petróleo tende a permanecer como a principal matéria-prima mundial, embora se calcule que seu uso possa diminuir de 40% para 38%, em razão do aproveitamento de outros recursos energéticos. Por causa dos baixos custos de exploração e por não provocar dano algum ao meio ambiente, o **gás natural** será a fonte de energia primária cuja utilização crescerá mais rápida entre **1999 e 2020**, de acordo com estudos do governo dos Estados Unidos (EUA). Estima-se que o consumo de carvão, por sua vez, se eleve a uma taxa média anual de 1,6% no mesmo período. Nos países em desenvolvimento, deve subir mais que o dobro.

3.2.1- Energia nuclear

A energia nuclear responde por cerca de 7% da produção mundial. Atualmente há 437 reatores em operação em 31 países e mais 36 em construção. Os Estados Unidos (EUA) possuem a maior capacidade nuclear instalada (28% do total mundial), seguido da França (18%) e do Japão (12%). A energia nuclear utilizada hoje é gerada pela (fissão) dos núcleos do urânio-235. O estoque de urânio no mundo chega a 33.748 toneladas em 1996. Mais de um terço desse total provém do Canadá, o maior produtor mundial (11.706 toneladas).

A maior desvantagem dessa forma de energia é o risco de vazamento do material radioativo das usinas. O mais grave acidente da história ocorreu em Chernobyl, na Ucrânia, em 1986. A explosão de um dos reatores espalhou uma nuvem radioativa pela Europa. Cerca de 135 mil habitantes foram obrigados a deixar a região de Chernobyl, que pelo menos 30 pessoas morrem e, de acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), em torno de 5 milhões de pessoas contraíram câncer. Em setembro de 1999 acontece o pior acidente nuclear da história do Japão e o mais grave do mundo depois do de Chernobyl. O desastre é provocado pelo não-cumprimento de normas básicas de segurança na usina nuclear da cidade de Tokaimura e causa a contaminação de pelo menos 27 pessoas.

A falta de tecnologia para tratar os resíduos nucleares é um dos grandes problemas do setor. Esse material costuma ser encapsulado em tambores de aço e enterrado em regiões inóspitas. A escolha dos locais de depósito envolve questões técnicas e políticas e deve obedecer a critérios rígidos. Em 1994, 65 nações assinaram a Convenção sobre Segurança Nuclear, que entrou em vigor em 1996 e regulamenta o transporte de lixo radioativo e a construção, a manutenção e o uso das usinas nucleares. Até agosto de 1999, 37 países haviam ratificado a convenção.([http://www.órbita.starmedia.com/mundo geográfico](http://www.órbita.starmedia.com/mundo_geográfico) 26/06/05).

3.2.2-Petróleo

Principal gerador de energia, o petróleo é responsável por cerca de 40% da produção total. Das reservas existentes no planeta, 77% já foram descobertas. A parcela restante encontra-se em campos menores e de difícil exploração. Além dos membros da Organização dos Países Exploradores de Petróleo (Opep), os principais produtores são: Estados Unidos (EUA), Federação Russa, México, China, Canadá, Reino Unido e Noruega. Após o desmembramento da União Soviética (URSS), em 1991, é revelada a importância das reservas no mar Cáspio (oeste da Ásia), até então totalmente controladas pelo governo soviético. Calcula-se que seus recursos petrolíferos sejam equivalentes aos do mar do Norte e que seu potencial seja suficiente para atender a toda a demanda dos EUA durante uma geração. No entanto, a região, que compreende países como o Turcomenistão, Azerbaijão e o Irão, é politicamente conturbada, o que dificulta a exploração. Em setembro de 1999 é descoberto um campo gigantesco no Irão, com reservas estimadas em 26 bilhões de barris.([http://www.órbita.starmedia.com/mundo geográfico](http://www.órbita.starmedia.com/mundo_geográfico) 26/06/05)

3.3-Contexto da Energia no Brasil

Energia Elétrica, Energia Nuclear, Petróleo, fim do monopólio, Gás Natural, Gasoduto Brasil Bolívia, Alcool, e **Biomassa**.

Apesar de possuir uma grande diversidade de fontes de energia, o Brasil não gera o suficiente para atender à demanda interna. Em 1998, a produção é de 196,1 milhões de toneladas equivalentes de petróleo tep e o consumo final, de 228,2 milhões de tep, o que representa um déficit de 32,1 milhões de tep, suprido por meio de importações. A produção nacional está concentrada nas formas de energia primária renováveis, como energia hidráulica, lenha e derivados de cana de açúcar, que correspondem a 68,4% do total.

As fontes não renováveis, que incluem petróleo, gás natural, carvão e urânio (U308), são responsáveis por 31,6%. Nos últimos anos, no entanto, se verifica uma tendência de diminuição do uso de fontes renováveis, principalmente da lenha, que cai de 19% para 10,8% do total entre 1990 e 1998, enquanto aumenta o de formas não renováveis, sobretudo o petróleo (variação de 21,5% para 25,31% no período). Em relação ao consumo, cresce a participação da eletricidade e dos derivados de petróleo (de 37,3% para 39% e de 32,9% para 35,3% entre 1990 e 1998, respectivamente), ao passo que diminui a da lenha (9,1% para 5,7%).

Processada em hidroelétricas e refinarias, a energia primária transforma-se em eletricidade, gasolina, óleo diesel, e outros combustíveis.

3.3.1-Energia Elétrica.

Do total da energia elétrica gerada no Brasil, as usinas, térmicas respondem por 8% e as hidroelétricas, por 92%. Em 1998, a produção (321,5 milhões de megawatts/hora) e o consumo (306,9 milhões de megawatts/hora) crescem cerca de 4% em relação a 1997.

A indústria, setor que mais utiliza a eletricidade, é responsável por 44,4% do consumo total. Do total de residência, 93% possuem eletricidade. O crescimento no consumo é impulsionado pelos segmentos comercial (8,9%) e residencial (7,2%).

Para isso concorrem a expansão e a modernização dos serviços, com a abertura de grandes centros comerciais, a instalação de novas ligações residenciais e a difusão do uso de bens de consumo duráveis pelas classes de menor poder aquisitivo. A indústria registra uma pequena elevação no consumo de energia (0,7%), o que é explicado por seu fraco desempenho econômico.(<http://orbita.starmedia.com/mundogeografico-06/2005>)

A privatização da área elétrica começa em 1995, quando foram promulgadas as leis de concessões, autorizando o início do processo de venda das empresas de energia elétrica. A primeira a ser negociada é a Espírito Santo Centrais Elétricas S/A (Escelsa), negociada por 520 milhões de dólares. Até outubro de 1999, 20 empresas haviam sido privatizadas. Em 1996 é criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) para regularizar e fiscalizar os aspectos técnicos, econômicos e administrativos das cerca de 70 estatais do setor.

Em 11 de março de 1999, dez dias depois de iniciada a privatização da coordenação do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, ocorre o maior blecaute da história do país, cerca de 76 milhões de habitantes de dez estados das regiões Sul e Sudeste e parte do Centro-Oeste, além do Distrito Federal, ficam no escuro. Em alguns deles, o fornecimento de energia só volta ao normal quatro horas e quinze minutos depois. Grande parte do Paraguai, que é servido pela Hidroelétrica de Itaipu, também sofre as consequências da falta de energia elétrica.

3.3.2-Energia Nuclear no Brasil

Em 1999, a única usina nuclear em atividade no país, Angra 1, produz 3.265 gigawatts/hora (GWh) quantidade correspondente a 30% da geração de eletricidade do estado do Rio de Janeiro, de acordo com estudos da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e das Centrais Elétricas Brasileiras S/A (Eletrobrás). As receitas da Eletrobrás Termonuclear S/A (Eletronuclear), que opera a central, crescem 55% em relação a 1997. Desde o início de suas atividades comerciais, em 1985, a usina produz cerca de 25 milhões de megawatts/hora (MWh). Gerada com regularidade,

essa energia seria suficiente para abastecer uma cidade com cerca de 1,2 milhão de habitantes. Falhas nos equipamentos, porém, levam Angra I a freqüentes paralisações na produção. Relatório da Eletronuclear de 1999 revela que problemas no sistema de segurança da usina interrompem 11 vezes o funcionamento do reator em menos de um ano. (<http://orbita.starmedia.com/mundogeografico-06/2005>)

Em outubro de 1999, as obras de construção de Angra II, iniciadas em 1976, estavam 95% concluídas, e previa-se sua inauguração para fevereiro de 2000 com o dobro de capacidade de Angra I. Com a entrada em funcionamento de Angra III, estimada para 2005, as três usinas devem gerar metade de energia consumida no estado do Rio de Janeiro.

3.3.3-Petróleo no Brasil

Em 1998 cresce a produção de petróleo brasileiro, que corresponde a 64% do total consumido no país. Em 1995, esse índice era de 56%. De janeiro a agosto de 1999 são produzidos 41.946.000 metros cúbicos de petróleo. No mesmo período de 1998 a produção foi de metros cúbicos de petróleo. Para suprir o déficit, recorre-se à importação. Por outro lado, o país exporta a produção excedente de alguns de seus derivados, como a gasolina, óleos combustíveis, combustíveis para navios e graxas lubrificantes, que totalizam 6.538.000 metros cúbicos em 1998. Em 2004 a produção de petróleo foi de $86.197 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, sendo a importação de $26.162 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. (Balanço Energético Nacional B.E.N, 2005).

As principais reservas de petróleo do Brasil são Campos (RJ), Espírito Santo (ES), Camamu-Almada (BA), Cumuruxatiba (BA) e Amazonas (AM), em mar, Paraná (PR), em terra, e Potiguar (RN), em terra e mar.

Em setembro de 1999 é anunciada a descoberta de um campo na bacia de Santos (SP). Os cálculos preliminares da Petrobrás indicam reservas potenciais de 600 milhões a 700 milhões de barris, que representa 10 bilhões de dólares a ser explorados em 20 anos. O início da retirada do produto estava previsto para 2001 o que não aconteceu. A busca por petróleo na bacia de Santos começou em 1969 e somente reservas de gás haviam sido descobertas.

Em 1997 é sancionada a lei que permite a entrada de iniciativa privada nacional e internacional no setor petrolífero. Com isso, a Petrobrás, fundada em 1953, deixa de ter o monopólio em todos os seus segmentos: pesquisa, produção refino, importação, exportação e transporte. Para promover a regulamentação, a contratação e a fiscalização dessas atividades, é criada a Agência Nacional de Petróleo (ANP). As empresas candidatas a atuar na área precisam submeter-se a um processo de licitação.

Em junho de 1990, a ANP realiza licitação para a exploração de petróleo no país. Das 27 áreas oferecidas em oito bacias sedimentares, 12 são vendidas por um valor total de 321,6 milhões de reais. Para atrair concorrentes, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) se propõe a financiar 10 bilhões de dólares em investimentos nos próximos dez anos. A própria Petrobrás é a maior compradora, isoladamente ou em consórcios, arrematando 42% do que é leilado. As novas operadoras do setor são a AGIP do Brasil, YPF, KERR McGee, Amerada Hess, Texaco do Brasil, Esso do Brasil, Unocal, British Borneo, Shell e BT. A segunda apresentação de ofertas foi em 2000.

3.3.4-Gás Natural no Brasil

A produção de gás natural, utilizado para fins industriais, comerciais e domésticos, chegou a 10,8 bilhões de metros cúbicos em 1998. No ano anterior, havia sido de 9,8 bilhões de metros cúbicos. Em 1999, o acumulado até agosto foi de 7,9 bilhões de metros cúbicos. Como a produção é maior que o consumo (6, 7 bilhões de metros cúbicos), uma parte do excedente é reinjetada nos poços. O volume de gás natural consumido, no entanto, deve crescer. A estimativa é de que até 2005 cerca de 10% do total da energia consumida no país seja gerada pelo gás natural, especialmente graças à finalização do gasoduto Brasil –Bolívia. Em 2004 o consumo total de gás natural foi de $10.373 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. (B.E.N, 2005).

As principais reservas em terra são Taquaré e Jatobá (AM), na bacia do Solimões, e a de Campo de Barra Bonita (PR), na bacia do Paraná. No mar,

destacam-se as descobertas nos poços CES-141 e 142, na bacia Potiguar (RN), e SES-121, em Sergipe.

Gasoduto Brasil –Bolívia, Inaugurado em 1999, é considerado um dos maiores projetos de infra-estrutura do mundo, orçado em 2 bilhões de dólares. Entram em atividades 1.968 quilômetros da extensão total de 3.150 quilômetros, ligando os municípios de Santa Cruz de la Sierra, na Bolívia, e Guararema, no interior de São Paulo, devendo se estender até ao sul do país. Embora as tubulações permitam o transporte de até 30 milhões de metros cúbicos de gás por dia (hoje se consomem somente 15 milhões de metros cúbicos dia), o acordo inicial prevê o fornecimento de 9 milhões de metros cúbicos diários. A Eletrobrás espera que a participação do gás natural como fonte energética no Brasil chegue a 11,3%. A construção do gasoduto teve início em 1997, quatro anos após a assinatura do contrato entre os dois países. A conclusão da segunda parte do percurso, que vai até Porto Alegre (RS), estava previsto para dezembro de 1999.

A obra é uma das tentativas do governo brasileiro de diversificar a matriz energética do país com objetivo de aumentar a participação do gás natural e diminuir o consumo de petróleo e de energia hidrelétrica.

3.3.5-Álcool no Brasil

A produção de álcool etílico em 1998 é de 14,1 milhões de metros cúbicos, valor um pouco inferior ao produzido em 1997. Nos últimos anos, o consumo de álcool se mantém em 14 milhões de metros cúbicos, levando à formação de grandes estoques. A principal razão dessa estagnação é a redução da produção de veículos novos movidos a álcool, que passam de 96% do total em 1995 para 0,5% em 1998, de acordo com a Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA).

Em 1999, porém, o mercado automobilístico de veículos a álcool volta a crescer, incentivado pelo próprio governo. No estado de São Paulo, por exemplo, o

governo anuncia a isenção do Imposto sobre Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) para quem comprar automóvel a álcool. Em contrapartida, os produtores de álcool e cana devem manter o nível de emprego no setor. De janeiro a setembro de 1999 são vendidos 5,4 mil automóveis a álcool, conforme Anfavea, o que representa um aumento de 43% em relação à soma dos dois anos anteriores. Ainda assim, sua participação no total da frota nacional é de apenas 0,7%.

3.4 Contexto da Biomassa

Matéria orgânica de origem animal ou vegetal que pode ser utilizada na produção de energia. Da mesma maneira que a energia hidráulica e outras fontes renováveis, a Biomassa é uma forma indireta de energia solar, pois resulta da conversão da energia solar em energia química por meio da fotossíntese, base dos processos biológicos dos seres vivos. Estima-se a existência de 2 trilhões de toneladas de Biomassa no globo terrestre, ou seja, cerca de 400 toneladas per capita, o que, em termos energéticos, corresponde a oito vezes o consumo mundial de energia primária, hoje da ordem de 400 EJ por ano. (IEA, 1998).

Uma das principais vantagens da Biomassa é o seu aproveitamento direto por meio da combustão da matéria orgânica em fornos, gaseificadores ou caldeiras. Atualmente, a Biomassa vem sendo bastante utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de co-geração e no suprimento de eletricidade de comunidades isoladas da rede elétrica.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (B.E.N. 2003), a participação da Biomassa na matriz energética brasileira é de 27%, a partir da utilização de lenha de carvão vegetal (11,9%), bagaço de cana-de-açúcar (12,6%) e outros (2,5%). O potencial autorizado para empreendimentos de geração de energia elétrica, de acordo com a ANEEL, é de 1.376,5 MW, quando se consideram apenas centrais geradoras que utilizam bagaço de cana-de-açúcar (1.198,2 MW), resíduos de madeira (41,2 MW), biogás ou gás de aterro (20 MW) e licor negro (117,1 MW).

Neste ano, três novas centrais geradoras a Biomassa (bagaço de cana) entraram em operação comercial no País, inserindo 59,44 MW à matriz de energia elétrica nacional. Projeções da Agência Internacional de Energia indicam que o peso relativo da Biomassa na geração mundial de eletricidade deverá passar de 10 TWh, em 1995, para 27 TWh em 2020 (IEA, 1998).

3.4.1 Benefícios da Biomassa.

- A Biomassa é uma fonte de energia renovável e não contribui para o aquecimento global. Reduz os níveis de dióxido de carbono
- A Biomassa como combustível tem o índice insignificante de enxofre, não contribui com a formação do dióxido de enxofre, que causa a chuva ácida. A combustão da Biomassa produz menos cinza do que a combustão de carvão, e a cinza produzida pode ser usado como aditivo do solo reciclando as matérias como fósforo e potássio.
- A conversão dos resíduos da agricultura, florestas e lixo sólido municipal podem produzir energia e reduzir significativamente os problemas de área para depósito dos produtos sólidos.
- A biomassa doméstica não está sujeita a flutuação do preço mundial ou as incertezas dos combustíveis importados. O desenvolvimento e uso de biodiesel e etanol ou biogás, reduz a pressão econômica imposta aos produtos importados.
- As colheitas perenes (graminhas e árvores) têm menos impacto ambiental do que as colheitas da agricultura convencionais.

3.4.2 Uso da Biomassa em Confinamento

- A Biomassa na natureza tem relativamente baixa densidade e energia, o transporte aumenta o custo e reduz a energia produzida pela

Biomassa. A biomassa tem uma densidade baixa e os volumes são grandes, se comparados aos combustíveis fósseis. As chaves para superar este problema são encontradas no processo da conversão da energia perto de uma fonte concentrada de biomassa.

- A combustão incompleta de matéria orgânica produz monóxido de carbono e outros gases orgânicos. Se a combustão for de alta temperatura serão produzidos os óxidos de nitrogênio. Em escala doméstica o impacto à saúde é menor. É significativa a poluição em fornos abertos.

- Há um grande potencial difundido no uso indiscriminado das florestas naturais causando o desflorestamento e a escassez da madeira, com danos ecológicos e sociais sérios.

- Há um conflito potencial sobre o uso dos recursos naturais da terra e da água para energia de Biomassa, tais como a produção de alimento. Entretanto os usos de técnicas modernas na agricultura são significativos e há terra disponível para todos os usos.

- Algumas das Biomassas aplicadas não são totalmente competitivas neste estágio, por exemplo, na produção de eletricidade, há um forte competidor, o gás, em plantas de ciclo combinado, porém a energia produzida pela Biomassa pode ter melhoramentos econômicos.

- Cresce o interesse sobre as emissões limpas, que tem atrativo no uso da Biomassa.

A produção e o processamento da Biomassa necessita de uma energia significativa, como combustível para transporte e fertilizantes para a agricultura, resultando em um contrapeso reduzido de energia para Biomassa.

O processo de Biomassa

- Necessita reduzir o uso de energia fóssil e maximizar o aproveitamento da energia proveniente de resíduos.

- Há freqüentemente uma política institucional para o uso da Biomassa, taxas e subsídios, para não incentivar a utilização do combustível fóssil.
- Os preços de energia freqüentemente não refletem os benefícios ambientais da Biomassa ou de outros recursos de energia renovável.

3.5-Gaseificação de Biomassa

3.5.1 Processo da gaseificação

A gaseificação é uma forma de aumentar a eficiência do uso energético da biomassa. O uso da biomassa tradicionalmente em fogões, lareiras ou mesmo caldeiras industriais costuma ser feito com equipamentos de baixa eficiência energética, altos níveis de poluição e, muitas vezes, associado a práticas não sustentáveis de obtenção da biomassa (desmatamento, queimada, etc.).

A gaseificação é um processo termo-químico que consta basicamente da queima parcial de um combustível (líquido ou sólido), obtendo disto um gás ainda combustível (FERNANDES, 2000). Por ele se obtém um gás de baixo poder calorífico, com resíduos de particulados, alcatrão, cinzas volantes e óxidos de nitrogênio.

A gaseificação é um processo em duas etapas: na primeira, a biomassa sofre uma pirólise, produzindo gás e carvão. Na segunda, o carvão reduz os gases (na maior parte dióxido de carbono e vapor d'água) para formar monóxido de carbono e hidrogênio (KINOSHITA, 1997). O processo também gera metano e outros hidrocarbonetos superiores, dependendo do projeto e condições de operação do gaseificador. O gás combustível produzido é composto de 15 a 17% de hidrogênio, 16 a 19% de monóxido de carbono, 12 a 15% de dióxido de carbono, 3 a 5% de metano e nitrogênio compondo a parcela restante. O gás pode alimentar um motor de combustão interna ou também pode ser utilizado em turbinas a gás, simples ou combinadas a uma turbina a vapor. Pode-se ainda utilizar o processo de gaseificação-geração elétrica para gerar simultaneamente calor, processo este chamado de cogeração. (FERNANDES, 2000). MUKUNDA (1993) indica que o gás pode ser usado em motores de combustão interna convencionais, substituindo

60% de gasolina ou 75 a 85% de diesel. Esta aplicação é interessante para países em desenvolvimento, onde é ainda incipiente a eletrificação do meio rural. No nosso caso a utilização do gás pobre é 100% em um motor do ciclo Otto.

A gaseificação também pode ser fonte de hidrogênio para células-a-combustível. Segundo HALL (1993), a biomassa é mais reativa do que o carvão, sendo assim uma fonte energética mais adequada à tecnologia da gaseificação para geração energética, à produção de metanol e à produção de hidrogênio.

Pode-se aumentar o poder calorífico do gás pela adição de elementos catalizadores (dolomita ou níquel, por exemplo) na reação. Os catalizadores auxiliam a conversão do alcatrão e de outros hidrocarbonetos em gás, aumentando a eficiência do processo e o teor de hidrogênio no gás, podendo este ser usado para alimentar uma célula de combustível (ALDERUCCI ET AL. 1993).

Uma outra forma de aumentar a formação de hidrogênio é pela adição de vapor d'água ao processo de gaseificação. GIL BARNO (1998) constata que, com o aumento da presença de vapor d'água na reação, há intensificação na reação de "shift" e conseqüentemente maior produção de H₂ e maior poder calorífico no gás. A reação de "shift" é a conversão de CO e H₂O em CO₂ e H₂.

Se a biomassa for produzida e consumida de maneira sustentável, fecha-se o ciclo de consumo-produção do gás carbônico, não aumentando a taxa de gases de efeito-estufa presente na atmosfera (FERNANDES, 2000).

3.5.2 Tipos de Gaseificadores

Gaseificadores são classificados por suas características construtivas e operacionais. As classificações mais usuais são (SÁNCHEZ, 1994):

- Quanto ao poder calorífico do gás produzido: gás de baixo poder calorífico (até 5 MJ/ Nm³); gás de médio poder calorífico (de 5 a 10 MJ/ Nm³); gás de alto poder calorífico (de 10 a 40 MJ/ Nm³).
- Quanto ao tipo de agente gaseificador: ar; vapor d'água; oxigênio; hidrogênio.

- Quanto à direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação: contracorrente; concorrente; fluxo cruzado; leito fluidizado; leito circulante.
- Quanto à pressão de trabalho: atmosférico ou pressurizado (geralmente até 20 atm).
- Quanto ao tipo e forma do combustível: carvão; resíduos agrícolas; resíduos industriais; resíduos sólidos urbanos (lixo); biomassa in natura; biomassa peletizada; biomassa pulverizada.

3.5.2.1 Gaseificadores de Leito Fluidizado

Nos gaseificadores de leito fluidizado um leito de partículas inertes (óxido de alumínio, areia ou cinzas) é fluidizado e mantido em suspensão com o combustível por meio de um fluxo de ar. Isto cria melhores condições de transferência de calor e homogeneidade da temperatura dentro do gaseificador. Nestas condições, a maior parte dos voláteis está em contato com as partículas do leito aquecido, contribuindo para uma gaseificação completa e limpa, o que melhora a eficiência do equipamento (FERNANDES, 2000). O leito inerte é inicialmente aquecido por outro combustível (processo de pré-aquecimento do reator) até que alcance a temperatura de operação ou a temperatura de auto-ignição da biomassa (BARRIGA ANGULO, 2002), para que a partir de então, por meio do início de sua alimentação, ocorram reações exotérmicas que aqueçam o leito até a temperatura de equilíbrio para a reação de gaseificação desejada.

A alta temperatura do leito após o pré-aquecimento permite a manutenção do processo de gaseificação apenas utilizando-se da biomassa, sem necessidade de mais consumo de GLP (FERNANDES, 2000).

SÁNCHEZ (1994) defende o uso de gaseificadores de leito fluidizado em relação aos de leito fixo, por algumas razões:

- Fácil controle da temperatura pela variação na alimentação de ar e de combustível;

- Flexibilidade na taxa de alimentação;
- Flexibilidade na composição do combustível; e
- Alta potência volumétrica.

Algumas desvantagens são também citadas por Sánchez (1994):

- Temperatura de operação limitada;
- Alto conteúdo de cinzas no gás;
- Arraste de carbono fixo com as cinzas; e
- Altos teores de alcatrão no gás, devido a operações em baixas temperaturas (entre 700 e 900°C).

O leito inerte passa por quatro fases de fluidização, ao se aumentar o fluxo de ar: leito fixo (quando as partículas ainda estão em repouso); leito fluidizado incipiente (quando o arrasto do fluxo de ar equilibra o peso das partículas); leito fluidizado borbulhante e transporte pneumático das partículas. Esta última fase é utilizada nos reatores de leito fluidizado circulante, onde há elutriação do leito e uma posterior coleta em separadores ciclônicos para reaproveitamento do material inerte.

O processo de fluidização ocorre da seguinte maneira (FERNANDES, 2000): o leito de partículas oferece resistência ao escoamento vertical do ar. Ao se aumentar a velocidade de escoamento do ar, aumenta-se a força de arrasto exercida sobre as partículas, que tendem a se reorganizar, oferecendo menor resistência ao escoamento. Neste momento ocorre a expansão do leito. Ao se aumentar ainda mais a velocidade do fluxo de ar, a expansão continua e as forças de arrasto equivalem ao peso das partículas (fluidização incipiente). Neste estágio, o sistema fluido-partículas se comporta como um fluido - daí a denominação leito fluidizado. Neste ponto, a velocidade do fluido é chamada de velocidade de mínima fluidização. Até o início da fluidização, o leito se expande uniformemente e logo após a fluidização incipiente começam a se formar bolhas de gás/ar responsáveis pela recirculação das partículas dentro do leito, gerando o regime de fluidização borbulhante. Se a

velocidade do fluido é elevada além do regime de surgimento de bolhas, o leito é levado a uma situação onde as partículas são arrastadas na corrente de gás/ar e carregadas para fora do leito. Este fenômeno se chama elutriação. Partículas menores são elutriadas a velocidades menores. Quando a velocidade é alta o suficiente para elutriar todas as partículas do leito, chegamos ao regime de transporte pneumático.

A fluidização promove um íntimo contato entre partículas e gases, assim como uma intensa circulação e mistura das partículas. Isso resulta em alta taxa de velocidade de reação gás-sólido e uma temperatura uniforme em todo o leito.

Dois fases podem ser identificadas numa seção transversal do leito: a emulsão e as bolhas. A primeira contém as partículas sólidas com gás que percola através delas. O fluxo de gás na emulsão é limitado pela quantidade que permite a fluidização incipiente. Qualquer quantidade maior de gás passa pelo leito na forma de bolhas. As bolhas são praticamente livres de partículas sólidas, mas com sua passagem pelo leito, acabam por arrastar algumas partículas, auxiliando à mistura de partículas no leito.

3.5.2.2 Plantas de gaseificação

A densidade energética da biomassa é baixa se comparada com outras fontes como carvão ou petróleo (FERNANDES 2000). Esta baixa densidade energética e a característica dispersa da produção da biomassa limitam sua aplicação a uma conversão energética (eletricidade ou combustíveis) realizada em instalações descentralizadas, relativamente pequenas, para evitar o alto custo de transporte. Segundo CRAIG E MANN (1996), a eficiência média para geração de energia elétrica pela gaseificação da biomassa não tem superado 25%, devido a tecnologia ainda não sofisticada e limitações econômicas para transporte e armazenagem de combustível. Como consequência, tem havido limitações às dimensões das plantas de geração e alto custo da eletricidade gerada.

CRAIG E MANN (1996) defendem a construção de grandes centrais de geração ou cogeração elétrica a partir da biomassa. A justificativa para tal é a

necessidade de economia de escala para justificar economicamente a produção e distribuição elétrica. LEVIN (1995), analisando ciclos combinados integrados a gaseificação de carvão, também favorece este argumento. Na análise econômica de OVEREND E BAIN (1994), verifica-se que o aumento em eficiência tem duas conseqüências: reduzir o custo do capital relativo ao kW produzido e reduzir a sensibilidade do custo final de eletricidade em relação ao componente combustível do custo.

Segundo JOHANSSON (1992), a tendência de investimento no desenvolvimento de grandes centrais deve baratear e disseminar o custo da tecnologia e aumentar a eficiência do processo, permitindo o desenvolvimento paralelo de plantas geradoras descentralizadas, se houver interesse político ou comercial para isto. O autor apresenta a viabilidade de projetos já realizados de pequenas centrais geradoras de energia pela gaseificação da biomassa.

Apesar de ainda incipiente o uso da gaseificação de biomassa, há várias plantas de gaseificação de carvão mineral para geração ou cogeração de energia elétrica propostas e desenvolvidas no mundo. Por exemplo, LEVIN (1995) descreve uma grande planta para gaseificação de carvão, na Rússia. A solução adotada para aumentar a potência gerada foi instalar em paralelo seis unidades de gaseificação, cada uma gerando 500 MW.

3.5.2.3 Limpeza de Gases

Os elementos que devem ser controlados para que se possa utilizar o gás em um motor ou turbina são o alcatrão, cinzas volantes e os óxidos de nitrogênio. Dependendo da aplicação, os sistemas para controle e limpeza dos gases são tecnicamente viáveis, mas podem se mostrar caros a ponto de inviabilizar economicamente o projeto (FERNANDES, 2000). Se utilizado um grupo-gerador para converter o gás em eletricidade, costuma-se limpar o gás frio. (FOSSUM, 2001; MUKUNDA, 1993; BARTHELEMY, 1981). Se utilizada uma turbina a gás, deve-se considerar a temperatura de entrada dos gases para manter uma adequada eficiência térmica do ciclo. KINOSHITA (1997) indica que se deve desenvolver a

tecnologia de limpeza de gases quentes para tornar a geração de energia pela gaseificação da biomassa um processo comercialmente viável. As tecnologias aplicadas para a limpeza dos gases dependem do uso ao quais estes se destinam e do ponto no processo a ser aplicada a tecnologia (antes, durante ou depois da gaseificação). BRIDGEWATER (1995) sugere o uso de multi-ciclones e de precipitadores eletrostáticos para controlar os particulados na saída de gases do reator. Para o controle dos óxidos de nitrogênio e redução do monóxido de carbono e carbono voláteis, BRIDGEWATER recomenda o uso de um reator de leito fluidizado circulante. ZAPOROWSKI (2003) comenta que o tipo de limpeza do gás combustível para uso em turbinas tem também um impacto significativo na eficiência energética. A substituição de limpeza de gás a frio por limpeza a quente resulta em um aumento de 2% na eficiência de geração de eletricidade no ciclo combinado.

MUKUNDA (1993) indica que motores de combustão interna aceitam pequenas quantidades de particulados, mas em quantidade não excessiva. O pesquisador comenta que os gaseificadores produzem partículas finas de carbono e alcatrão, cujos níveis devem ser constantemente monitorados para evitar danos ao motor se trabalhado em condições extremas.

Segundo JANSEN (2002), o melhor custo benefício para gaseificadores ainda é o uso de resfriamento dos gases e filtragem com filtro de manga.

STEINWALL (1997) modelou e testou um gaseificador de leito circulante. O gás gerado está na temperatura de 920°C e é refrigerado a 420 °C antes de passar por um filtro de vela de cerâmica ou metal, para ser limpo dos álcalis e partículas presentes.

3.5.2.4 Impacto Ambiental

A gaseificação de biomassa, por ser uma oxidação parcial de resíduos orgânicos, tem como produto um gás, composto basicamente de CO₂, CO, H₂, CH₄, N₂ e vapor d'água, gás este destinado a um processo térmico, a ser queimado ou reduzido.

O gás resultante da gaseificação da biomassa, ao contrário do gerado a partir do carvão, tem conteúdo de enxofre insignificante (KINOSHITA, 1997). Quanto à emissão de gás carbônico, se a biomassa for produzida e consumida de maneira sustentável, fecha-se o ciclo de consumo-produção do gás carbônico, não aumentando a taxa presente na atmosfera.

Se não houver problemas locais de vazamento na instalação, a maior preocupação ambiental seria com o sistema de limpeza dos gases, ou seja, destino para as cinzas e alcatrão recolhidos. As cinzas costumam ser recolhidas por separadores ciclônicos ou eletrostáticos e o alcatrão é recolhido por lavagem dos gases ou por filtros de vela, metálicos ou de manga (tecido). Daí necessita-se providenciar destino para estes resíduos. As cinzas podem ser utilizadas como adubo ou na indústria do cimento, enquanto o alcatrão pode ser queimado, para aproveitamento do calor ou do carbono de seus componentes (por exemplo, na indústria de negro de fumo). Segundo HALL (1993), o conteúdo de cinzas da biomassa é bem menor do que o de combustíveis fósseis, como o carvão. Geralmente é uma cinza livre de metais tóxicos e possui valor como fertilizante, podendo ser despejada na área de cultivo da biomassa para ajudar a repor os nutrientes do solo. A porcentagem de enxofre presente nas cinzas da biomassa também é irrisória se compararmos à do carvão.

Nas aplicações da gaseificação, pode-se desconsiderar a formação térmica de NO_x , pois a temperatura adiabática de chama do gás produto não ultrapassa 1.100 °C (JANSEN ET AL., 2002). Segundo o pesquisador, a maneira de se formar os óxidos de nitrogênio seria por meio da conversão de NH_3 ou de HCN no gás produto. Concentrações típicas são apresentadas na tabela 1. YOSHIDA (1997) também concorda neste ponto, indicando que as baixas temperaturas de operação do gaseificador (800-900°C) reduzem a formação de óxidos de nitrogênio.

Faixa de concentração de NH_3 e HCN no gás produto (JANSEN et all, 2002)

Tabela 01 faixa de concentração de NH₃ e HCN

Tecnologia	NH ₃ (mg/Nm ³)	HCN (mg/Nm ³)
Leito Fixo	600-1800	60-110
Leito Fluidizado Borbulhante	500-1500	50-150
Leito Fluidizado Circulante	750-1500	150-250

Em turbinas a gás, a conversão de NH₃ em NO_x situa-se na faixa de 50 a 90%, com as menores taxas de conversão relacionadas à maior concentração. Em motores de combustão interna a gás, pode-se considerar a conversão em 30%. JANSEN (2002) apresenta valores de emissão de NO_x e particulados para plantas piloto de gaseificação, com motor e turbina, ambos operando com 5 MW_{th} de potência no gás produto. Para o caso de turbinas a gás, o pesquisador considerou 100% de conversão de NH₃ em NO_x.

Emissões típicas de plantas de gaseificação (JANSEN ET AL., 2002).

Tabela 02 emissões típicas de plantas de gaseificação

Tecnologia	NO _x (mg/Nm ³)	Particulados (mg/Nm ³)
Gaseificador de 5 MW _{th} , com motor de combustão interna.		
Leito Fixo	133-389	100-1500
Leito Fluidizado Borbulhante	92-275	10.000-60.000
Leito Fluidizado Circulante	130-256	30.000-100.000
Gaseificador de 5 MW _{th} , com turbina a gás.		
Leito Fixo	443-811	100-1500
Leito Fluidizado Borbulhante	306-917	10.000-60.000
Leito Fluidizado Circulante	467-853	30.000-100.000

FOSSUM (2001), apresenta resultados com menor emissão de NO_x, operando um gaseificador de leito fixo de 30 kW_{th}, anexado a um motor de

combustão interna. Os testes resultaram na emissão de NO_x de 53 mg/Nm^3 ou $0,27 \text{ g/kWh}$. No mesmo estudo, apresentam-se valores de emissão de CO de 4.735 mg/Nm^3 ou $22,3 \text{ g/kWh}$.

Segundo Fossen, o alto teor de CO pode ser explicado por alguns fatores: baixa temperatura adiabática de chama para o gás produto, comparado com o gás natural, causando combustão incompleta. Ademais o gás produto possui velocidade de chama relativamente baixa (FOSSUM, 2001) e, conseqüentemente, baixa estabilidade de chama. Isto pode causar pontos localizados de extinção da chama dentro do cilindro do motor, resultando em combustão incompleta. Isto pode ser resolvido com a mistura do gás produto com outro gás de melhores propriedades, como, por exemplo, o gás natural ou aumentando a taxa de H_2 ou CH_4 presentes no gás produto.

Uma análise de ciclo de vida é essencial para melhor determinar o impacto ambiental de uma planta de ciclo combinado integrada à gaseificação de biomassa. Conforme demonstra MANN ET AL. (1996), sempre se podem minimizar o impacto ambiental e melhorar a eficiência de um sistema após a análise de ciclo de vida.

3.6- Motor movido a Gás

Os motores térmicos são máquinas cuja finalidade é transformar a energia calorífica em energia mecânica diretamente utilizável.

No caso dos motores endotérmicos a energia pode ser proveniente de combustível líquido, sólidos ou gasosos.

Motores de combustão interna.

O motor é considerado à combustão interna, quando esta se processa no próprio fluido operante.

Os motores alternativos podem ter à forma de combustão de dois tipos:

- Por ignição a compressão
- Por ignição a centelha

Os motores alternativos com ignição por centelha são comumente chamados de motores do ciclo **Otto** e os de ignição por compressão são chamados do ciclo **Diesel** (PENIDO FILHO, 1983).

Nas figuras 2 e 3 mostram os esquemas dos motores do ciclo Diesel e Otto.

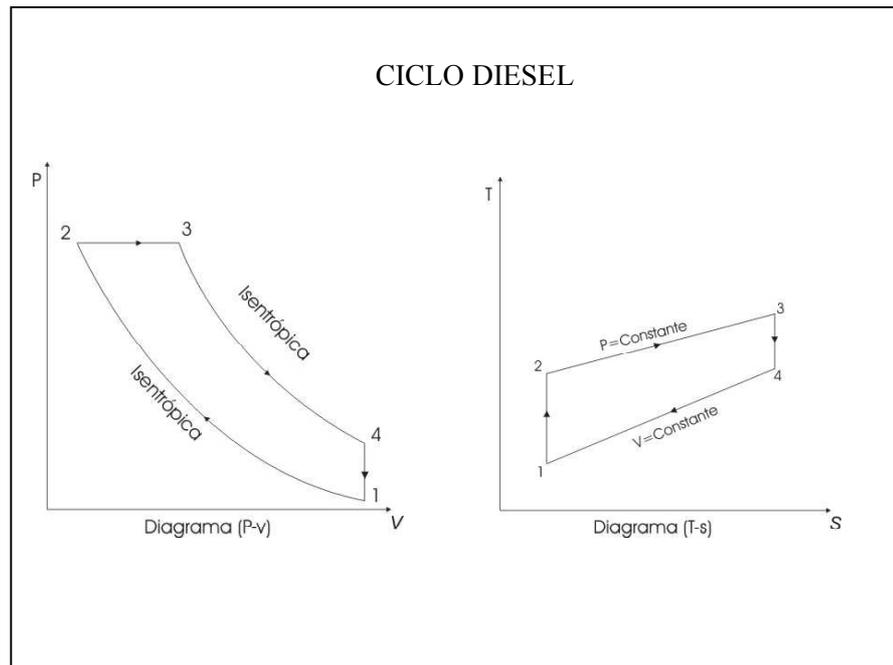


Figura 02- Esquema do motor ciclo Diesel (ENG. GÁS NATURAL-MOTORES-PROF. S.A. NEBRA).

Características do Ciclo Diesel:

- 1 - 2: compressão - adiabática reversível, por tanto, isentrópica.
- 2 - 3: a pressão constante (combustão)
- 3 - 4: expansão - adiabática, reversível, por tanto, isentrópica.
- 4 - 1: a volume constante (exaustão)

No ciclo Diesel a ignição do combustível acontece normalmente pela própria compressão, a vela de ignição é desnecessária.

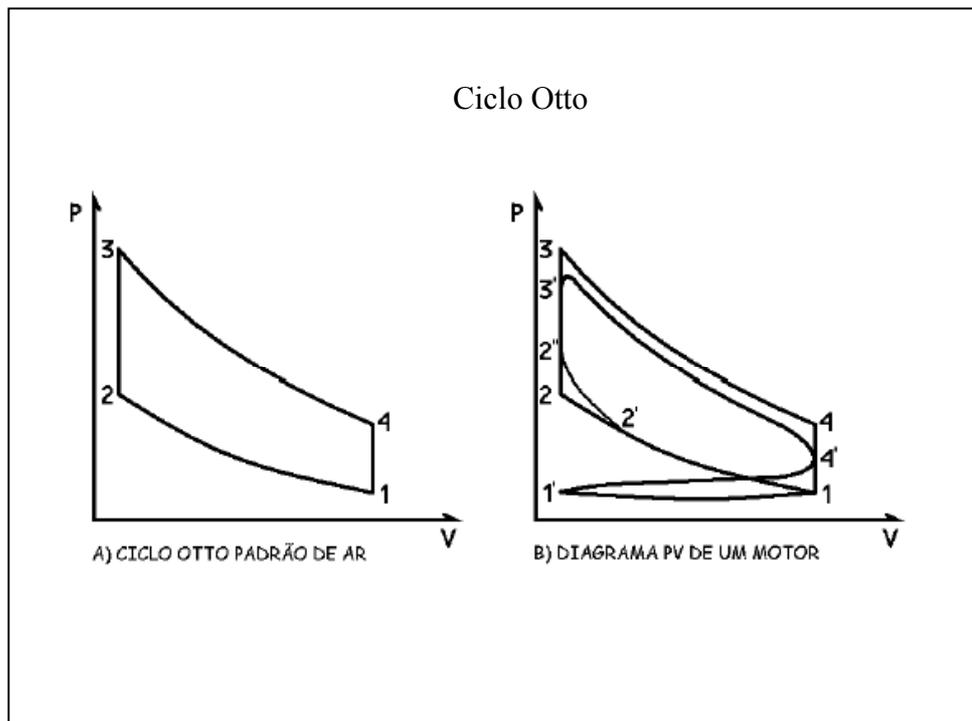


Figura 03- Esquema do motor ciclo OTTO (ENG. GÁS NATURAL-MOTORES-PROF. S.A. NEBRA).

Modelagem do ciclo Otto

- 1 - 2: compressão - adiabática reversível, por tanto, isentrópica.
- 2 - 3: a volume constante (combustão),
- 3 - 4: expansão - adiabática, reversível, por tanto, isentrópica.
- 4 - 1: a volume constante (exaustão)

O motor de ignição por centelha convencional é alimentado com uma mistura de combustível e ar bastante homogênea e essencialmente gasosa no instante em que ocorre a ignição (TAYLOR, 1976). O uso deliberado de mistura heterogênea nos motores de ignição por centelha tem sido desenvolvido durante muitos anos, mas jamais atingiu importância comercial.

3.7- Velocidade de Chama

Se a combustão ocorresse instantaneamente, a ignição ocorreria no PMS. Desde que a combustão se faz em um tempo finito, a máxima força surge inflamando o combustível antes do PMS, tipicamente 10-40° APMS. Esta ignição adiantada tem o efeito adverso de APMS de alta pressão. A velocidade de chama para o fluxo estático ou laminar varia em função da composição química. A turbulência é o meio principal para aumentar a velocidade de chama. Esse fenômeno foi comprovado nos testes realizados na DCBR, no desenvolvimento do motor M 366 LAG, quando da substituição do cabeçote original do gás pelo do motor Diesel de maior turbulência, onde se obteve melhor eficiência na combustão. Na figura 20 vemos como se comporta a velocidade de chama em função do avanço de ignição

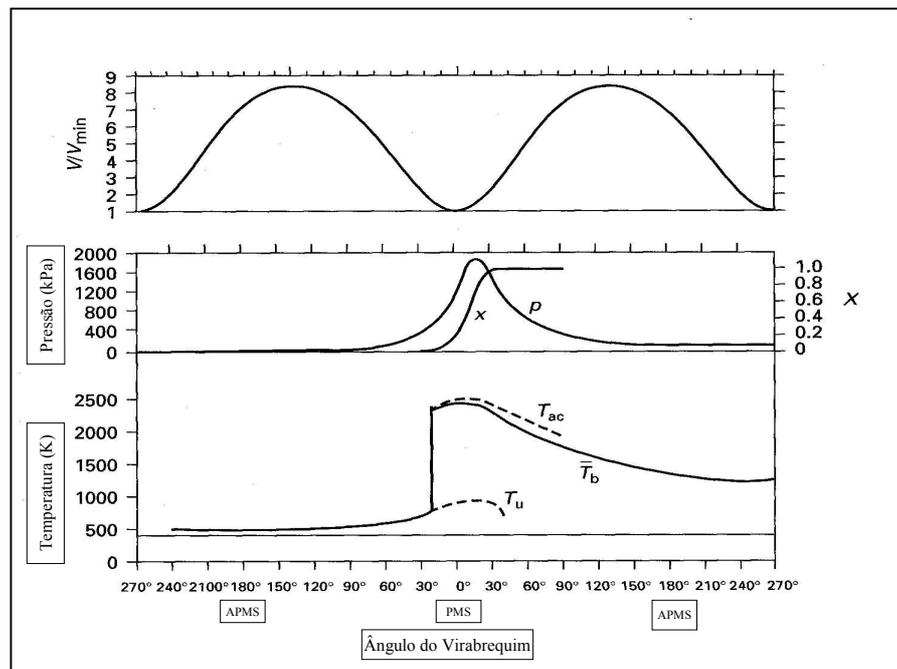


Figura 04 Velocidade de chama em função do avanço de ignição

3.8- Óleo lubrificante para motor a gás.

Nos testes realizados pela DCBR utilizou-se o óleo lubrificante de série da Móbil Pegasus 1 SAE 15W40 sintético, com intervalo de troca de 500 horas para durabilidade em banco de provas e intervalo de 45.000km para aplicação veicular.

O controle de consumo do óleo lubrificante durante o ensaio durabilidade na DCBR apresentou a média de 0,35g/kWh. O óleo foi pesado a cada 50 horas no total de 500 horas

A DCBR realizou novos testes e obteve os mesmos rendimentos do óleo lubrificante sintético, com o novo óleo lubrificante na versão semi-sintético e mineral e com o mesmo intervalo de troca, porém com redução do preço.

3.9.-Análise dos Componentes a GNV:

3.9.1-Depósitos:

Não foram observados depósitos nas partes em contato com o óleo lubrificante no motor M366LAG movido a GNV.

As canaletas dos pistões apresentaram-se limpas e sem depósitos de hidrocarbonetos (carvão).

As câmaras de combustão e dutos de escape apresentaram finas camadas de depósitos, característica de combustão do motor Otto a GNV.

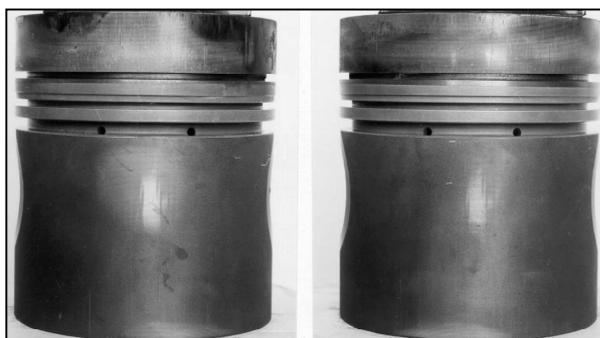


Figura 05-Pistão do motor a GNV.

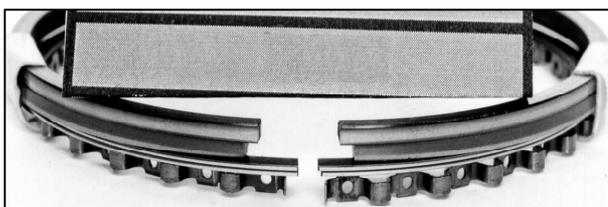


Figura 06-Anéis do motor a GNV.

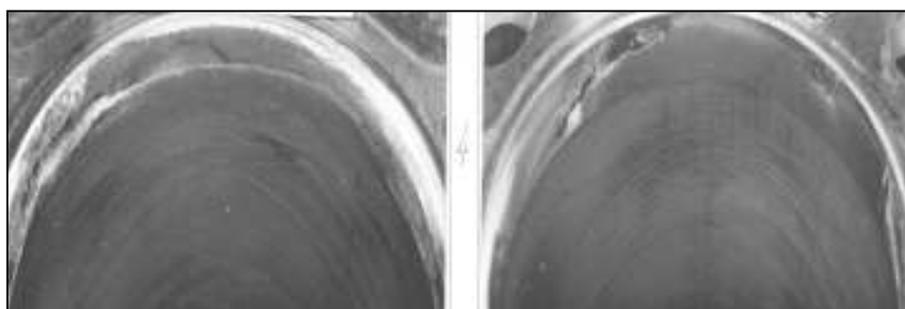


Figura 07-Camisa do motor a GNV.

3.10-Combustão e Emissões

Foram realizados ensaios no laboratório da DCBR, em toda a região de operação do motor, (variando o lambda e ponto de ignição), para determinar a melhor relação entre o ponto de ignição, a relação ar / combustível, emissões de NO_x, HC e eficiência térmica (Fig. 08). Nessa etapa também se avaliou a estabilidade de combustão (misfire), pressão máxima de combustão e ocorrência de detonação com GNV. (BORGES, LH ET AL, 1997).

Exemplo de influência do coeficiente de excesso de ar e do ponto de ignição nas emissões de NO_x e HC em um ponto de operação do motor M366LAG.

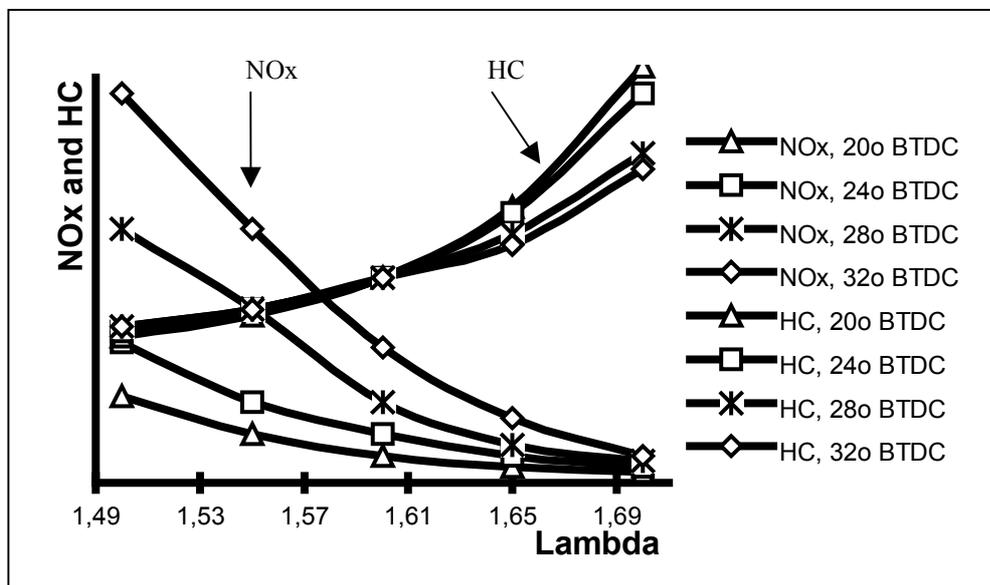


Figura 08-Variação de Lambda em função das emissões de NO_x e HC

3.11- Definições Construtivas

O motor M366G foi desenvolvido tendo como base os motores Diesel OM366, que são usados em ônibus urbanos e caminhões médios da Mercedes Benz, de forma que as dimensões e conexões principais fossem idênticas.

Inicialmente foram realizados cálculos termodinâmicos para análise dos seguintes pontos:

- Possibilidade de atendimento das curvas de potência e torque desejadas.
- Determinação da melhor taxa de compressão
- Verificação das necessidades de turbocompressor
- Expectativa de fluxo de ar e gás para a seleção de sistema de alimentação de gás adequado.
-

Os resultados dessa análise permitiram a primeira seleção dos diversos componentes, que foram otimizados no desenvolvimento e resultaram nas seguintes diferenças principais do M366G em relação ao motor Diesel básico:

- Pistão com câmara de combustão alterada e taxa de compressão reduzida para 12:1 (Figura 09).
- Cabeçote alterado para utilização de velas de ignição, e o turbilhonamento do coletor de admissão em princípio era prejudicial, mas após novos testes comprovou-se a necessidade.
- Ausência do amortecedor de vibração torsional, em função da menor taxa de compressão e combustão mais suaves em comparação ao motor Diesel.
- Válvulas de escape e respectivos assentos adequados à operação com o GNV
- Coletor de admissão alterado.

- Conexões no sistema de arrefecimento do motor, para aquecer o redutor de pressão de gás natural.
- Limitador eletrônico de rotação máxima.
- Válvula para corte rápido de combustível.
- Ignição eletrônica digital mapeada, sem partes móveis.
- Sensores de temperatura no coletor de admissão e temperatura do líquido de arrefecimento.
- Sensores magnéticos para determinação da posição e velocidade angular do eixo de manivelas.
- Redutor de pressão de 2 estágios para fornecimento de gás em pressão adequada ao misturador em regime normal. Não é necessário para o gás pobre
- Estabilizador de pressão. Não é necessário para o gás pobre

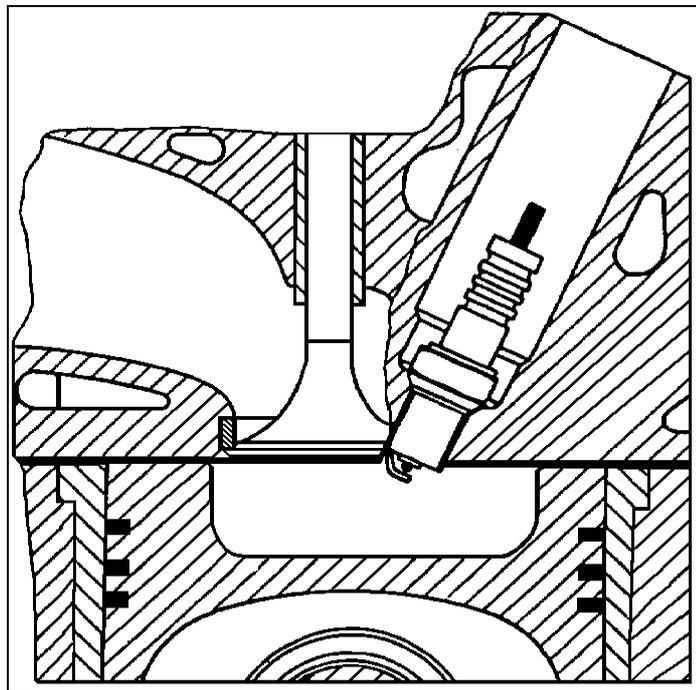


Figura 09- Esquema da câmara de combustão do motor M 366 G

As curvas de Potência, Torque e Consumo do motor M 366 G na versão industrial, obtidas no laboratório da DCBR, estão mostradas nas figuras 10, 11, e 12.

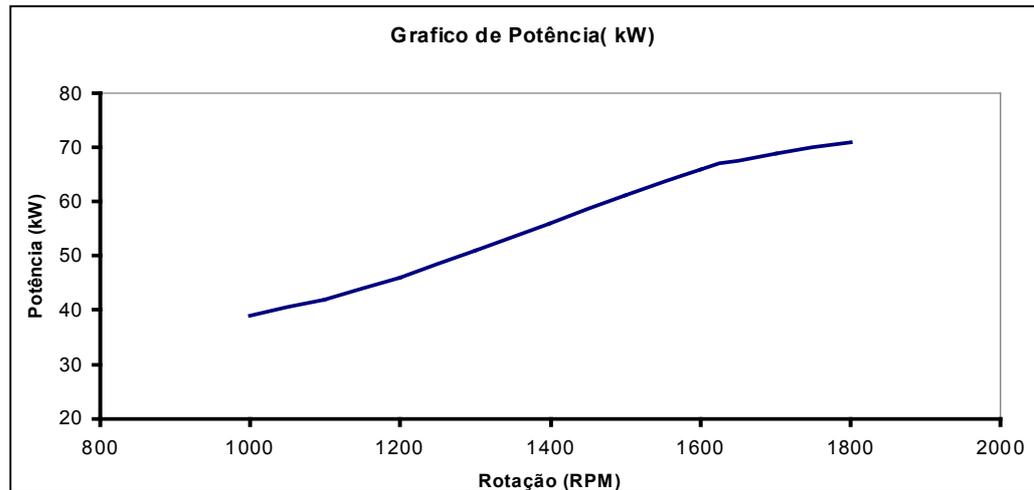


Figura 10-Potência motor M 366 G (GN)

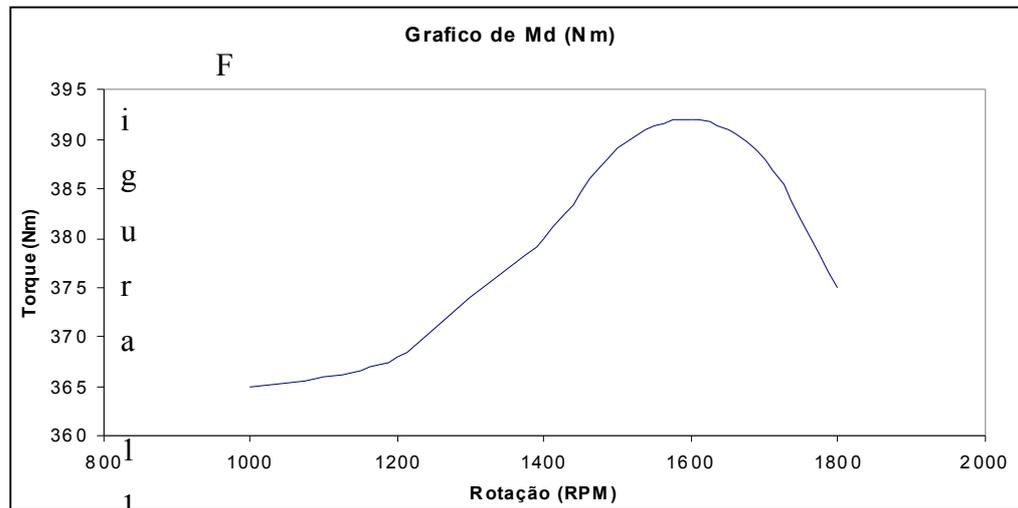


Figura 11 -Torque motor M 366 G (GN)

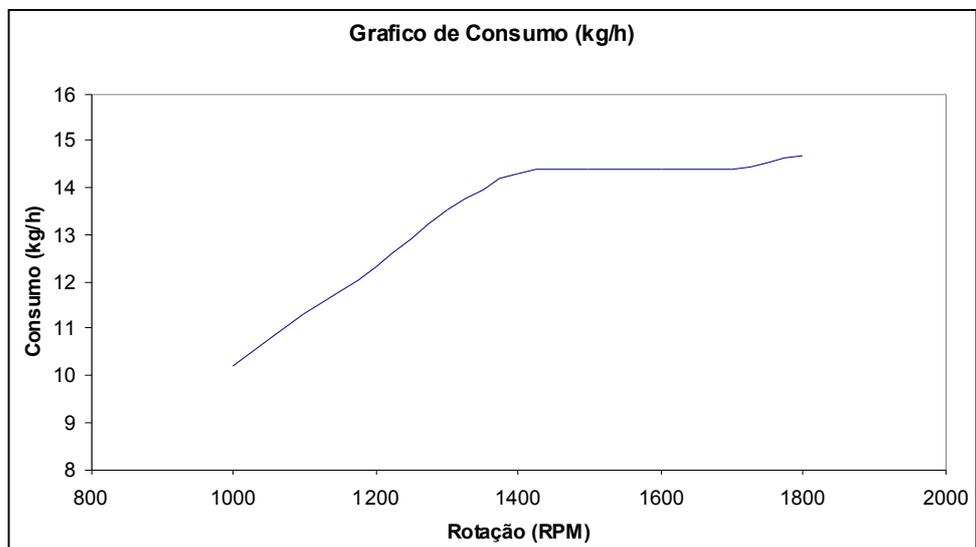


Figura 12-Consumo do motor M 366 G (GN)

4-Materiais e Métodos

4.1- Sistema de Alimentação.

Temos duas formas de entrega de gás ao motor;

Em alta pressão (Max 4 Bar), injeta-se o gás na sede de válvulas para motores com vários injetores, direto no misturador ou no coletor de admissão para motores com um injetor, EDI injeção direta do gás na câmara de combustão.

Baixa pressão (aspiração do motor) nós temos; a aspiração do gás é feita direta no misturador através de um venturi e nos motores turbinados ou com radiador de ar a aspiração se faz antes do turbo compressor, o qual devemos tomar algumas precauções no sentido de segurança, pois está passando a mistura ar/combustível pelo turbo compressor que está a temperaturas altas (600 a 700 °C) e o volume de mistura armazenada antes de entrar no motor é grande e a possibilidade de vazamento ao longo do tempo de utilização deve ser levada em consideração.

4.2- Sistema de Ignição

Para que a mistura de combustível ar se inflame, no interior do cilindro do motor, produzindo assim a força mecânica que o movimenta, é preciso um ponto de partida. Este ponto de partida é a faísca que inflama a mistura, e que é produzida por uma série de dispositivos que formam o sistema de ignição.

A finalidade do sistema de ignição é gerar uma faísca nas velas, para que o combustível seja inflamado. Os sistemas de ignição utilizam diversos componentes que vêm passando por alterações no decorrer dos tempos.

Para a inflamação de uma mistura de ar/combustível através de faíscas elétricas, é necessária uma energia de cerca de 0,2 mJ por ignição individual, desde que a mistura tenha uma composição estequiométrica (em repouso, homogênea). Misturas ricas e pobres (turbulentas) necessitam acima de 3 mJ. (BOSCH, 2005).

Essa energia é somente uma fração da energia de ignição total contida em uma faísca de ignição. No teste foi utilizado um módulo de ignição IC 100 (Figura 13) com capacidade de energia total de 50 kW



Figura 13- Módulo de Ignição IC 100

O sistema de ignição IC 100 é normalmente usado em motores na aplicação industrial estacionários que são diferentes dos sistemas de ignição veicular. A figura 14 abaixo mostra o esquema do sistema de ignição padrão.

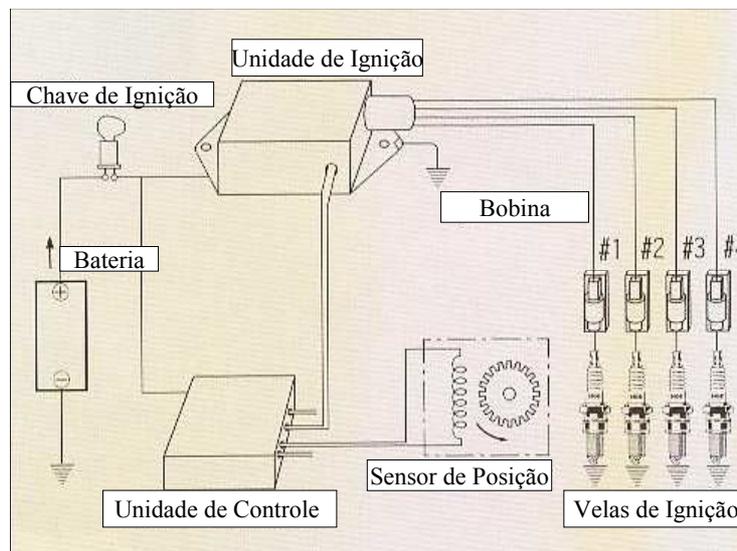


Figura 14-Sistema de Ignição

Para que a mistura de combustível + ar se queime no interior do cilindro do motor, produzindo assim a força mecânica que o movimenta, é preciso um ponto de

partida. Este ponto de partida é uma faísca que inflama a mistura, e que é produzida por uma série de dispositivos (Velas, ICM, Bobina) que formam o sistema de ignição.

A finalidade do sistema de ignição é gerar uma faísca nas velas, para que o combustível seja inflamado. Nós temos quatro tipos de ignição:

- Capacitiva simples, a vantagem é o baixo custo devido à simplicidade de fabricação, mas tem baixo tempo de ignição como consequência maior índice de emissões gasosas.
- Capacitiva multi faísca, duração da seqüência de faísca próxima a indutiva com maior energia dissipada, mas pouco utilizada devido à baixa durabilidade da vela.
- Indutiva, sua vantagem é o maior o tempo de ignição.
- Mista, sua vantagem é o controle do tempo de ignição. Pode-se controlar a potência da energia disponível na velas de ignição.

O sistema de ignição utilizado no motor M366G Ind. opera na configuração “Single Fire” com alta energia. É composto por um módulo de ignição (IC100), de um sensor de posição e dos cabos de energia. Opera em conjunto com as bobinas de ignição e velas de ignição. Seu princípio de funcionamento está baseado no sensor de posição que verifica, através de sete orifícios na engrenagem do comando de válvula, a velocidade do motor e a posição do comando de válvulas e o ponto morto superior (PMS), definindo a ordem de ignição através de um algoritmo, da curva de aceleração do motor e dos dados coletados pelo sensor de posição. O módulo de ignição responde de forma precisa à necessidade do motor.

4.2.1- Velas de Ignição:

Tem a função de transportar a corrente de alta tensão vindo da bobina, através dos cabos, para o interior dos cilindros.

A vela praticamente se divide em 4 partes básicas que são:

- Eletrodo central, eletrodo auxiliar, núcleo isolante (cerâmica) e corpo.

A vela deve possuir as seguintes características básicas:

- Resistir às solicitações mecânicas térmicas e elétricas
- Ter um alto coeficiente de isolamento elétrico.
- Possuir uma perfeita vedação, para resistir as pressões de combustão.

Grau Térmico:

É característica que possui a vela, de dissipar uma maior ou menor quantidade de calor.

Vela quente é aquela que possui uma baixa capacidade de dissipação de calor, trabalha em temperaturas altas, para queimar os depósitos de óleo e carvão formados na combustão.(PENIDO FILHO, 1983).

Vela fria é aquela que possui uma alta capacidade de dissipação de calor, e trabalha em baixa temperatura, evitando assim a pre-ignição, detonação e a queima dos seus eletrodos.

A vela utilizada no ensaio foi T-7018 - C com grau térmico 7(médio) desenvolvida especialmente para o motor veicular movido com GNV na DCBR, para durabilidade de 45.000 km (aproximadamente 900 horas em banco de provas). Foi utilizado o eletrodo central de uma liga de Irídio e Platina. Na versão industrial (Grupo Gerador) a expectativa de vida é de 1000 horas (Comprovados em testes na DCBR), Tem abertura de eletrodo central de 0.7 mm para o motor industrial e no motor veicular a abertura do eletrodo é de 0,4 mm (MURARO W, 2004).

Bobina:

É um componente do sistema de ignição responsável por gerar a alta tensão necessária para a produção da faísca. As bobinas são classificadas em duas famílias, bobinas de ignição asfálticas e bobinas de ignição plásticas.

Vantagens da bobina plástica sobre a bobina asfáltica (cilíndricas tradicionais).

Maior tensão de ignição.

Maior disponibilidade de faísca por minuto.

Menor tamanho, ocupando menos espaço.

Menos peso.

Dispensa o uso de distribuidor.

Pode ser construída em diversas formas geométricas.



Figura 15-Bobina Plástica



Figura 16-Bobina Asfáltica

Detonação

O fenômeno de detonação depende muito das pressões e temperaturas atingidas no cilindro do motor. Testados num mesmo motor, os diferentes hidrocarbonetos apresentam comportamentos bem diferentes. A sua tendência a apresentar o fenômeno de detonação depende fundamentalmente do tamanho da cadeia de carbonos, pode-se dizer que quanto mais longa a cadeia, maior é a tendência do combustível a produzir este efeito a pressões mais baixas. Desde o começo, foi intensa a pesquisa de *aditivos* aos combustíveis que evitam este efeito. Logo após a Primeira Guerra Mundial foi descoberto o chumbo tetraetila, pela General Motors. Embora seu uso não é recomendado do ponto de vista ambiental. O etanol tem melhores condições antidetonantes que a gasolina. O metanol é ainda melhor, misturado à gasolina, melhora o desempenho desta. Como se observa, o metano, principal componente do gás natural, é um excelente combustível, de alta octanagem ou ótimo antidetonante. Na figura 17 temos exemplo do fenômeno da detonação.

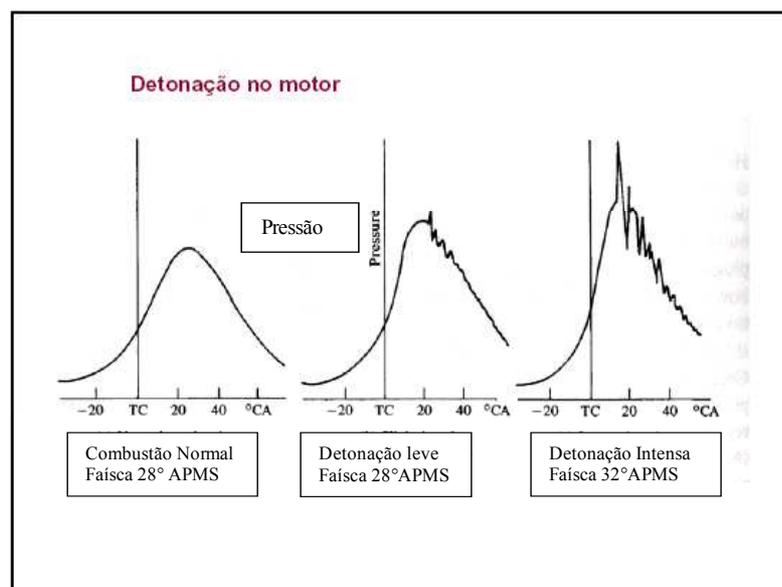


Figura 17-Detonação do Motor (TAYLOR, 1970).

Nos testes realizados no desenvolvimento do motor M 366 G industrial, pela DCBR, com o gás natural não ocorreu detonação com avanço 30° APMS, não foi possível verificar com quantos graus ocorreria à detonação, pois o sistema de ignição a IC100 não permite passar dos 30° APMS (Antes do Ponto Morto Superior).

Pressão de Combustão

Para a medição da pressão de combustão, foi utilizado sensor de pressão da Kistler, adaptado na vela de ignição e aferido na DCBR no range de 0 a 100 Bar. Figura 12

As velas ignição têm eletrodo central de platina e Irídio, para uma maior durabilidade, no sistema original a durabilidade é de 1000 horas com abertura de eletrodo de 0,7 mm, diferente do veicular que tem abertura de eletrodo de 0,4 mm e durabilidade de 45.000 km.



Figura 18- Vela de ignição instrumentada

Equipamentos de Controle do Motor: (Rotação; Misturador; Redutor e Estabilizador).

O controle de rotação foi efetuado com um controlador eletrônico da Fca Woodward LSC50, que estabiliza a rotação em 1800 min^{-1} , e a abertura da borboleta é definida em função da carga aplicada pelo dinamômetro no motor tudo efetuado eletronicamente.

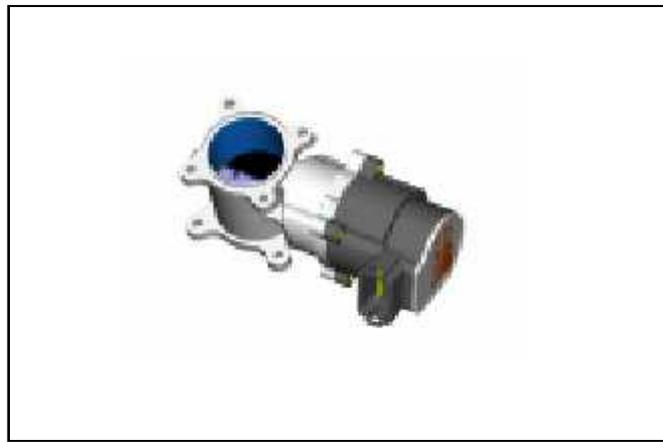


Figura 19 - Regulador de Rotação de Diâmetro 43 mm

Misturador de gás Diâmetro 36 mm, utilizado para combustível original GNV e também para o GP, equipamento que permite a entrada do gás no motor vindo do gaseificador, visto que a pressão do GP é baixa; isso reforça a idéia que é necessário utilizar um tubo compressor para puxar o GP e enviá-lo para o motor em uma pressão positiva.



Figura 20 - LSC50 Conjunto Misturador regulador de rotação

Todo o equipamento de controle e funcionamento do motor está mostrada na figura 21



Figura 21 - Conjunto equipamento para funcionamento do motor GNV

O conjunto é usado no sistema original do motor para funcionamento com gás natural.

Para o funcionamento com o gás do gaseificador (GP), foi colocado à mistura gás / ar direto no misturador, dispensando o redutor de pressão e estabilizador, visto que a mistura foi efetuada manualmente antes do misturador.

4.3 Ângulo da Sede de Válvula

Sede de válvula é a peça que serve de encaixe para a válvula quando está se fecha. Sua finalidade é de vedar e aumentar a durabilidade do sistema. O material usado é uma liga de aço especialmente desenvolvida para o motor M 366 G para uso com GNV, que tem uma combustão sem resíduo (“SECA”) para lubrificação, diferente do que acontece no motor do ciclo Diesel. Portanto o material é especial para a utilização com GNV. Foi efetuado estudo em CFD (LANGEANI, M, 1999), para verificar a influência do ângulo de sede de válvula na combustão do motor, aonde se chegou a conclusão que o melhor ângulo para a combustão é de 20°, Com essa alteração foi possível alterar o avanço de ignição de 35° para 27° APMS.

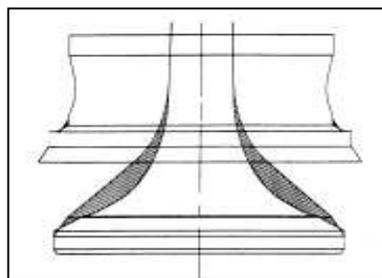


Figura 22- Desenho comparativo da válvula e sede de válvula de admissão com ângulo de 45 graus versus 20 graus.

Utilizou-se o novo cabeçote onde se reduziu o diâmetro da válvula de admissão e sede de admissão para 40 mm (era 42mm) e o ângulo de 45 graus para

20 graus onde obteve o aumento do Swirl.(LANGEANI, M, 1999). Foi alterado o comprimento da haste da válvula em 3mm e o assento da válvula com blindagem que permitiu o aumento da durabilidade dos componentes.

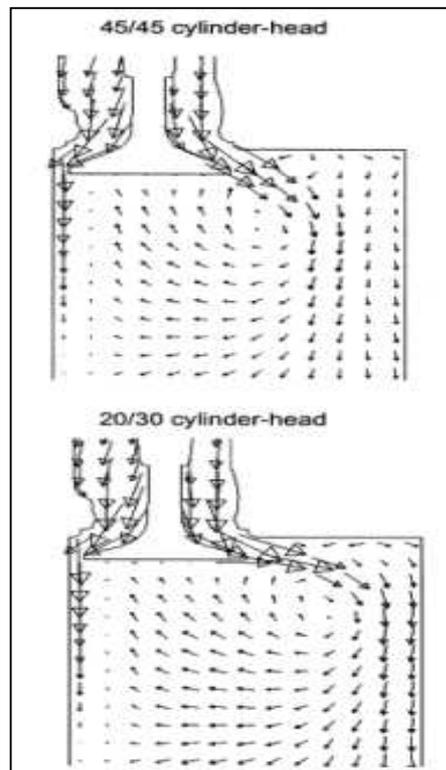


Figura 23-Comparativo de swiril (sede 45 x 20 graus)

4.4- Influência da Taxa de Compressão

Taxa de compressão: É a relação entre o volume total do cilindro e o volume da câmara de combustão.

A taxa de compressão é representada em forma da seguinte razão por unidade 6/1, 8/1, 20/1, etc.

Em outras palavras, (tomando como exemplo a taxa 6/1), quer dizer, que, a mistura aspirada é comprimida em 1/6 do seu volume. (PENIDO FILHO, PAULO, 1983).

A taxa de compressão pode ser calculada pelas equações:

(1)

$$\rho = V_u + v / v = V_1 / v$$

- ρ = taxa de compressão
- v = volume da câmara
- C = curso do pistão

(2)

$$V_u = \pi \times D^2 / 4 \times C$$

- V_u = cilindrada unitária
- D = Diâmetro do Cilindro

(3)

$$V_1 = V_u + v$$

- V_1 = Volume Total do Cilindro

(4)

$$V = V_u \times i$$

- V = Cilindrada do Motor
- i = Quantidade de Cilindros

A taxa do motor a gasolina normalmente esta entre 7 a 10, como mostrado na figura 24.

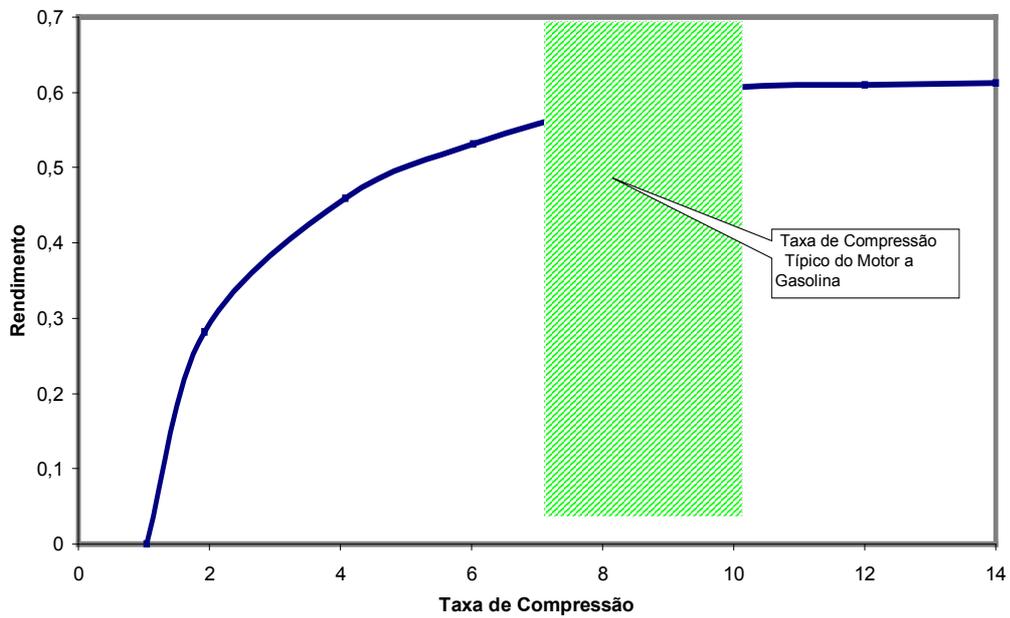


Figura 24 Taxa de compressão para motores do ciclo OTTO

Para o motor em estudo M366G a taxa está em 12 (pode ser 13, dependendo da composição do gás).

Para a definição da taxa de compressão do motor M 366 G foi utilizado o gás natural como combustível e também com biogás proveniente do vinhoto que tem o número de metano maior que o GNV, portanto o ponto de ignição para ocorrer à detonação é maior, aproximadamente 7 graus (Testes na DCBR).

A taxa dos motores Diesel é maior e está mostrada na figura 25

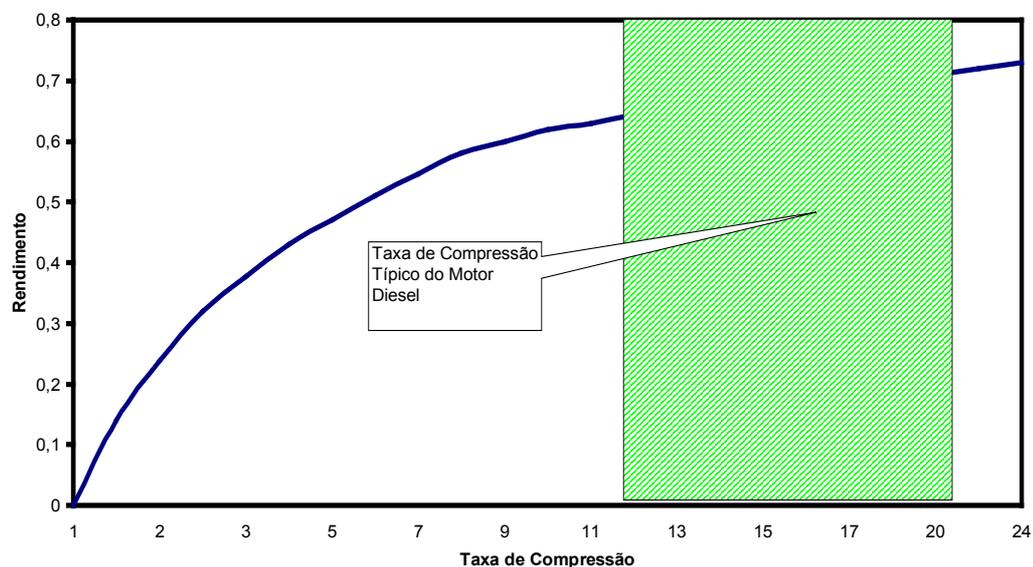


Figura 25- Taxa de compressão para motores do ciclo Diesel

A taxa do M366G foi definida experimentalmente na DCBR, com diferentes tipos de GNV, ou seja, com diferente número de metano. No início do projeto o número de metano mínimo era de 75 hoje com novas tecnologias de gerenciamento eletrônico podemos utilizar gás com no mínimo o número de metano 60 (gás sem passar pela UPGN (Unidade de Processamento do Gás Natural))

Para esse motor, na versão industrial com gás natural, foi definido em testes experimentais na DCBR o limite de detonação. O ponto ideal de trabalho é 19 °

APMS, e nos testes realizados chegamos até 30 ° APMS sem detonação. Não foi possível aumentar devido a restrições no módulo de ignição. (MURARO, 2004).

A tabela 03 Mostra os valores obtidos na DCBR, com o motor M 366G movido com GNV

Tabela 03 Dados Experimentais obtidos na DCBR.

RPM	Lambda	KW	P.max	Detonação
1800	0,97	65	56,76	Não
1500	0,98	56,7	56,8	Não

4.5-Equipamento e Metodologia

Foi utilizado um motor de 6 cilindros em linha com deslocamento volumétrico de 5.958 cm³, potência de 65 kW @ 1800 min¹ (60Hz) e potência de 55 kW @ 1500 min¹(50Hz). Os equipamentos de controle de rotação, ignição, redutor de gás, e estabilizador, foram especialmente desenvolvido para motores industriais movidos a GNV fornecido pela Fca Woodward.

Os experimentos realizados no laboratório da UNICAMP consistiram em operar este motor com gás de baixo poder calorífico, proveniente de um gaseificador de leito fluidizado, usando casca de arroz como matéria prima. O motor faz parte de um grupo gerador para produzir energia elétrica para comunidades localizadas no interior do país.

O motor foi montado em um rack juntamente com um dinamômetro (para frear o motor) e mostrar os valores de potência e torque. Não foi utilizado um gerador, pois não era possível descarregar a energia produzida, e não seria fácil obter o controle de variação de descarga de energia.

Os equipamentos utilizados para controle de rotação do motor e ignição, são os mesmos utilizados no motor M 366G industrial movido com gás natural.

Modificação foi efetuada na admissão do ar/combustível, pois havia a necessidade de se partir o motor com gás natural e depois alimentar o motor com

gás proveniente do gaseificador. Isso foi necessário, pois o controle do gás proveniente do gaseificador era manual. A instabilidade da pressão era muito grande em função da vazão solicitado pelo motor.

Na figura 26 está mostrando o esquema de montagem do motor industrial com seus equipamentos para operar com GNV.

Na figura 27 está mostrando o esquema de montagem do motor industrial com seus equipamentos para operar com gás pobre (GP) proveniente do gaseificador, na figura 28 mostra o motor M366G na bancada pronto para os testes.

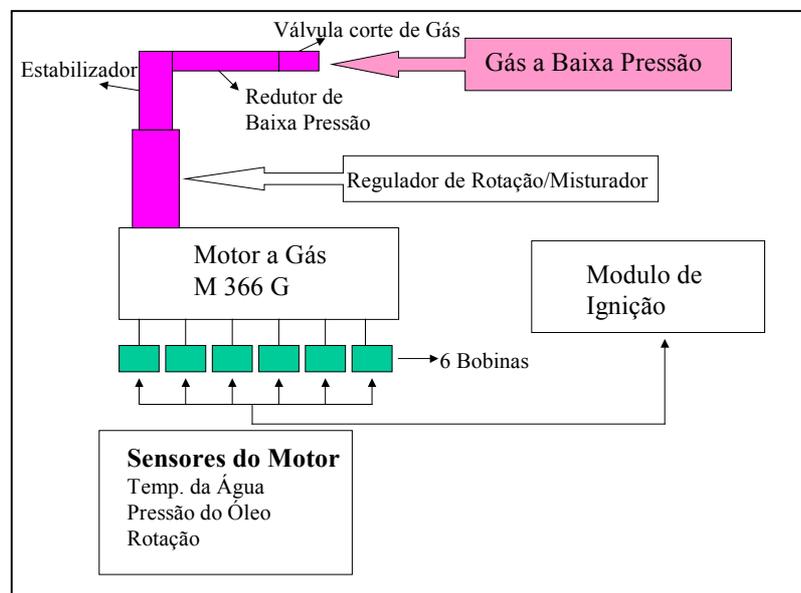


Figura 26 - Esquema do motor industrial operando com GNV

Para operar o motor com gás do gaseificador foi necessário alterar o sistema de admissão, utilizando o conjunto misturador / regulador de rotação, e não utilizando o estabilizador, redutor de pressão e válvula de corte. A partida do motor era feita com o gás natural até a estabilização do motor a 1800 min^{-1} e aos poucos liberava o gás pobre até estabilizar a rotação, em seguida alterava o ponto de ignição para obter a maior potência.

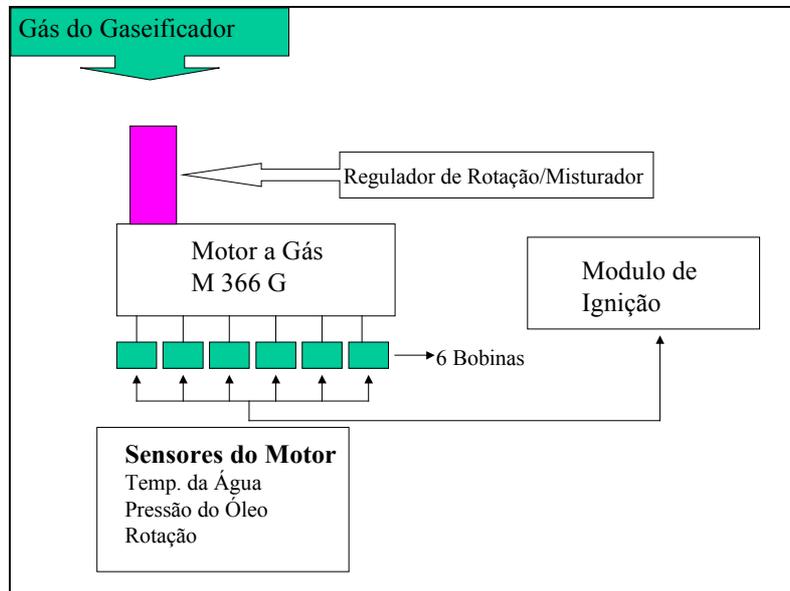


Figura 27 - Esquema do motor industrial para operar com GP



Figura 28- Montagem do motor na bancada

4.5.1-Ficha Técnica do Motor M 366 G:

Número de cilindros / disposição	6 em linha / vertical
Diâmetro do cilindro / curso	97,5 mm / 133 mm
Ordem de ignição	1-5-3-6-2-4
Cilindrada	5.958 cm ³
Relação de compressão	12,0 : 1
Potência máxima com GNV	Ventilador soprante 65kW @ 1800 min ⁻¹
Potência máxima com GP	Ventilador soprante 40,7 kW @ 1800 min ⁻¹
Consumo de combustível com GNV	16 kg/h @ 1800 min ⁻¹ / 243 g/kWh
Sistema de ignição de alta energia	IC 100
Conjunto misturador / borboleta(eletrônico)	Fabrica Woodwad

5- Resultados

5.1-Ensaio com Gás Pobre

O conjunto motor M366G e dinamômetro foram montados em uma bancada, colocado próximo ao gaseificador, com objetivo de diminuir a perda de carga do gás vindo do gaseificador.

O gás proveniente do gaseificador passou por um sistema de filtragem de três etapas, sendo primeiro um ciclone, a segunda um sistema de lavagem, e a terceira por um sistema de filtragem com bagaço de cana.

Desta maneira obteve redução na temperatura do gás que entra no motor (T_1) a uma temperatura de 30 a 45°C. A temperatura do gaseificador ficou em torno de 710°C.

A mistura do gás do gaseificador com o ar foi efetuada antes do misturador de GNV, manualmente, o qual foi utilizado para funcionar o motor com o combustível original, o gás natural.

Para ter um maior controle sobre a mistura e estabilização do motor, ficou mais fácil a operação quando se funcionava o motor com o combustível originalmente desenvolvido (GNV), assim se torna mais eficiente a transferência para o combustível vindo do gaseificador. Um dos problemas para o funcionamento inicial do motor era definir a mistura ideal, ou seja, a definição do lambda para a partida e estabilização do motor para depois começar a definir o ajuste do avanço do motor, ou seja, definir qual é o melhor avanço com a melhor carga (MBT).

Verificou-se que há dificuldade na partida do motor com o gás do gaseificador. Isso ocorre devido à perda de carga do sistema de admissão, juntamente com a dificuldade do ajuste do lambda e a oscilação da pressão do gás

do gaseificador. Para melhorar a partida inicial e a oscilação, devemos ter um controle melhor de lambda (sistema eletrônico). Pode ser utilizada uma “bomba” ou turbocompressor para puxar o gás do gaseificador e enviá-lo para o motor com pressão positiva. Com essa alternativa poderemos obter maior potência com gás pobre e facilitar a partida do motor.

Para obtenção dos dados, o motor foi instrumentado com os seguintes equipamentos e os pontos de medição:

- Instalada vela de ignição instrumentada para medir a pressão máxima de combustão (P_{max}), utilizando um osciloscópio para gravar e medir a curva de pressão máxima de combustão.
- Medida da temperatura dos gases de escapamento, no tubo de escapamento. (T_4)
- Depressão no coletor de admissão.
- Depressão no misturador (entrada do gás do gaseificador).
- Velocidade do ar de admissão.
- Restrição de admissão (mmH_2O).
- Lambda. (γ).
- Temperatura no misturador ($^{\circ}C$).
- Temperatura de admissão no coletor de admissão ($^{\circ}C$).
- Avanço do motor (graus do virabrequim).
- Potência (kW).
- Carga na balança do dinamômetro.
- Rotação do motor
- Controlador de rotação do motor da fábrica Woodward, para manter a rotação fixa de 1800 min^{-1} .
- Sistema de ignição de alta energia. (50 kW)

- Redutor de pressão para GNV
- Estabilizador de pressão para GNV

5.1.1-Resultados dos Testes.

A tabela 04 mostra o resumo dos resultados obtidos durante o ensaio; somente com o gás pobre. A partida e estabilização do motor foram efetuadas com o GNV.

Pontos de Medição	2	3	4	5	6	7
Rotação (Tacómetro) (min ⁻¹)	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Carga na balança [Torque (ft-lbs)]	14,8	14,0	14,1	8,0	8,0	8,0
Potência (kW)	22,3	22,3	21,1	12,1	12,1	12,1
Avanço do motor (Graus)	19	24	29	19	24	29
Temperatura da admissão (°C)	28	30	29	29	24	24
Temperatura no difusor (°C)	29	29	30	32	33	34
Temp.do gás de escap.(T4)(°C)	623	610	601	631	604	582
Vácuo no misturador (Pol/Hg)	8	12	13	14	15	15
Velocidade do ar admissão (m/s)	13,10	13,00	12,20	11,40	11,00	10,70
Restrição de admissão	165	178	75	70	60	50
Restrição de Admissão x 2 (mmH20)	330	356	150	140	120	100
Lambda	1,13	1,03	1,03	0,98	1,01	0,93
Pressão Máx.de Combustão (Bar)	16	16	20	16	16	18
Pontos de Medição	9	11	13	14	16	17
Rotação (Tacómetro) (min ⁻¹)	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Carga na balança [Torque (ft-lbs)]	19,8	18,0	18,0	18,0	20,0	27,0
Potência (kW)	29,9	27,1	27,1	27,1	30,2	40,7
Avanço do motor (Graus)	24	19	24	30	30	30
Temperatura da admissão (°C)	30	27	27	28	27	27
Temperatura no difusor (°C)	37	27	29	29	27	30
Temp.do gás de escap.(T4)(°C)	650	630	600	577	522	596
Vácuo no misturador (Pol/Hg)	13	15	9	7	10	6
Velocidade do ar admissão (m/s)	10,90	11,30	11,30	11,35	13,00	13,10
Restrição de admissão	165	150	165	208	135	197
Restrição de Admissão x 2 (mmH20)	330	300	330	416	270	394
Lambda	1,02	1,01	1,14	1,27	1,09	1,12
Pressão Máx.de Combustão (Bar)	20	20	20	30	20	40

Tabela 04 Resultados dos testes com gás pobre. Nota: Não foi possível levantar uma curva continua, por isso nos valores diferentes e muitas vezes parece

ser incoerrentes. Cada leitura feita era uma condição em que o motor estava estabilizado.

Biomassa utilizada é a Casca de Arroz, e teve a umidade equilibrada com o meio ambiente.

As condições de trabalho do gaseificador foram:

- Fator de ar - 0,4
- Velocidade de fluidização - 0,7 m/s
- Alimentação da biomassa - 67 kg/h
- Temperatura do leito - 710 °C
- Pressão no manômetro do leito - 300 mmH₂O

5.1.2-Composição do Gás Pobre.

A tabela 05 mostra composição do gás que foi produzido pelo gaseificador a partir da biomassa casca de arroz. A análise foi efetuada pelo método de cromatografia no laboratório da UNICAMP, bem como o cálculo do poder calorífico.

Tabela 05- Composição molar do gás obtido do gaseificador (gás pobre)

Elemento Químico	% molar
H ₂	3,85
O ₂	0,16
N ₂	57,36
CH ₄	3,81
CO	19,55
CO ₂	15,27

A tabela 06 mostra o valor obtido de PCI do gás proveniente do gaseificador e compará-lo com os valores típicos do GNV e do Diesel.

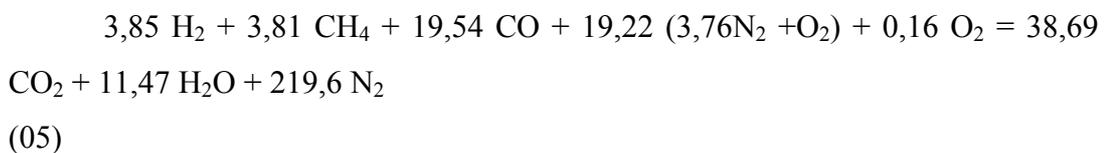
Tabela 06 - Comparação do PCI obtido do gás do gaseificador e dos valores típicos de GNV e Diesel

Combustível	PCI
Gás pobre	4,24 MJ/Nm ³
GNV	36,37 MJ/m ³
Diesel	35,95. 10 ³ MJ/m ³

5.2 Equações Estequiométricas da Combustão do Gás Pobre

Os gases pobres, formados basicamente por monóxido de carbono (CO), apesar de possuir baixo PCI apresentam bom rendimento volumétrico no motor, [Rendimento Volumétrico: É a razão entre o peso de ar aspirado pelo motor no curso de aspiração de um cilindro e o peso de ar que, nas condições de pressão e temperatura do ambiente, seria necessário para ocupar o mesmo volume (OBERT, 1971)], uma vez que necessita poucas quantidades de ar para a combustão conforme mostra a equação 05 abaixo.

Equação de combustão do Gás Pobre (GP).



A relação de massa de ar / massa de combustível (GP) é de **1,03: 1**, sendo para o gás natural de **16,3:1**.

5.3- Análise dos resultados:

Foram realizados 18 ensaios válidos, dos quais 5 com gás natural. Esta metodologia foi necessária para fazer a transferência para o gás do gaseificador. Isso foi observado após muitos ensaios não válidos. Todos os ensaios foram efetuados na rotação de 1800 min^{-1} , ideal para operação como grupo gerador onde obtemos 60 HZ.

Verificamos que quanto mais se avança o ponto de ignição do motor há uma redução significativa na temperatura dos gases de escapamento (T_4) e aumento da potência do motor, no ponto 17 é a melhor condição encontrada com $N_e = 40,7 \text{ kW}$ e o avanço de 30 graus. Os valores estão mostrados na tabela 7.

Tabela 7-Comparativo de Potência x Avanço x Temperatura de Escapamento e Pressão máxima de combustão

Pontos de Medição	2	3	4	5	6	7
Rotação (Tacómetro) (min^{-1})	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Potência (kW)	22,3	22,3	21,1	12,1	12,1	12,1
Avanço do motor (Graus)	19	24	29	19	24	29
Temp. do gás de escap.(T_4)(°C)	623	610	601	631	604	582
Pressão Máx. de Combustão(Bar)	16	16	20	16	16	18

Pontos de Medição	9	11	13	14	16	17
Rotação (Tacómetro) (min^{-1})	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Potência (kW)	29,9	27,1	27,1	27,1	30,2	40,7
Avanço do motor (Graus)	24	19	24	30	30	30
Temp. do gás de escap.(T_4)(°C)	650	630	600	577	522	596
Pressão Máx. de Combustão(Bar)	20	20	20	30	20	40

A tendência do ponto de ignição mostra que o motor permitiria avançar um pouco mais, mas o sistema de ignição utilizado não permite passar de 30 graus antes do ponto morto superior (APMS).

Seria necessário um outro sistema de ignição e um controle melhor para regular a relação ar / combustível, em função da pressão do gás do gaseificador,

(pois é necessário ficar com a pressão estável para evitar oscilação ou variação do gás de entrada no misturador), eletrônico de preferência, pois nos ensaios foram feitos manualmente.

Na figura 29 temos o comparativo com os valores otimização do GP e GN, onde observamos a diferença na potência de 40,7 kW (GP) para 65 kW (GN) e o avanço do motor de 30 (GP) para 19(GN), nota-se que se aumentar o ponto de ignição do motor antes do ponto morto superior, com GP, poderíamos ter maior potência e menor temperatura de escapamento.

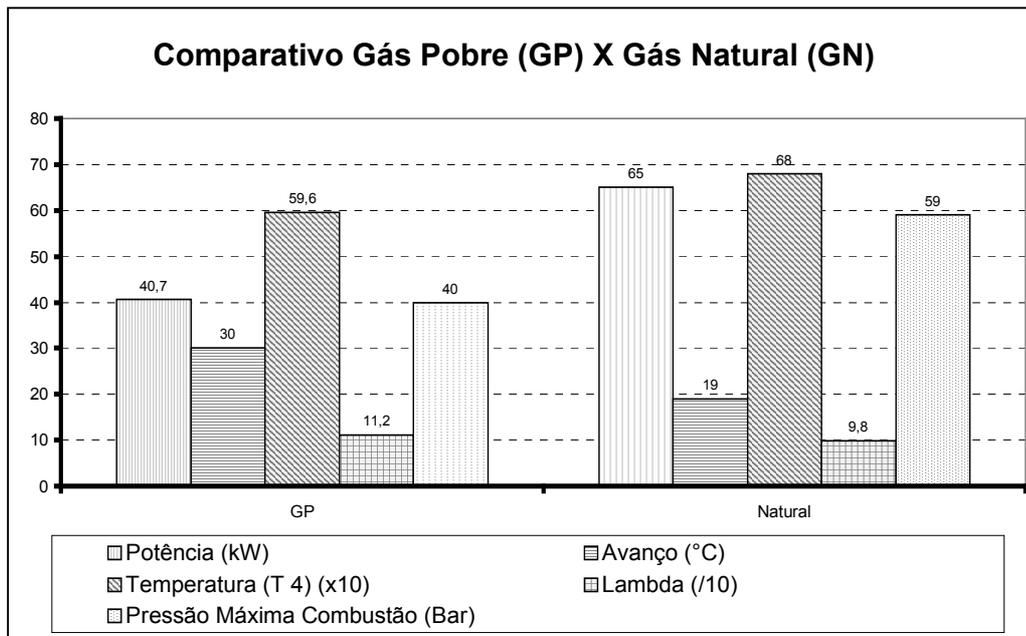
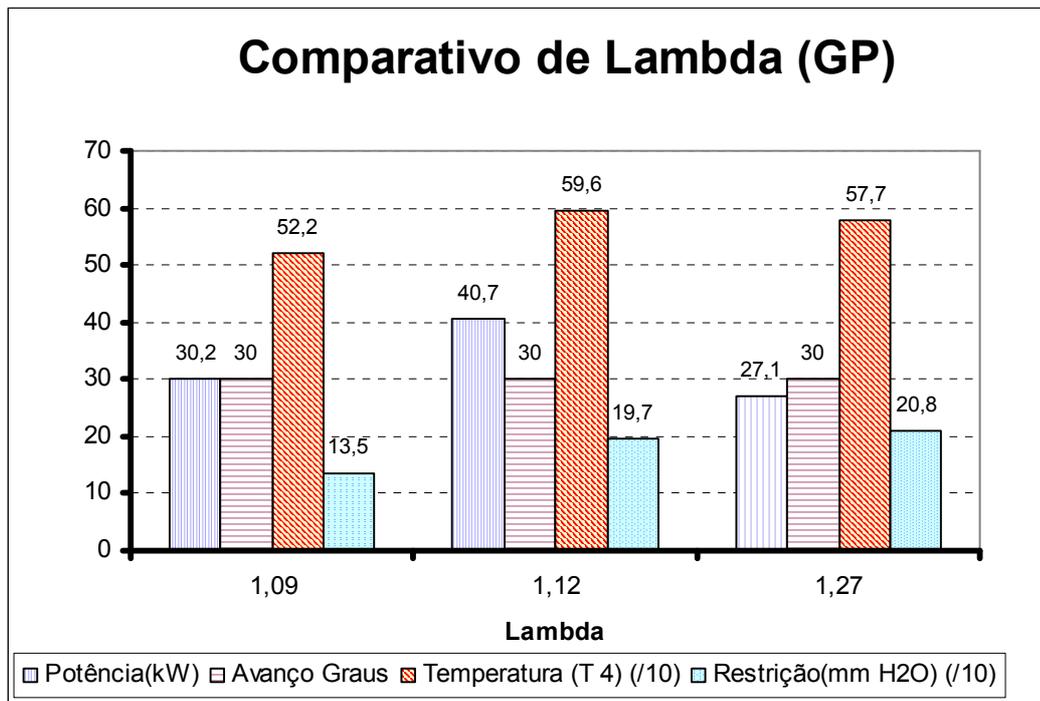


Figura 29- Comparativo GP x GN com valores otimizados

Nas figuras 30, 31 temos o comparativo dos valores otimização de lambda e dos valores otimização do avanço, somente com GP, onde também observamos a tendência de diminuir a temperatura de escapamento com o aumento do ponto de ignição. Quando nos comparamos o GP e GN com a mesma potência e o mesmo lambda temos a mesma tendência de diminuição da temperatura de escapamento. Figura 32, 33, 34.

Figura 30- Valores otimizados em função de Lambda (GP)



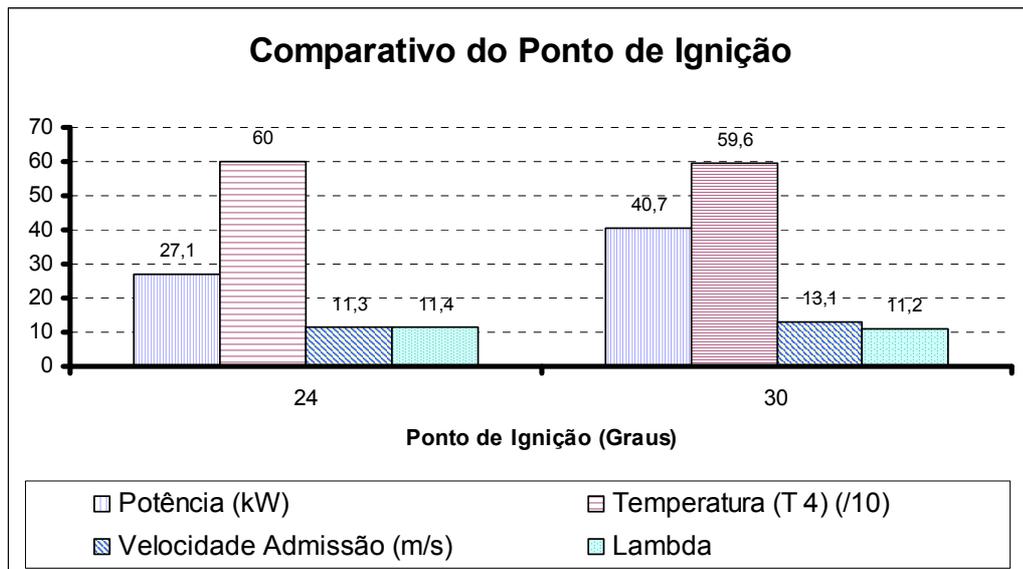


Figura 31- Valores comparativos otimizados em função do ponto de ignição (GP)

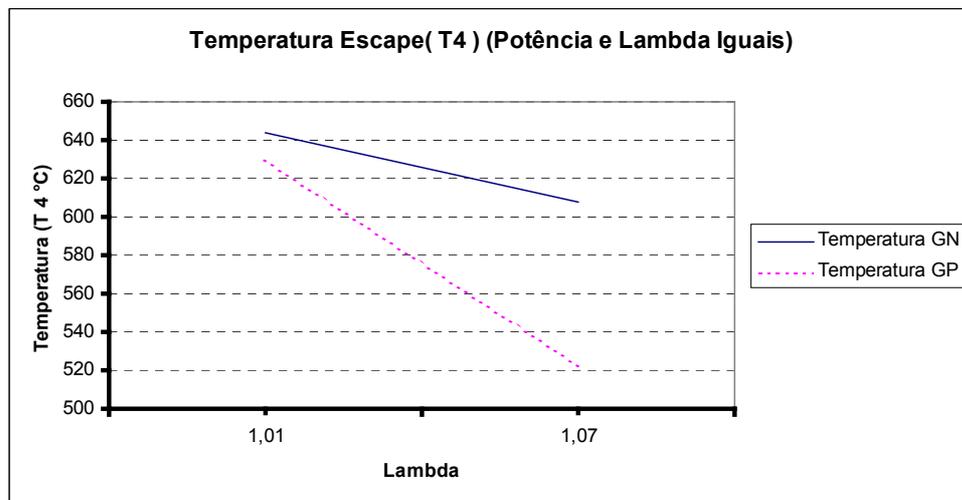


Figura 32- Temperatura de escapamento do GN e GP

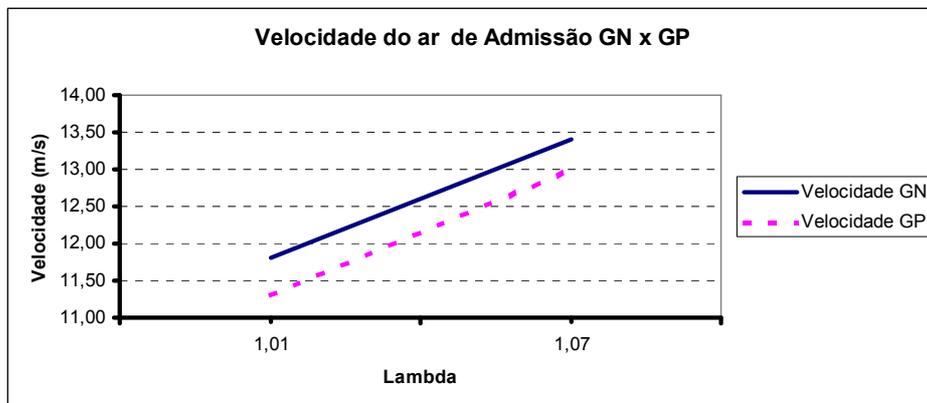


Figura 33- Velocidade do ar de admissão do GP e GN

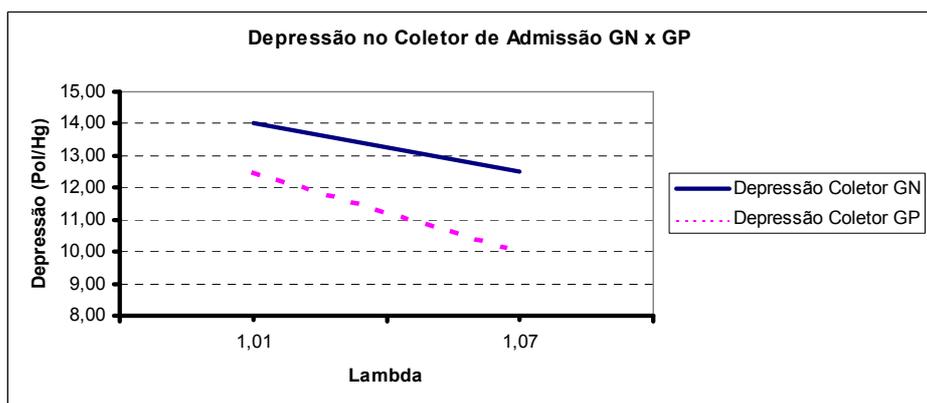


Figura 34- Depressão no coletor de Admissão do GN e GP

Verificou-se que a temperatura dos gases de escapamento tende a diminuir com o aumento do ponto de ignição, como mostrado no tabela 8.

Na tabela 09 vemos também a tendência de aumento de potência com o crescente avanço de ignição e redução de temperatura de escapamento (T_4)

Na tabela 10 mostra um pouco mais específico a influência do avanço na potência do motor.

Tabela 8 Comparativo de avanço de ignição e temperatura de escapamento

Pontos de Medição	2	3	4	5	6	7
Avanço do motor (Graus)	19	24	29	19	24	29
Temp.do gás de escap.(T4)(°C)	623	610	601	631	604	582

Pontos de Medição	9	11	13	14	16	17
Avanço do motor (Graus)	24	19	24	30	30	30
Temp.do gás de escap.(T4)(°C)	650	630	600	577	522	596

Tabela 09 Comparativo de potência, avanço, temperatura de escapamento, pressão máxima.

Pontos de Medição	2	3	4	5	6	7
Potência (kW)	22,3	22,3	21,1	12,1	12,1	12,1
Avanço do motor (Graus)	19	24	29	19	24	29
Temp.do gás de escap.(T4)(°C)	623	610	601	631	604	582

Pontos de Medição	9	11	13	14	16	17
Potência (kW)	29,9	27,1	27,1	27,1	30,2	40,7
Avanço do motor (Graus)	24	19	24	30	30	30
Temp.do gás de escap.(T4)(°C)	650	630	600	577	522	596

Tabela 10 Comparativo de potência, e avanço de ignição.

Pontos de Medição	2	3	4	5	6	7
Potência (kW)	22,3	22,3	21,1	12,1	12,1	12,1
Avanço do motor (Graus)	19	24	29	19	24	29

Pontos de Medição	9	11	13	14	16	17
Potência (kW)	29,9	27,1	27,1	27,1	30,2	40,7
Avanço do motor (Graus)	24	19	24	30	30	30

Na figura 35 mostra a curva de pressão máxima do motor com pressão máxima de 40 bar.

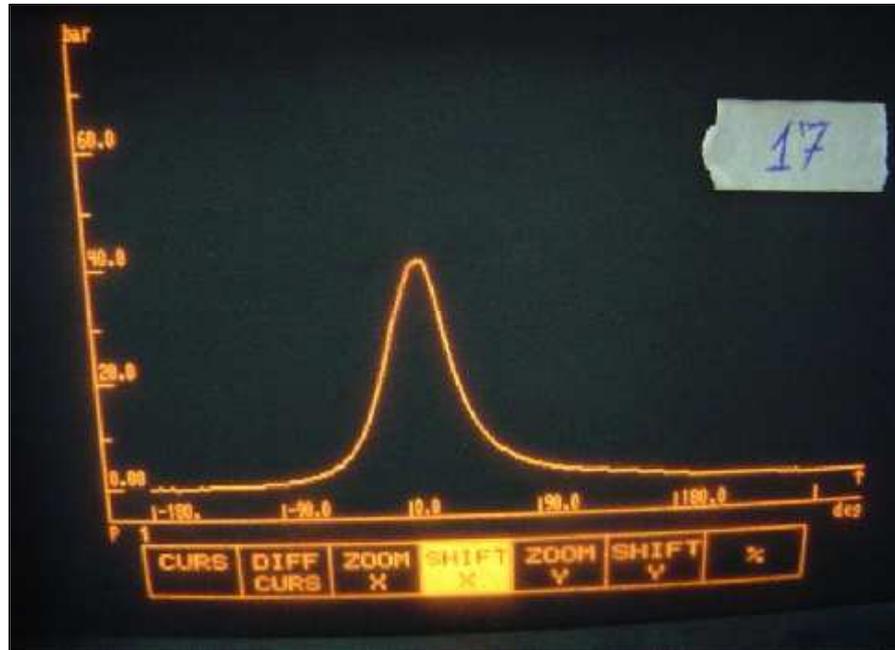


Figura 35 Curva de Pressão máxima a 1800min⁻¹

Em todos os ensaios realizados foram efetuadas as gravações da curva de pressão máxima do motor e foi observado que não apresentou detonação. O valor de 40 bar é baixo se compararmos com a combustão no motor com combustível original (GNV), de 80 bar. E o limite do motor é 115 bar no motor veicular a 2600 min⁻¹.

Para efetuar as medições foi utilizada uma vela de ignição instrumentada com sensor de pressão e osciloscópio. Com esse sistema também podemos verificar o limite de detonação. Nesse, caso não ocorreu até 30° APMS. Não foi possível aumentar o ponto de ignição do motor, além deste valor.

5.4-Análise dos Componentes.(Sistema de Admissão)

5.4.1 Admissão.

Após os testes o motor foi desmontado e foi observado uma grande quantidade de alcatrão que impregnou todo o sistema de admissão do motor, após 20 horas de funcionamento, como mostra as figuras 39.



Figura 36- Coletor de Admissão



Figura 37- Base do Regulador de rotação LCS 50

Verificou-se que a borboleta estava com dificuldade de abertura. Por esse motivo é que devemos funcionar o motor com o gás original o GNV quando da parada do motor ou reduzir a quantidade de alcatrão, que quando frio há o endurecimento do composto que pode danificar a peça.

5.4.2-Válvulas

Estavam todas impregnadas com alcatrão, mas não ocasionou nenhum problema no funcionamento ou na durabilidade das peças. Após o funcionamento com biomassa, devemos funcionar o motor com o combustível original, para não haver o engripamento das válvulas de admissão, isso ocorreu devido a não ter uma filtragem adequada do alcatrão, (figura 38, 39).



Figura 38- Válvulas de Admissão e Escapamento



Figura 39- Conjunto válvula de admissão e escapamento

Verifica-se que todas as válvulas de admissão estão com resíduos de alcatrão, isso não implica em uma durabilidade menor, pois a sede é de material especial para ter durabilidade com o combustível GNV.

A guia de válvula sofreu danos com o ataque do alcatrão isso ocorreu devido à filtragem não ter sido adequada (figura 40, 41).



Figura 40- Conjunto Cabeçote sem válvula de admissão

Nota-se o depósito de alcatrão nas proximidades do assentamento das válvulas de admissão

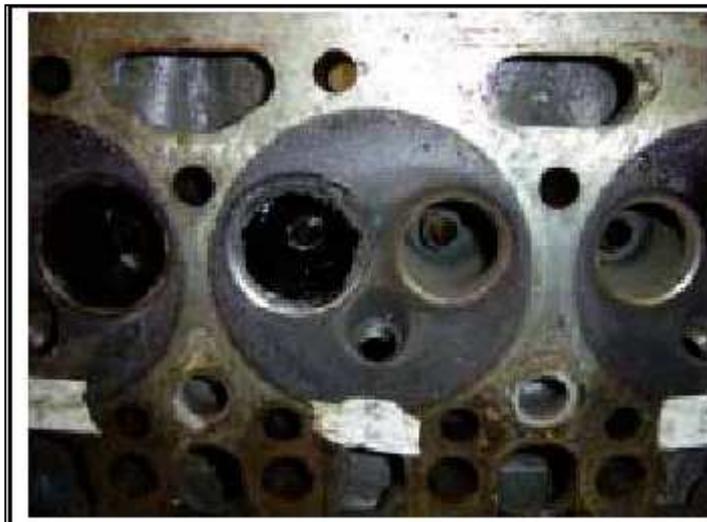


Figura 41- Conjunto Cabeçote sem válvulas

No pistão não houve depósito de material, e nota-se que a combustão estava dentro dos padrões especificados, não apresentando sinais de detonação, na camisa apresentou pequenos risco, isso mostra que o sistema de filtragem não estava adequado (figura 42).



Figura 42- Pistão (Câmara de combustão)

5.5 Velas de Ignição:

As velas ignição têm eletrodo central de platina e Irídio, é de material nobre para ter maior durabilidade. Isso foi necessário quando da utilização nos motores M 366 LA turbinado e interculado montados nos ônibus a gás da DCBR. Para o motor industrial movido a GNV utilizamos a mesma vela, para ter redução de custo, suportar sistema de ignição de alta energia e ter maior durabilidade que é de 1000 horas com gap de 0,7 mm, diferente do veicular que tem gap de 0,4 mm e durabilidade de 45.000 km Figura 43.



Figura 43-Velas de Ignição NGK tipo T - 7018 C

5.6-Óleo Lubrificante

O óleo utilizado foi Shell Rimula NX, desenvolvido especificamente para ser utilizado para o motor movido a gás. Foi enviada uma amostra para análise e os resultados mostraram que o lubrificante está em condições normais de uso, porém foi observado um valor elevado para o silício, que pode ter sua origem da palha de arroz que tem mais ou menos 20% de sílica, falha no sistema de admissão ou contaminação do gás no leito do gaseificador. Os resultados dos ensaios estão na tabela 11.

Tabela 11 - Resultado da análise do óleo lubrificante.

		Óleo com 20 horas	Óleo novo
Viscosidade cinemática a 40 °C, m m 2/s	98,74	100,1	
Viscosidade cinemática a 100 °C, m m 2/s	13,95	13,98	
Índice de viscosidade	143	142	
T B N 2896, mgkOH/g	7,93	7,83	
Teor de água, %v	Traços	isento	
Oxidação, cm/T	0,693		
Carbono pirolizado, %p.	0,14		
Fuligem (DIN 51452), %p.	0,0045	Max 3	
Fuligem, %T.	0,856		
Teor de Fósforo, %p.	0,112	0,116	
Teor de Zinco, %p.	0,123	0,127	
Teor de Cálcio, %p.	0,188	0,19	
Teor de Magnésio, %p.			
Metais de desgastes, ppm.			
Fe ppm	27	<40	
Si ppm	22	<10	
Al ppm	8	<10	
Cu ppm	7	<10	
Pb ppm	4	<10	
Mo ppm	1	<10	
Cr ppm	2	<10	
Ni ppm	0	<10	
B ppm	3	<10	
Ba ppm	1	<10	
Mg ppm	13	<20	
Na ppm	2	<10	
K ppm	5	<10	

Limites:
Dados característicos obtidos nos testes experimentais.

No desenvolvimento do óleo lubrificante Shell Rimula NX especial para o motor movido a gás natural, teve uma formulação específica para esse produto. Os resultados obtidos foram baseados em testes experimentais. A execução dos testes consiste primeiramente em dimensionar o motor e depois submetê-lo a durabilidade em banco de provas nas diversas rotações e solicitações de potência e torque num período de 500 a 1000 horas e a cada 50 horas é realizada análise do óleo no laboratório da DCBR.

Após a durabilidade o motor é desmontado e dimensionado novamente, e em função dos resultados obtidos a formulação do óleo é aprovada ou reprovada.

Normas utilizadas nas análises dos óleos lubrificantes:

Espectrometria (ASTM D 5185); Fuligem (DIN 51452); Índice de viscosidade (ASTM D 2270); Infravermelho (SAE 841373); T.A.N (ASTM D 664); T.B.N(ASTM D 4739); Viscosidade Cin. @ 100°C (ASTM D 445); Viscosidade Cin. @ 40°C (ASTM D 445); Karl Fischer (ASTM D 1744).

6-Conclusão

Os resultados obtidos mostram que o motor pode funcionar com gás proveniente do gaseificador, que utiliza a casca de arroz como Biomassa.

A durabilidade do motor M366G já foi comprovada com o combustível original e acreditamos que podemos transferir esta durabilidade para este experimento, desde que sejam eliminadas as incrustações (depósito de alcatrão) no sistema de admissão (válvulas de admissão, regulador de rotação e misturador) e a redução da sílica, que contaminou o óleo lubrificante (sendo 20% proveniente da casca de arroz).

Com o gás pobre obteve-se a Potência de 40,7 kW @1800 min⁻¹, lambda de 1,12 e avanço de ignição de 30° APMS em comparação com o gás natural onde a Potência é de 65 kW @ 1800 min⁻¹, lambda de 0,98 e avanço de ignição de 19° APMS. Os testes mostraram que com o aumento do avanço de ignição acima de 30° APMS poderíamos melhorar o desempenho do motor, isso seria possível com novo sistema de ignição onde poderíamos obter o ponto ideal de combustão.

6.1-Sugestões para Trabalhos Futuros

Para o futuro podemos fazer testes com o cabeçote com sede de válvula de admissão com ângulo de 20° válvulas de escapamento de 30° que possivelmente os resultados obtidos poderão ser melhorados.(Testes comprovados com o combustível GNV na DCBR).

Pode melhorar o sistema de partida do motor e diminuir a quantidade de alcatrão com sistema de filtragem adequada e a eliminação de sílica.

Para melhorar o controle da relação ar / combustível, pode-se desenvolver um sistema eletrônico de controle.

Para aumentar a eficiência do motor poderíamos utilizar um turbo compressor e radiador de ar, sendo que o turbo compressor puxaria o gás do gaseificador auxiliando na partida.

Desenvolver um sistema eletrônico de gerenciamento, com controle de lambda de malha fechada com sensor UEGO.

Para minimizar o problema de depósito de alcatrão no sistema de admissão pode-se tomar algumas ações:

- Melhorar o sistema de filtragem.
- Utilizar um catalisador.
- Utilizar o combustível original por algum tempo antes da parada do motor.

Referencias Bibliográficas.

ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., SÖDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, v.57 p.195-204. Elsevier, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (A.N.P), <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em Out 2003 e 2005.

ALDERUCCI, V. et al. Potential biomass resources of Sicily for electric-power generation. **Applied Energy**, v. 45, n.3, p. 219-240, 1993.

BABCOCK AND WILCOX STEAM, 40th ed., Cap. 16: Atmospheric Pressure Fluidized-Bed Boilers. 1992. In: BAIN, R.L., OVEREND, R.P. Biomass-Fired Power Generation. In: **Biomass Usage for Utility and Industrial Power**, Snowbird. April-May, 1996.

BALANÇO ENERGETICO NACIONAL (B.E.N), 2005.

BARRIGA ANGULO, M.B. **Experimentos de Gaseificação de Casca de Arroz em Leito Fluidizado**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002. 68p

BARTHELEMY, G. **Le retour des gazogenes**. Paris: Editions Alternatives, 1981. 110p.

BEHAINNE, J.J.C. **Diminuição de H₂S na gaseificação de carvão mineral mediante adição de dolomita em reator de leito fluidizado**. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1999.

BORGES, L.H., HOLLNAGEL, C, MURARO, W, “Development of a Mercedes-Benz Natural Gas Engine M366 LAG , with a Lean Burn Combustion System “, SAE technical Paper Series , 962378, 1996

BRASIL, **Constituição da República Federativa do Brasil**. Presidência da República, Casa Civil. Brasília, 1998.

BRIDGEWATER, A.V. ET AL. The nature and control of solid, liquid and gaseous emissions from the thermochemical processing of biomass. **Biomass and Bioenergy**, v.9, n.1-5, p.325-341, 1995.

BROWN, M., WALKER, N. THE CDM, carbon credits and decentralized energy. **COSPP – Cogeneration & On-Site Power Production**, v.4, n.4, p.71-79, Jul-Aug 2003.

BRUNETTI, F. (1988). Curso de Mecânica dos Fluidos. São Paulo. Faculdade de Engenharia Industrial.

CAMARGO, C. A. (1990). Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool. Manual de Recomendações. São Paulo. IPT.

CARLOS HOLLNAGEL, “Natural Gas Engine Mercedes Benz M447hG with Exhaust Emission Lower than 50% EURO II”, SAE technical Paper Series, 952289

CAVALCANTI, C. Desenvolvimento e Respeito à Natureza: uma Introdução Termodinâmica à Economia da Sustentabilidade. In: FERREIRA, L.C., VIOLA, E. (orgs.) **Incertezas de Sustentabilidade na Globalização**. Campinas: Editora da Unicamp, 1996. Cap. XII, p.319-331.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. (1998) Thermodynamics An Engineering Approach. USA. Mc Graw Hill.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA DE BIOMASSA. (2000). Medidas Mitigadoras Para A Redução De Emissões De Gases De Efeito Estufa Na Geração Termoelétrica. São Paulo. Dupligráfica Editora.

CERTO, S.C.; PETER, J.P. **Administração Estratégica: Planejamento e Implantação da Estratégia**. São Paulo: Makron Books. 1993.

CHASE MANHATTAN. (1999). Industry Report Natural Gas. Brasil. Equity Research.

COELHO, S. T. (1992). Avaliação da Cogeração de Eletricidade a Partir de Bagaço de Cana em Sistemas de Gaseificador/Turbina à Gás. São Paulo. USP.

COELHO, S. T. (1999). Mecanismos Para Implementação da Cogeração de Eletricidade a Partir de Biomassa. Um Modelo Para o Estado de São Paulo. São Paulo. USP.

CRAIG, K.R., MANN, M.K. Cost and Performance Analysis of Three Integrated Biomass Gasification Combined Cycle Power Systems **U.S.Department of Energy**, August, 1996. Disponível na Internet. <http://www.eren.doe.gov/biopower/technical.html> em 02/jun./1998.

E. NATARAJAN, A. NORDIN AND A.N.RAO, Overview of Combustion and Gasification of Rice Husk in Fluidized Bed Reactors (Pergamon) Biomass and Bioenergy Vol. 14, 1998

EDWARD F. OBERT, (1971). Motores de Combustão Interna

ELETOBRÁS. (1995). Relatórios de Estudos – Suprimento de Energia Elétrica na Amazônia Legal. Brasília. Ministério de Minas e Energia.

ELETOBRÁS.(1999). Plano Decenal de Expansão 1999/2008. Rio de Janeiro. Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos.

ERGÜDENLER, A. ET AL. Mathematical modeling of a fluidized bed straw gasifier: part 1-model development. **Energy Sources**, n.19, p.1065-1084, 1997a.

ERGÜDENLER, A. ET AL. Mathematical modeling of a fluidized bed straw gasifier: part 2-model sensitivity. **Energy Sources**, n.19, p.1085-1098, 1997b.

ERGÜDENLER, A. ET AL. Mathematical modeling of a fluidized bed straw gasifier: part 3-model verification. **Energy Sources**, n.19, p.1099-1121, 1997c.

ESPERANZA, E., ALEMAN, Y., ARAUZO, J., GEA, G. Fluidized Bed Gasification of Sugar Cane Bagasse. Influence on Gas Composition. **Proceedings of the 2nd Olle Lindström Symposium on Renewable Energy - Bionergy**. Stockholm: Royal Institute of Technology. p.128-133, Jun.1999.

ESPÍRITO SANTO, D.B. **Metodologias de Avaliação de Sistemas Térmicos de Geração de Eletricidade**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 2001.

FERNANDES, M.C. **Análise Tecno-econômica da Gaseificação da Biomassa para Eletrificação Rural**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 2000.

FERNANDES, M.C., SÁNCHEZ, C.G. Economic Viability of a Biomass Gasification Power Plant for Rural Electrification. In: **CleanAir V - fifth international conference on technologies and combustion for a clean environment**, Lisboa. July, 1999.

FERNANDES, M.C., SÁNCHEZ, C.G. Planejamento Estratégico para Implementação da Gaseificação de Biomassa no Meio Rural. In: **AGRENER 2002 - 4º Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas. Outubro, 2002.

FERREIRA, L.C., VIOLA, E. (orgs.) **Incertezas de Sustentabilidade na Globalização**. Campinas: Editora da Unicamp, 1996. 331p.

FOSSUM, M., SVENDSGAARD, O.B., BARRIO, M., HUSTAD, J.E. Emissions and Operational Experiences from a Gas Engine fired with Low Calorific Value Gas and Methane. In: **CleanAir VI - sixth international conference on technologies and combustion for a clean environment**. O Porto. July, 2001.

FRANGOPOULOS, C.A., CARALIS, Y.C. A method for taking into account environmental impacts in the economic evaluation of energy systems. **Energy Conversion and Management**, v.38,n. 15-17, p.1751-1753, 1997.

FUKUTANI, I. AND WATANABE, E., “Air Flow through Poppet Inlet Valves - Analysis of Static and Dynamic Flow Coefficients”, SAE paper No. 820154, 1982

GALLO, W.L.R. ET WALTER, A.C.S. **Máquinas Térmicas**, Apostila do Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1986.

GIACOSA, D. (1980). Motores Endotermicos. Madrid. Dossat.

GIL BARNO, J. **Gasificación de biomasa en lecho fluidizado burbujeante: estudio a escala de pequeña planta piloto de algunos parámetros que mejoran la calidad de la gasificación.** Tese de doutorado. Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza. Zaragoza, 1998.

GOSMAN, A. D. AND AHMED, A. M. Y., “Measurement and Multidimensional Prediction of Flow in a Axisymmetric Port/Valve Assembly”, SAE paper No. 870592, 1987

GUPTA, C.K., SATHIYAMOORTHY, D. **Fluid Bed Technology in Materials Processing.** Boca Raton: CRC Press, 1999. 431p.

HALL, D.O., ROSILLO-CALLE, F., WILLIAMS, R.H., WOODS, J. Biomass for Energy: supply prospects. In: JOHANSSON, T.B. et al. **Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity.** London: Earthscan, 1993. Cap.14, p. 593-651

HANS-JOSEF SCHIFFGENS, PATRICK HUPPERICH AND HANS-JÜRGEN SCHOLLMAYER, “The influence of methane number on the combustion in SI gas engines, MTZ Motortechnische Zeitschrift 54 (1993)

HBS – HAVARD BUSINESS SCHOOL; **Havard Business Review.** Havard: Havard Business School Publishing Corp. 2004.

HEMPEL, L.C. Conceptual and Analytical Challenges in Building Sustainable Communities. In: MAZMANIAN, D.A., KRAFT, M.E. **Toward Sustainable Communities – Transition and Transformation in Environmental Policy.** Cambridge: The MIT Press, 1999. Cap.2, p. 43-74.

HESS, P., ROSS, C. **Economic Development - theories, evidence, and policies.** Fort Worth: The Dryden Press, 1997. 659p.

HEYWOOD, J. B., “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill Book Company, 1988

HORLOCK, J.H. Combined power plants - past, present, and future. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME**, v.117, n.4, p.608-616, Oct.1995

<http://www.anfavea.org.br>;

<http://www.cetesb.br>;

<http://www.dieselnet.com>;

<http://www.gaspetro.com.br>;

<http://www.mme.gov.br/luzcampo/programa>;

<http://www.petrobras.com.br>;

<http://www.saebr.gov.br>;

<http://www.sptrans.com>;

[http://www.órbita.starmedia.com/mundo geográfico](http://www.órbita.starmedia.com/mundo_geográfico);

<http://www.conama.gov.br>;

<http://www.cve.saude.sp.gov.br>;

<http://www.daimlerchrysler.com>;

<http://www.gasbrasil.com.br>;

<http://www.ibama.gov.br>;

<http://www.mma.gov.br>;

<http://www.mme.gov.br/gas/nota1.htm>;

<http://www.saudetotal.com/publico/poluicao>;

<http://www.saudetotal.com/saude>;

HUGUES, J. Wood-fuelled cogeneration – technologies and trends worldwide. **Cogeneration and On-Site Power Production**, v.4, n.4, p.61-70, Jul.-Aug.2003

HURLEY, J. Energy for Rural Development. In: Auer, P. (ed.) **Energy and the Developing Nations - Proceedings of an Electric Power Research Institute Workshop**, at Hoover Institution, Stanford University. New York: Pergamon Press, March 18-20, 1980. Cap. 13, p. 173-178.

I.E.A - AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. (IBP), <http://www.ibp.org.br>>. Acesso em Out 2004.

ISRAEL KLABIN, Roundtable: Successes with Bioenergy. The Brazilian Experience, 2005 World Congress St Louis, Missouri USA

JANSEN, J.P., KOPPEJAN, J., MEULMAN, P.D.M. Perspectives for Reduction of NO_x and Dust Emissions in Small-scale Energy Production from Clean Wood. In: **12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection**, Amsterdam, The Netherlands. 17-21 June, 2002.

JOHANSSON, B., NEIJ, H., ALDÉN, M. AND JUHLIN, G., “Investigations of the Influence of Mixture Preparation on Cyclic variations in a SI-Engine, Using Laser Induced Fluorescence”, SAE paper No. 950108, 1995

JOHANSSON, B., NEIJ, H., ALDÉN, M. AND JUHLIN, G., “Investigations of the Influence of Mixture Preparation on Cyclic variations in a SI-Engine, Using Laser Induced Fluorescence”, SAE paper No. 950108, 1995

JOHANSSON, T.B., KELLY, H., REDDY, A.K.N., WILLIAMS, R.H. (ed.) **Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity**. London: Earthscan, 1993.

K J S MENDES, N. LADOMMATOS, M DARAGHEH, A Lean Burn Low Emissions Gas Engine. Department of Manufacturing and Engineering Systes, Brunel University, Uxbridge, UK, 1990

KAPLAN, S. **Energy Economics - quantitative methods for energy and environmental decisions**. New York: McGraw-Hill, 1983. 352p.

KEHLHOFER, R. **Combined-cycle Gas & Steam Turbine Power Plants**. Lilburn, EUA: The Fairmont Press, 1991. 388p.

KINOSHITA, C.M. ET AL. Power generation potential of biomass gasification systems. **Journal of Energy Engineering**, v. 123, n. 3, p. 88-99, Dec. 1997

KOSOW, I.L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 3^a ed. Porto Alegre: Ed. Globo, 1979, 632p.

LANGANI, M., Cylinder flow analysis of the Mercedes-Benz do Brasil lean burn CNG M366LAG engine, paper 973114, 1999

LASTRES, L. F. M., Desenvolvimento de sistema de conversão para utilização de gás natural em motores Diesel superalimentados, PETROBRAS/CENPES, March 1988.

LASTRES, L. F. M., Desenvolvimento de sistema eletrônico de conversão de motores Mercedes-Benz OM 366 para uso de gás natural, PETROBRAS/CENPES, June 1991.

LEVIN, L.I. ET AL. Large coal-fired district power station using combined-cycle technology. **Thermal Engineering** (English translation of Teploenergetika) v. 42, n. 11, p. 906-918, Nov. 1995.

LOYE, A.O. AND BRACCO, F.V, "Two-Dimensional Visualization of Premixed-Charge Flame Structure in an IC Engine", SAE paper No 870454, 1987

M. FANG, L YANG, G. CHEN, Z. LUO, K. CEN, Experimental Study on Rice Husk Combustion in a Circulating Fluidized Bed (Elsevier) Fuel Processing Technology 85, 2004

MANN, M.K., SPATH, P.L., CRAIG, K.R. Economic and life cycle assessment of an integrated biomass gasification combined cycle system. In: 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC 96, 1996, Washington, DC. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1996. v. 3, p. 2134-2139.

MARCELO CÔRTEZ, FERNANDES, Tese de doutorado, Avaliação Tecnológica da Viabilidade da Gaseificação do Capim-elefante para Eletrificação Rural, 2000.

MAZMANIAN, D.A., KRAFT, M.E. **Toward Sustainable Communities – Transition and Transformation in Environmental Policy**. Cambridge: The MIT Press, 1999. 323p.

MORAN, M.J., SHAPIRO, H.N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002. 681p.

MUKUNDA, H.S., DASAPPA, S., SHRINIVASA, U. Open-top Wood Gasifiers. In: JOHANSSON, T.B., et al. **Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity**. London: Earthscan, 1993. Cap.16, p.699-727.

MURARO W, Atendimento à Limites de Emissões em Ciclos Não Estacionários com motor Pesado á GMV.SAE -2000-01-3181

MURARO, W et al, Avaliação Do Funcionamento Motor Com Gás De Baixo Poder Calorífico Proveniente De Biomassa (Casca De Arroz) Produzido Por Um Gaseificador, 05 Sfl-012 (IBP), 2005.

MURARO, W, SHIRAIWA, N.M, Motor M 366 G Movido a gás metano Veicular versão Industrial, Aplicação Grupo Gerador, 2004 (IBP).

NAJJAR, Y. S.H.; AKYURT, M. (1994). Combined Cycles With Gas Turbine Engines. Great Britain. Heat Recovery Systems & CHP, Vol 14, nº 2.

NAS – NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES: PANEL ON RENEWABLE ENERGY RESOURCES, HUGHES, W.L., ENGEL, J. *ET AL.* **Energy for Rural Development- Renewable Resources and Alternative Technologies for Developing Countries**. Washington, D.C.: National Academy of Science, 1977. 318p.

NEIVA, A.C.B. **Estudo de alimentadores de Bagaço de Cana para Reatores Atmosféricos**, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1998.

NYGARD, N. Le gazogène pour les véhicules. In: BARTHELEMY, G. **Le retour des gazogenes**. Paris: Editions Alternatives, 1981. P.65-70.

PENIDO FILHO, P., O álcool combustível: obtenção e aplicação nos motores, Ed. Nobel, 1981.

PENIDO FILHO, P., Os motores à combustão interna, Lemi, 1983.

PULKRABEK, W.W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 411p. 1997.

SÁNCHEZ, C.G. **Estudo da volatilização e da gaseificação de biomassa em leito fluidizado**, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1994.

SANTOS, E. M. (1999). Opções de Penetração do Gás Natural no Mercado Energético Brasileiro. São Paulo. Instituto de Eletrotécnica e Energia. USP.

SANTOS, E. M., Uso do gás natural como combustível em veículos de transporte coletivo urbano-Estágio Atual, Perspectivas e Dificuldades, March 2003.

SHEPHERD, A. **Sustainable Rural Development**. London: Macmillan Press, 1998. 294p.

SILVA e RUGGERO, 2003 mht: Efeitos da Utilização da Energia de Biomassa sobre o meio Ambiente. (Marcelo J. Moreira da Silva e Paulo Andre Ruggero).

SILVA, E. B. (1997). Infra Estrutura de Longo Alcance para o Desenvolvimento Sustentado. Santa Catarina. FIESC.

STEINWALL, P.H. Integration of biomass gasification and evaporative gas turbine cycles. **Energy Conversion and Management**, v.38, n.15-17, p.1665-1670, Oct-Nov 1997

STEVEN R. KING , “The impact of natural gas composition on fuel metering and engine operational characteristics “, SAE technical Paper Series, 920593

T. KAPUR, T. C. KANDPAL AND H. P. GARG, Electricity Gneration From Rice Husk in Indian Rice Mills: Potential and Financial Viabilty. Center for Energy Studies, Indian Institute of Technology, 1995 (Pergamon)

TAYLOR, C. F., The internal combustion engine in theory and practice, 1960 e 1966 da MIT.

TILLMAN, D.A. **The Combustion of Solid Fuels and Wastes**. San Diego: Academic Press, Inc., 1991. 378p.

VAN WYLEN G. J.; SONNTAG R. E. (1976). Fundamentos da Termodinâmica Clássica. Trad. De Eitaro Yamane e Remi Benedito Silva. São Paulo. Edgard Blücher.

VERTIOLA, S. R.; OLIVEIRA JR., S. (1996). Thermo-economic Analysis Of The Steam Cycle Of A Brazilian Medium – Sized Sugar And Alcohol Mill. XI International Symposium On Alcohol Fuels. Anais V. 2, pag. 415-422, Sun City, South Africa.

WALTER, A., SOUZA, M.R., FAAJI, A. “Co-firing” (Biomassa + Gás Natural) como Alternativa para Estimular a Produção de Eletricidade a Partir de Resíduos de Cana de Açúcar. In: **IX CBE – IX Congresso Brasileiro de Energia**. Rio de Janeiro. 2002.

WILLIAMS, R.H., LARSON, E.D. Advanced Gasification-based Biomass Power Generation. In: JOHANSSON, T.B., et al. **Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity**. London: Earthscan, 1993. Cap.17, p.729-785.

YOSHIDA, R. Clean coal technologies in Japan **Energy Sources** v. 19, n. 9, p. 931-943, Nov. 1997

ZAMALLOA, G. A. C. (1998). Utilização do Gás Natural de Camisea (Peru) para a Viabilização de Sistemas Elétricos e de Gás no Norte e Centro Oeste do Brasil. São Paulo. IEE.

ZAPOROWSKI, B., WRÓBLEWSKI, R. Analysis of Energy Conversion Processes in Combined Heat and Power Plants Integrated with Biomass Gasification. In: **CleanAir** .