



USO EFICIENTE DE BIOGÁS DE ESGOTO EM MOTORES GERADORES

Marcus Vinicius Dias Lemos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior, D.Sc e Prof. Silvio Carlos Anibal de Almeida, D.Sc.

Rio de Janeiro
Agosto de 2013

USO EFICIENTE DE BIOGÁS DE ESGOTO EM MOTORES GERADORES

Marcus Vinicius Dias Lemos

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

Examinado por:

Prof. Sílvio Carlos Anibal de Almeida, D.Sc

Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior, D.Sc

Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro
Pinto, Dr.-Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2013

Lemos, Marcus Vinicius D.

Uso Eficiente de Biogás de Esgoto em Motores Geradores/ Marcus Vinicius Dias Lemos. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

VIII, 59 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Carlos Rodrigues Pereira Belchior e Silvio Carlos Anibal de Almeida.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 40-42.

1. Uso de biogás em motor ciclo Otto.
2. Biocombustíveis. 3. Biogás. 4. Análise de Desempenho. 5. Análise de Emissões. I. Belchior, Carlos Rodrigues Pereira. De Almeida, Silvio Carlos Anibal II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Uso eficiente de biogás de esgoto em motores geradores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, principalmente por ser minha maior incentivadora, pela sua fé e por não me deixar desanimar, ao meu pai, pela amizade e paciência, à minha irmã, pelo carinho e companheirismo, e a todos eles, por me mostrar que tudo é mais fácil com o apoio da família.

Agradeço à minha namorada, pela cumplicidade e apoio em momentos tão difíceis, e ao meu avô e familiares, por estarem sempre presentes, nos bons e maus momentos.

Agradecimentos ao meu orientador, Prof. Carlos Belchior, pelo apoio, pelas discussões sempre construtivas e pelo incentivo na realização deste trabalho.

Agradecimentos ao Coordenador do PRH-37 Marcelo Colaço e ao Programa de Recursos Humanos 37 da ANP, pela ajuda acadêmica e pelo suporte financeiro.

Agradecimentos aos meus amigos, por tornar muito mais agradável essa jornada tantas vezes difícil, e em especial ao amigo Gabriel, pelas inúmeras vezes em que se mostrou solidário e pronto a ajudar.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Uso eficiente de biogás de esgoto em motores geradores

Marcus Vinicius Dias Lemos

Agosto/2013

Orientadores: Carlos Rodrigues Pereira Belchior e Silvio Carlos Anibal de Almeida

Curso: Engenharia Mecânica

Este trabalho propõe a análise de desempenho e emissões de um motor ciclo Otto utilizando biogás como combustível alternativo. O aproveitamento do biogás, produto do tratamento de esgoto, para geração de energia elétrica ocasiona redução no potencial de poluição do meio ambiente, já que o combustível é composto principalmente por metano (CH_4), gás extremamente nocivo no que diz respeito ao efeito estufa. Foi desenvolvido um estudo comparativo do motor operando também com gasolina e GNV, e posteriormente foram realizados ensaios variando-se a relação ar-combustível e o avanço de ignição do motor. Os resultados destes testes levaram a um maior conhecimento da influência destas variáveis sobre o desempenho do motor, trazendo sugestões de adaptações para os motores já existentes como forma de aperfeiçoar a sua operação no que diz respeito à emissões e consumo.

Palavras-chave: Motor Otto, Biocombustível, Biogás, Análise de Desempenho, Análise de Emissões.

Índice

LISTA DE FIGURAS	vii
NOMENCLATURA.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. BIOCOMBUSTÍVEIS - O BIOGÁS.....	1
1.2. MOTIVAÇÃO.....	2
1.3. OBJETIVO	6
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	7
3. APARATO EXPERIMENTAL.....	12
3.1. GRUPO MOTOR-GERADOR.....	12
3.2. ANALISADOR DE GASES	13
3.3. BANCO DE RESISTÊNCIA.....	14
3.4. MEDIDOR DE VAZÃO	15
4. METODOLOGIA DOS TESTES	17
4.1. COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS	17
4.2. CÁLCULO DA RAZÃO A/C	18
4.3. CÁLCULO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL E EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO ENERGÉTICA	21
4.4. VARIAÇÃO DO AVANÇO DE IGNIÇÃO	21
4.5. TESTES	22
4.6. TRATAMENTO DOS DADOS	23

5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
5.1.	ENSAIOS COM GASOLINA, GNV E BIOGÁS	24
5.1.1.	EMISSÕES DE CO ₂	24
5.1.2.	EMISSÕES DE CO.....	25
5.1.3.	EMISSÕES DE HC.....	26
5.1.4.	EMISSÕES DE NO _x	27
5.1.5.	CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL E EFICIÊNCIA GLOBAL.	29
5.2.	ENSAIOS COM BIOGÁS – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA RELAÇÃO AR-COMBUSTÍVEL.....	30
5.2.1.	EMISSÕES DE CO ₂	30
5.2.2.	EMISSÕES DE CO.....	31
5.2.3.	EMISSÕES DE HC.....	32
5.2.4.	EMISSÕES DE NO _x	33
5.2.5.	CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL E EFICIÊNCIA GLOBAL.	33
5.3.	ENSAIOS COM BIOGÁS – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO AVANÇO DE IGNIÇÃO	34
5.3.1.	EMISSÕES DE CO ₂	35
5.3.2.	EMISSÕES DE CO.....	35
5.3.3.	EMISSÕES DE HC.....	36
5.3.4.	EMISSÕES DE NO _x	37
5.3.5.	CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL E EFICIÊNCIA GLOBAL.	37
6.	CONCLUSÃO.....	39
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	Apêndice A - Tabela de Emissões e Consumo para Gasolina.....	43
	Apêndice B - Tabela de Emissões e Consumo para GNV	44
	Apêndice C - Tabela de Emissões e Consumo para Biogás.....	45

Apêndice D - Tabela das médias de emissões para o biogás – variação da razão λ	46
Apêndice E - Tabela das médias de emissões para o biogás – variação do avanço de ignição.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo final de energia por tipo de combustível.....	4
Figura 1.2 Emissões na produção de energia elétrica.....	5
Figura 3.1 Grupo motor-gerador	12
Figura 3.2 Analisador de gases de descarga NAPRO e software de visualização de dados	13
Figura 3.3 Banco de resistência para simulação de carga	14
Figura 3.4 Medidor de vazão de GNV e biogás	15
Figura 3.5 Medidor de consumo de gasolina.....	16
Figura 4.1 Modificação do ponto de ignição - detalhe da chaveta.....	22
Figura 5.1 Emissões de CO ₂ para diferentes combustíveis	24
Figura 5.2 Emissões de CO para diferentes combustíveis.....	26
Figura 5.3 Emissões de HC para diferentes combustíveis.....	27
Figura 5.4 Emissões de NO _x para diferentes combustíveis	28
Figura 5.5 Consumo específico para diferentes combustíveis	29
Figura 5.6 Eficiência global para diferentes combustíveis.....	30
Figura 5.7 Emissões de CO ₂ em função da razão λ	31
Figura 5.8 Emissões de CO em função da razão λ	32
Figura 5.9 Emissões de HC em função da razão λ	32
Figura 5.10 Emissões de NO _x em função da razão λ	33
Figura 5.11 Consumo específico em função da razão λ	34
Figura 5.12 Eficiência global em função da razão λ	34
Figura 5.13 Emissões de CO ₂ em função do avanço de ignição	35
Figura 5.14 Emissões de CO em função do avanço de ignição.....	36
Figura 5.15 Emissões de HC em função do avanço de ignição.....	36
Figura 5.16 Emissões de NO _x em função do avanço de ignição	37
Figura 5.17 Consumo específico em função do avanço de ignição	38
Figura 5.18 Eficiência global em função do avanço de ignição.....	38

NOMENCLATURA

GNV	Gás Natural Veicular
CEC	Consumo Específico de Combustível. [g / kWh]
PCI	Poder Calorífico Inferior. [MJ/kg]
P_i	Potência indicada do motor. [kW]
$\dot{m}_{comb.}$	Vazão mássica de combustível. [g/h]
\dot{m}_v	Vazão volumétrica de combustível. [cm ³ /h]
$\left(\frac{A}{C}\right)_{est.}$	Razão ar-combustível estequiométrica.
$\left(\frac{A}{C}\right)_{real}$	Razão ar-combustível real.
° apms	Graus antes do ponto morto superior.
λ	Razão de equivalência.
η_g	Eficiência global do motor.
ρ	Massa específica. [g/cm ³]
n_{CO_2}	Número de moles de CO ₂ . [kmol]
n_{CO}	Número de moles de CO. [kmol]
n_{O_2}	Número de moles de O ₂ . [kmol]
n_{HC}	Número de moles de HC. [kmol]
n_{NO_x}	Número de moles de NO _x . [kmol]
n_{N_2}	Número de moles de N ₂ . [kmol]
n_{H_2O}	Número de moles de H ₂ O. [kmol]
$n_{BIOGÁS}$	Número de moles de biogás. [kmol]
n_{AR}	Número de moles de ar. [kmol]

1. INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna são amplamente difundidos como forma de conversão de energia térmica em mecânica, seja em aplicações automotivas ou em conjuntos moto-geradores. Os derivados de petróleo, como a gasolina e o óleo diesel, seguem como principais combustíveis para esses equipamentos e provavelmente continuarão apresentando demanda crescente pelos próximos anos, porém as pesquisas relacionadas ao uso de biocombustíveis em motores avançam e indicam a possibilidade de substituição dos hidrocarbonetos convencionais em diversas situações.

1.1. BIOCOMBUSTÍVEIS - O BIOGÁS

Para motores de ignição por centelha, um dos biocombustíveis que apresenta propriedades compatíveis com esta tecnologia é o biogás. Composto basicamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), o biogás é produzido através do processo de digestão anaeróbia, que ocorre em estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários, entre outros. O gás, que apresenta baixo poder calorífico devido à grande concentração de CO_2 , vem sendo utilizado principalmente em áreas rurais como uma forma de gerar a energia que irá alimentar equipamentos como bombas hidráulicas em fazendas, ou mesmo fornecer eletricidade para pequenas comunidades, onde não há disponibilidade de distribuição pela rede e até mesmo a chegada de combustíveis fósseis para alimentar os geradores se torna inviável.

O biogás obtido nas estações de tratamento de esgoto é produto do tratamento das águas residuais, fruto dos diversos usos nas residências e estabelecimentos das cidades. O tratamento é dividido em diversas etapas, dentre elas a sedimentação de partículas sólidas em decantadores, onde ocorre a formação do lodo, como é denominado o acúmulo de resíduos no fundo destes equipamentos [1]. A disposição do lodo em biodigestores e a posterior ação de bactérias sobre o mesmo, processo chamado degradação anaeróbia, promove a formação do biogás.

A composição do biogás, bem como a concentração de CH_4 no mesmo, depende de diversos fatores, dentre eles [2]:

- Composição dos resíduos, sendo maior a produção de biogás quanto maior for a quantidade de material orgânico no resíduo;
- Teor de água no esgoto;
- Temperatura em que ocorre o processo;
- Impermeabilidade do biodigestor ao ar.

Sendo assim, a composição usual do biogás de esgoto situa-se geralmente na seguinte faixa [3]:

- CH₄: 50 – 70%
- CO₂: 25 – 50%
- H₂: 1 – 5%
- N₂: 0.3 – 3%

Algumas impurezas são ainda encontradas, destacando-se o sulfeto de hidrogênio (H₂S), gás altamente corrosivo e que confere um odor característico ao biogás.

A utilização do biogás em sistemas de conversão de energia depende do tratamento do mesmo antes de sua queima. A purificação do gás geralmente é feita em duas etapas: a desumidificação do combustível, seguida da retirada de H₂S, já que o mesmo pode ocasionar a corrosão de alguns componentes do motor utilizado na conversão.

1.2.MOTIVAÇÃO

A crise do petróleo, em meados da década de 70, revelou a necessidade da busca de novas fontes de energia em substituição aos combustíveis fósseis tradicionais. O aumento das reservas de petróleo em grande parte das regiões produtoras, ilustrado na Tabela 1, não se mostra suficiente para suprir a crescente demanda por energia. A Tabela 2 oferece uma comparação entre a produção de petróleo e o consumo de energia no mundo, e enfatiza a importância das pesquisas e investimentos em fontes renováveis de energia.

Tabela 1.1 Reserva mundial de petróleo

Região	Reservas (x10 ⁹ barris)			
	1991	2001	2010	2011
América do Norte	123,2	230,1	217,8	217,5
América do Sul e Central	74,6	98,8	324,7	325,4
Europa e Ásia Ocidental	76,8	102,4	139,5	141,1
Oriente Médio	660,8	698,7	765,6	795
África	60,4	96,8	132,7	132,4
Ásia Oriental	37	40,5	41,7	41,3
Total	1032,7	1267,4	1622,1	1652,6

Fonte: BP Statistical Review of World Energy, Junho de 2012 [4]

Tabela 1.2 Produção x Consumo de energia

Região	Produção x Consumo (x10 ³ barris/dia)			
	2001		2011	
	Produção	Consumo	Produção	Consumo
América do Norte	13914	23595	14301	23156
América do Sul e Central	6722	4945	7381	6241
Europa e Ásia Ocidental	15412	19593	17314	18924
Oriente Médio	23035	5260	27690	8076
África	7897	2510	8804	3336
Ásia Oriental	7786	21343	8086	28301
Total	74767	77245	83576	88034

Fonte: BP Statistical Review of World Energy, Junho de 2012 [4]

O crescimento econômico de muitos países, a se destacar alguns situados na Ásia Oriental e América do Sul e Central, vêm impulsionando o aumento do consumo de energia, porém esse não é o único incentivo para o aumento dos investimentos em fontes alternativas de energia. Desde a década de 70, após a crise do petróleo mencionada anteriormente, vê-se um esforço geral em diminuir a dependência da matriz energética dos países de combustíveis fósseis, e assim se tornar menos vulnerável aos aumentos nos preços. O Brasil pode ser considerado um dos casos mais bem sucedidos no que se refere à diversidade de sua matriz. Ainda na década de 70 foi lançado o programa Pró-Alcool, que introduziu o etanol como combustível para a frota automotiva brasileira. Hoje, grande parte dos carros vendidos no país possui tecnologia para operar com mais de um tipo de combustível (carros “Flex”), e os níveis de mistura do etanol de cana-de-açúcar na gasolina

comercializada atingem de 20 a 25%. O uso do biodiesel misturado ao diesel convencional, que hoje alimenta grande parte das frotas de ônibus e caminhões nas cidades brasileiras também vêm contribuindo para a diversificação e menor dependência dos combustíveis convencionais. A figura 1 mostra a diversidade de fontes de energia utilizadas no consumo final no Brasil em 2012:

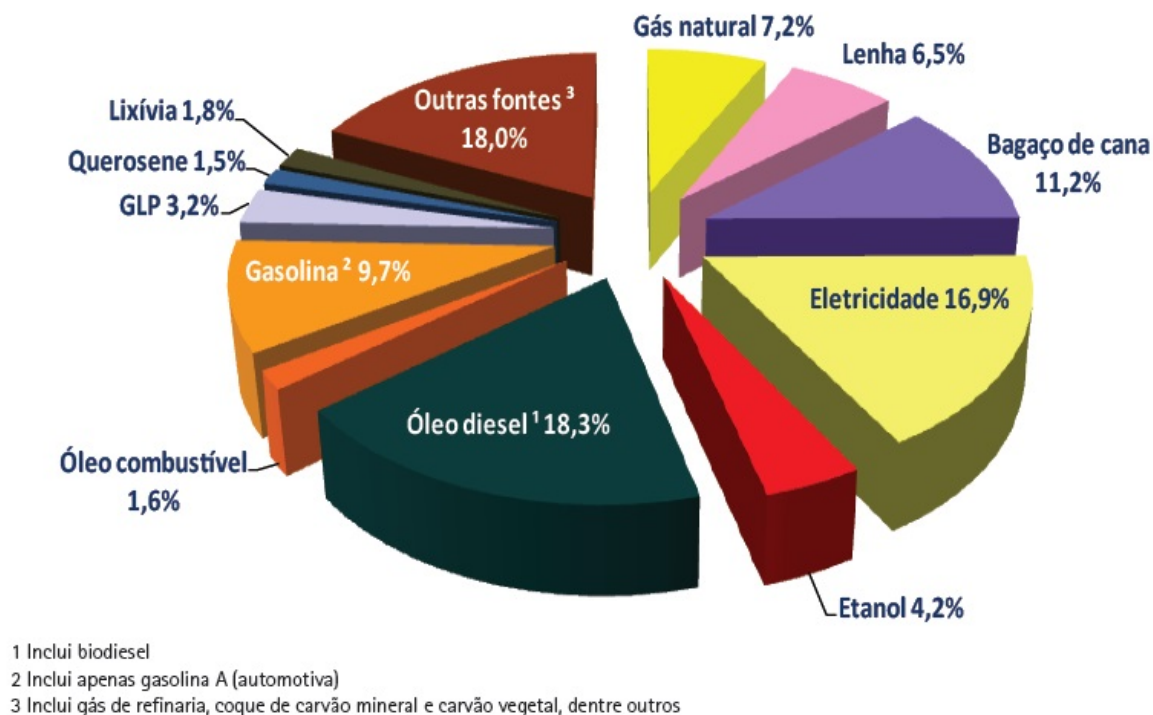


Figura 1.1 Consumo final de energia por tipo de combustível

Fonte: Adaptado de EPE – Empresa de Pesquisa Energética (BEN, 2013) [5]

Outro ponto importante no que diz respeito aos investimentos em biocombustíveis e fontes renováveis de energia é o menor impacto que estes combustíveis exercem sobre o meio ambiente. Novamente o Brasil ocupa posição de destaque nesse quesito, principalmente por ter na energia gerada nas hidrelétricas sua principal fonte de abastecimento das residências, estabelecimentos comerciais e indústrias no país. A figura 2 mostra a distância entre o impacto ambiental da geração de energia nas principais economias mundiais e no Brasil.

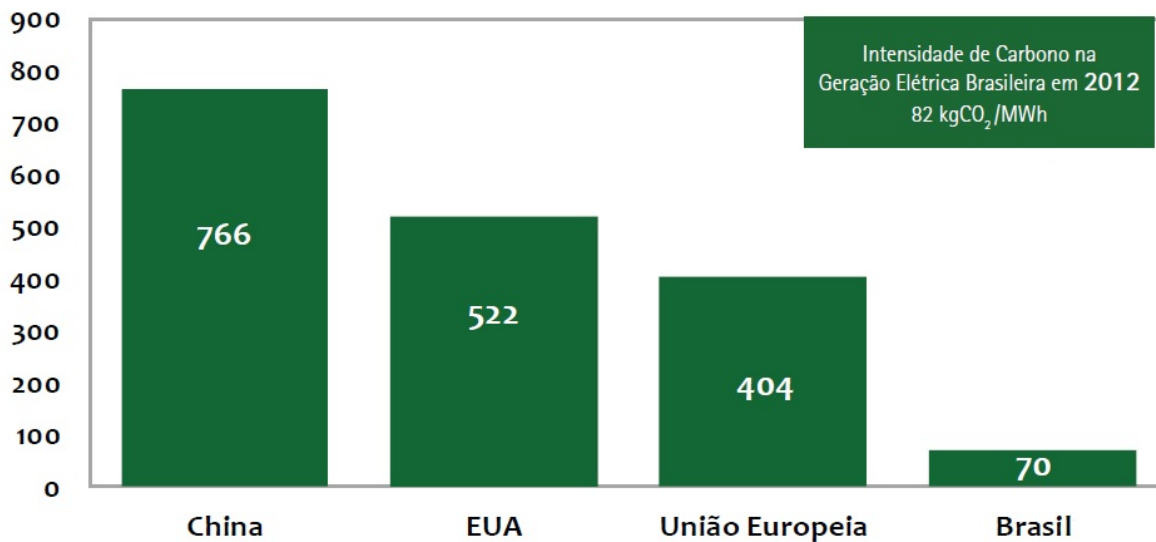


Figura 1.2 Emissões na produção de energia elétrica

Fonte: Adaptado de EPE – Empresa de Pesquisa Energética (BEN, 2013) [5]

A conscientização da importância da diminuição das emissões de gases nocivos ao ambiente vem crescendo junto aos governos, o que torna ainda mais importante o aproveitamento do biogás, já que o mesmo é composto principalmente por metano (CH₄), cerca de 21 vezes mais prejudicial ao meio ambiente que o dióxido de carbono (CO₂) [6], por provocar a destruição da camada de ozônio e contribuir para o aquecimento global.

Sendo assim, a motivação para o presente trabalho pode ser resumida nos seguintes itens:

- Aperfeiçoamento do uso de biogás em sistemas de conversão energética, neste caso, motores de ignição por centelha;
- Diminuição da dependência dos derivados de petróleo para geração descentralizada de energia (comunidades rurais, por exemplo) ou nos casos em que for possível o aproveitamento do gás de esgoto;
- Diminuição das emissões de gases nocivos ao meio ambiente;
- Contribuição para a diversificação da matriz energética brasileira, e consequentemente, para a maior oferta de energia.

1.3.OBJETIVO

A diversificação da matriz energética e a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis se tornou questão estratégica para muitos países nos dias de hoje, e nesse contexto, o biogás se mostra uma fonte de energia de grande disponibilidade, já que sua produção está atrelada a processos contínuos, como o tratamento do esgoto das grandes cidades ou mesmo a disposição do lixo em aterros sanitários, por exemplo. O objetivo deste trabalho é fornecer uma análise comparativa do desempenho e emissões de um motor de ignição por centelha operando com três combustíveis distintos, bem como estudar a influência de alguns parâmetros operacionais (razão ar-combustível e avanço de ignição) na combustão do biogás.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar alguns trabalhos que serviram de referência para a realização dos ensaios, análise dos resultados, e também como fonte de consulta para este Projeto de Graduação.

Souza et. al. [7] realizaram ensaios num conjunto motogerador operando originalmente à gasolina e, posteriormente a biogás. Foram estabelecidas três potências resistivas (1000, 1200 e 1500W) e medidas para as mesmas o consumo e a rotação do motor operando com os dois combustíveis. Para medir o consumo do biogás foi utilizado um medidor volumétrico de gás, método semelhante ao utilizado em outras referências, enquanto o consumo de gasolina foi medido através da diferença de nível em uma coluna graduada. Os resultados mostraram aumento de potência média gerada, porém houve diminuição da eficiência do conjunto quando comparado ao uso da gasolina.

Porpatham et. al. [8] utilizaram um motor de ignição por centelha acoplado a um dinamômetro para analisar a influência da concentração de CO_2 no desempenho e nas emissões do motor operando com biogás. Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) era armazenado na unidade de separação, que recebia posteriormente o biogás. Assim, o CO_2 presente no gás se combinava ao hidróxido de cálcio formando carbonato de cálcio (CaCO_3) e diminuindo deste modo sua concentração no combustível. Foi constatado um aumento do PCI do biogás e da potência gerada pelo motor com a diminuição dos níveis de CO_2 , bem como o aumento da faixa de operação para misturas ricas de ar-combustível (excesso de ar). Houve também aumento da eficiência térmica com o decréscimo da concentração de CO_2 , porém fez-se necessário retardar a ignição na câmara de combustão para se evitar a detonação. No que diz respeito às emissões, houve diminuição dos níveis de HC, atingindo o valor mínimo na razão ar-combustível de 0.95 e concentração de CO_2 de 20%. Para misturas muito pobres, como era de se esperar, houve acréscimo nas emissões de HC, já que o efeito da combustão incompleta é predominante. Os níveis de NO_x aumentaram para níveis menores de CO_2 , o que pode ser explicado pela maior admissão de CH_4 e O_2 , o que leva a combustão a atingir maiores temperaturas.

Crookes [9] realizou testes em motores de ignição por centelha e por compressão (ambos com velocidade e carga variáveis, tendo ainda o primeiro taxa de compressão

variável) utilizando biogás simulado – houve variação na concentração de CO_2 no mesmo – e óleos vegetais, monitorando o desempenho do motor (potência e consumo específico) e as emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2). Os resultados obtidos com o motor de ignição por centelha operando numa faixa de taxa de compressão entre 11:1 e 13:1, à 2000 rpm, indicaram diminuição das emissões específicas (massa do componente emitida por unidade de potência) de NO_x para maiores frações de CO_2 no biogás, enquanto houve aumento das emissões específicas de HC. Para o monóxido de carbono, as emissões se mostraram governadas principalmente pela variação da relação A/C, havendo pouca influência da concentração de dióxido de carbono no combustível. Os resultados mostraram diminuição das emissões de CO com o afastamento do ponto de operação da zona de mistura pobre (escassez de ar na mistura), o que se deve à combustão incompleta que ocorre nessa região. Aumentos na taxa de compressão elevaram as emissões de NO_x e HC, já que maiores temperaturas de combustão são alcançadas nessa condição.

Huang and Crookes [3] utilizaram um motor de ignição por centelha operando com biogás simulado (uma mistura de gás natural doméstico e dióxido de carbono) para analisar a influência da concentração de CO_2 neste combustível no que diz respeito às emissões de CO, HC, NO_x , bem como em dados de performance como eficiência térmica e potência medida no eixo (brake power). Primeiramente os testes foram conduzidos para dois tipos de misturas ar-combustível: pobres, com razão A/C relativa (λ) de 0.98, e ricas, com razão λ de 1.05, enquanto a taxa de compressão foi fixada em 13:1. Foi constatada, para ambas as misturas, a diminuição da potência obtida com o aumento da concentração de CO_2 , fato explicado pela diminuição da entalpia de combustão do biogás, e ainda a diminuição da eficiência térmica, justificado pela diminuição da velocidade de chama na câmara de combustão e conseqüentemente, maior tempo de combustão e menores pressões atingidas no cilindro do motor. No que diz respeito às emissões de NO_x , houve diminuição com o acréscimo de CO_2 , já que as temperaturas de combustão atingidas são inversamente proporcionais a concentração de dióxido de carbono. Quanto ao CO e HC, ocorre aumento de emissão para misturas pobres, já que uma maior concentração de CO_2 ocasiona menor velocidade de chama, que somado a baixa disponibilidade de oxigênio neste tipo de mistura leva a uma combustão incompleta. Testes realizados com variação na taxa de compressão,

porém com razão λ fixa em 0.97 e concentração de CO_2 também fixada em 37,5%, demonstraram aumento nas emissões de HC, CO e NO_x com o aumento da razão de compressão.

Porpatham et al. [10] investigaram o efeito da adição de H_2 ao biogás utilizado para alimentar um motor de ignição por centelha com diferentes razões λ . O biogás apresenta algumas propriedades desfavoráveis à utilização em motores de combustão interna, como seu baixo PCI e baixa velocidade de chama (25 cm/s contra 275 cm/s para o H_2). Sendo assim, foram utilizadas 4 misturas, a primeira contendo somente biogás e as três restantes com concentração em volume de 5, 10 e 15% de H_2 respectivamente, como combustível para o motor de 4.4 kW e 1500 rpm (constante). Os resultados apontaram o aumento da faixa de operação do motor devido as melhores propriedades do H_2 enquanto combustível, permitindo a combustão numa faixa de λ abaixo do *lean limit* (mistura com a quantidade mínima de ar necessária para que ocorra combustão), o que se refletiu ainda no aumento progressivo da potência no eixo acompanhando o aumento da concentração de hidrogênio no biogás. Houve também aumento da eficiência térmica da combustão, porém para concentrações de H_2 maiores que 10% essa tendência era revertida, já que houve necessidade de retardar o ponto de ignição do motor para evitar a detonação (somente para misturas ricas). Para as emissões de HC observou-se a diminuição dos níveis para todas as razões λ , o que pode ser explicado tanto pela menor admissão de hidrocarbonetos na mistura, mas, principalmente pela melhora da combustão nas regiões de mistura com escassez de ar, conforme mencionado anteriormente.

Subramanian et al. [11] utilizaram um motor automotivo de ignição por centelha conectado a um dinamômetro, operando com biogás enriquecido (concentrações de metano de 93%) e gás natural comprimido para analisar e comparar o consumo de combustível e as emissões. Os testes foram realizados de acordo com a norma *Bharat Stage IV* (norma estabelecida pelo governo indiano), tendo o veículo operado em dois diferentes estágios: o primeiro corresponde a uma distância percorrida de aproximadamente 4 km em velocidade abaixo de 50 km/h, enquanto o segundo estágio compreende uma distância relativa percorrida de aproximadamente 6,5 km com a máxima velocidade de 90 km/h. O estudo comparativo apontou as seguintes conclusões:

- Aumento das emissões de CO, HC e NO_x para o motor operando com biogás enriquecido, porém, os valores ficaram abaixo do permitido pela norma;
- Níveis equivalentes de consumo de combustível, tendo o biogás atingido a média de 24,11 km/kg, enquanto o gás natural comprimido chegou a marca de 24,38 km/kg;
- Não houve diferença significativa nas emissões de CO₂, com ambos os combustíveis atingindo valores em torno de 114 g/km;
- O uso de biogás atende integralmente aos requisitos da norma, podendo ser utilizado, assim como o gás natural, para alimentar veículos de passeio nas condições usuais (previstas pela norma).

Coelho et al. [12] utilizaram um grupo motor-gerador operando a biogás para geração de energia elétrica. O biogás foi produzido através do processo de digestão anaeróbia do esgoto proveniente do conjunto residencial da USP, bem como do principal restaurante universitário do campus. O gás produzido no biodigestor era encaminhado a um sistema de purificação, cujo principal objetivo era remover o ácido sulfídrico (H₂S) presente no combustível, além de diminuir o teor de água no mesmo. O sistema de purificação possibilitou a diminuição de aproximadamente 650 ppm de H₂S, além de aumentar em torno de 5% o teor de metano na mistura. O grupo gerador consistiu num motor de ignição por centelha de 18 kW que alimentou um painel de teste de potência requerida de 2,4 kW. Constatou-se um nível elevado de hidrocarbonetos não queimados na análise dos gases de descarga, o que pode ser explicado pela baixa carga a que o motor estava submetido (15% de sua potência nominal).

Porpatham et al. [13] adaptaram um motor original a diesel para operar como motor de ciclo Otto utilizando biogás. O estudo foi realizado para analisar a influência da taxa de compressão no desempenho do motor. Usualmente, o biogás apresenta altas temperaturas de auto-ignição, o que aumenta o seu poder anti-detonante e, por consequência, permite a sua utilização em maiores taxas de compressão (motivo pelo qual foi utilizado um motor a diesel adaptado). Os resultados apresentaram aumento da potência indicada para maiores taxas de compressão, o que pode ser explicado pela melhor eficiência térmica alcançada. Para a carga correspondente a 25% da carga máxima do motor, foi constatada uma sensível diminuição na potência para misturas muito pobres (próximas ao *lean limit*), o que pode ser

explicado pela diminuição da quantidade de combustível queimado (aumento nas emissões de HC) como também pela diminuição da eficiência térmica da combustão. Para esta situação, o efeito do aumento da taxa de compressão não se mostrou significativo, apesar do aumento da região limite de operação para maiores razões de compressão. Pode se observar a diminuição da temperatura dos gases de exaustão com o aumento das taxas de compressão, além do aumento da massa de hidrocarbonetos não queimados. Este comportamento foi potencializado para o motor operando com 100% da carga máxima, já que baixas temperaturas de combustão e cargas altas levam a um declínio da qualidade do processo. Este fato se refletiu no aumento de aproximadamente 2000 ppm nos níveis de emissão de HC .

3. APARATO EXPERIMENTAL

A seguir será feita a descrição do conjunto motor-gerador e de todo o aparato utilizado para a realização dos ensaios e aquisição dos dados necessários para efetuar os cálculos de emissões e desempenho.

3.1. GRUPO MOTOR-GERADOR

Utilizou-se um grupo motor-gerador ciclo Otto, fabricado pela empresa Branco, com partida a gasolina e operação também a gás natural e biogás.



Figura 3.1 Grupo motor-gerador

A tabela abaixo mostra as principais características do motor utilizado nos ensaios [14]:

Tabela 3.1 Características do motor

Tabela de Características do Motor			
Potência Máxima (KW)	4	Cilindrada (cc)	389
Potência Nominal (KW)	3,6	Comprimento (mm)	695
Voltagem (V)	110/220	Largura (mm)	555
Frequência (Hz)	60	Altura (mm)	580
Voltagem de carga (V)	12	Peso líquido (Kg)	80
Corrente de carga (A)	8,3	MONOFÁSICO	-

3.2. ANALISADOR DE GASES

Os gases de descarga do motor estão ligados a um analisador de gases NAPRO PC-MULTIGÁS, capaz de monitorar as emissões de CO, CO₂, HC, NO_x e O₂ baseado no método de medição de infravermelho não dispersivo.



Figura 3.2 Analisador de gases de descarga NAPRO e software de visualização de dados

3.3. BANCO DE RESISTÊNCIA

Para o teste do motor aqui considerado, de potência menor que 5 kW, foi possível usar um banco de resistência simples, composto por um chuveiro eletrônico com resistência variável (chuveiro eletrônico LORENZETTI, 5500 W), a fim de medirem-se cargas elétricas que correspondem a 100%, 75%, 50% e 25% da potência do grupo motor-gerador. A escolha desse tipo de bancada se deve a alta disponibilidade desse equipamento no mercado, assim como pela facilidade na sua operação. O controlador de potência utiliza um TRIAC como componente principal, o que torna sua operação trivial.



Figura 3.3 Banco de resistência para simulação de carga

3.4. MEDIDOR DE VAZÃO

Foi utilizado um medidor de gás diafragma, do fabricante LAO, para monitorar o consumo de gás natural e biogás durante a operação do motor. O princípio de funcionamento do medidor consiste em um grupo de canais comunicantes que, ao movimentar os diafragmas de carga e descarga acionam a válvula responsável pela movimentação do sistema de integração. Na figura abaixo podemos ver o painel indicador do equipamento.



Figura 3.4 Medidor de vazão de GNV e biogás

Abaixo segue as principais características do equipamento:

- Marca: LAO
- Modelo: G1
- Vazão máxima: 1,6 m³/h
- Vazão mínima: 0,016 m³/h
- Pressão máxima: 50 kPa

Para medir o consumo de gasolina foi utilizado um recipiente posicionado sobre uma balança digital. Sendo assim, a vazão de gasolina em massa foi obtida pela diferença na medição da balança, descontando-se o peso do recipiente.



Figura 3.5 Medidor de consumo de gasolina

4. METODOLOGIA DOS TESTES

4.1. COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS

Como mencionado anteriormente, na primeira fase de testes foram utilizados três combustíveis distintos: gasolina, GNV e biogás. Sabe-se que devido à presença de grande quantidade de CO₂ em sua composição, o biogás apresenta baixo PCI em comparação com os outros combustíveis, o que pode ser entendido da seguinte maneira: para gerar a mesma potência consome-se mais biogás que gasolina e GNV. A tabela a seguir apresenta o PCI e a densidade usual para a gasolina utilizada [9]:

Tabela 4.1 Propriedades da gasolina

Combustível	PCI [MJ/kg]	Densidade
Gasolina	45.0	0.72

O biogás e GNV utilizado nos ensaios foram analisados e suas principais propriedades físico-químicas, bem como a sua composição, são apresentadas a seguir [15]:

Tabela 4.2 Propriedades do biogás e GNV

Combustível	Densidade relativa	PCI [MJ/Kg]
Biogás	0,8148	24,59
GNV	0,6481	37,69

Tabela 4.3 Composição do biogás [%]

CH ₄	CO ₂	N ₂	O ₂
67.5	24.1	6.7	1.6

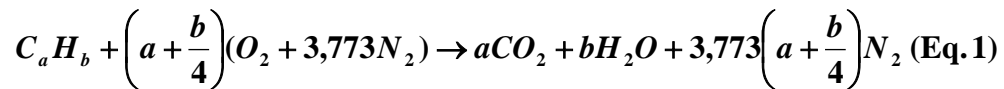
Vale ressaltar que a tabela anterior aponta somente os componentes com maior participação na composição do gás, porém há ainda alguns componentes minoritários, como o H₂S, gás extremamente nocivo ao motor, que é filtrado antes da entrada do biogás no misturador.

4.2. CÁLCULO DA RAZÃO A/C

Fator de extrema importância no desempenho e nas emissões de motores de combustão interna, turbinas a gás, entre outros, a razão A/C indica a quantidade de ar utilizada por unidade de massa ou por unidade molar de combustível. Outro parâmetro utilizado é a razão de equivalência λ , que indica a distância entre a relação A/C real para a estequiométrica (onde haveria a combustão perfeita).

Para calcular a razão A/C com a qual o motor está operando, primeiramente faz-se necessário diferenciar a razão real da chamada razão estequiométrica. A primeira trata da combustão real, que ocorre nos diversos equipamentos de conversão de energia, enquanto a segunda, descreve um processo idealizado de combustão completa, definido pela equação estequiométrica.

Korakianatis et al. [16] descreveu a seguinte fórmula de combustão estequiométrica de hidrocarbonetos:



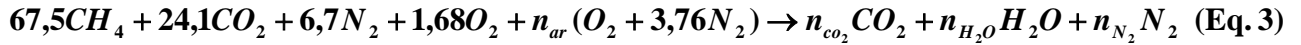
Esta equação permite o balanceamento da combustão de um hidrocarboneto qualquer, considerando a composição do ar de 21% de O_2 e 79% de N_2 . Chegamos à razão A/C estequiométrica pela seguinte equação [16]:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{est.} = \frac{34,559(4 + y)}{12,011 + 1,008y} \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo $y = \frac{b}{a}$. Consideraram-se as seguintes massas molares para a equação acima:

- C: 12,011 kg/kmol
- H_2 : 2,016 kg/kmol
- O_2 : 31,998 kg/kmol
- N_2 : 28,157 kg/kmol

De maneira análoga podemos chegar à razão $A/C_{est.}$ para o combustível especificado [15] através da seguinte equação de balanceamento:



Pelo cálculo da massa do biogás e da massa molar do ar [2] chegamos à seguinte fórmula para a razão A/C:

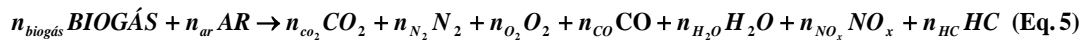
$$\left(\frac{A}{C}\right)_{est.} = \frac{137,9n_{ar}}{2386,0} \quad (\text{Eq. 4})$$

Balaceando a equação (3) chegamos ao valor de 133,32 kmol de ar para a combustão estequiométrica do combustível utilizado nos ensaios. Esse valor nos dá a seguinte razão A/C:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{est.} = 7,7 \frac{\text{kg de ar}}{\text{kg de biogás}}$$

A razão A/C estequiométrica para o biogás varia de acordo com sua composição. Bedoya et. al [17] calcularam em seu estudo a razão A/C de 6,1 para o biogás com 60% de CH₄, enquanto Porpatham et. al [8] calcularam a razão de 5,7 para o biogás contendo 57% de metano. O valor encontrado nesse estudo se mostrou coerente, já que uma maior quantidade de metano necessita de maior quantidade de ar para que ocorra a combustão completa [3].

Para o cálculo da razão A/C real seguimos o caminho inverso. Partimos da concentração dos gases de descarga medida pelo analisador de gases NAPRO, e balanceamos a seguinte equação:



A combustão de hidrocarbonetos a baixas temperaturas tem como principais gases de descarga N₂, H₂O, CO₂ e O₂, ou ainda CO e H₂ [18]. O biogás, por ser um gás de baixo PCI, apresenta menores temperaturas e pressões na câmara de combustão, o que pode ser

comprovado pela composição dos gases de exaustão apresentada pelo analisador de gases NAPRO. Os valores de n_{HC} e n_{NO_x} [ver Eq. 5] correspondem a menos de 100ppm (0,01%) e 900ppm (0,09%) respectivamente. Sendo assim, para efeitos de balanceamento da equação de combustão real, e conseqüentemente para o cálculo da razão A/C, os mesmos foram desprezados. Abaixo temos as equações para o balanceamento da quantidade de combustível, de ar e para a razão A/C_{real}, respectivamente:

$$n_{BIOGÁS} = \frac{n_{CO_2} + n_{CO}}{91,6} \text{ (Eq. 6)}$$

$$n_{AR} = 1,45n_{CO_2} + 0,95n_{CO} + n_{O_2} \text{ (Eq. 7)}$$

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{real} = 5,3 \frac{1,45n_{CO_2} + 0,95n_{CO} + n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{CO}} \text{ (Eq. 8)}$$

Vale ressaltar que para chegar até a equação 8 calculou-se a massa do combustível especificado e a massa do ar modelado (21% de O₂ e 79% de N₂). Sendo assim, podemos chegar à razão A/C_{real} através da concentração dos gases de descarga medidos pelo analisador NAPRO.

Define-se ainda a razão de equivalência λ , sendo esta:

$$\lambda = \frac{\left(\frac{A}{C}\right)_{real}}{\left(\frac{A}{C}\right)_{esteq.}} \text{ (Eq. 9)}$$

4.3. CÁLCULO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL E EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO ENERGÉTICA

O consumo específico de combustível, de agora em diante CEC , é a medida do quão eficiente é a operação de um motor com determinado combustível [18]. Pode ser definido como o consumo de combustível por unidade de potência, conforme a seguinte equação:

$$CEC = \frac{\dot{m}_{comb.}}{P_i} \text{ (Eq. 10)}$$

Como a medição da vazão de biogás foi realizada em base volumétrica, fez-se necessário o uso da seguinte equação para a conversão em vazão mássica:

$$\dot{m}_{comb.} = \dot{m}_v * \rho \text{ (Eq. 11)}$$

Durante a operação do motor, é desejável que se obtenha baixos valores de CEC , tendo em vista que estes resultarão em ganho de eficiência. A eficiência de conversão energética, ou eficiência global, é definida como a razão entre a quantidade de energia produzida por ciclo do motor e a quantidade de energia fornecida, medida pelo PCI do combustível. A eficiência global, de agora em diante η_g , é definida pela seguinte equação:

$$\eta_g = \frac{3600}{CEC * PCI} \text{ (Eq. 12)}$$

4.4. VARIAÇÃO DO AVANÇO DE IGNIÇÃO

Um importante parâmetro de operação dos motores de ignição por centelha é o chamado avanço de ignição. Sabe-se que a presença de gases inertes misturados ao combustível afeta negativamente a qualidade da combustão, reduzindo a velocidade de propagação de chama e conseqüentemente, aumentando o tempo médio de duração da queima [19]. Uma das soluções para este problema consiste em adiantar o ponto de ignição

do motor, para que o pico de pressão seja atingido na posição do pistão desejada. A modificação do ponto de ignição pode ser utilizada também como ferramenta para evitar a detonação nos cilindros dos motores, como pode ser visto no estudo de Porpatham et al. [13], onde o aumento da taxa de compressão para a combustão com misturas ricas foi associado a um maior atraso na ignição do motor, para que o mesmo pudesse operar sem problemas relacionados a detonação. A figura 4.1 mostra a adaptação realizada no motor para que o mesmo pudesse operar com diferentes avanços de ignição:



Figura 4.1 Modificação do ponto de ignição - detalhe da chaveta

Pode-se observar que foi realizada uma intervenção mecânica no motor. Foram fabricadas chavetas adicionais, que acopladas ao virabrequim, posicionavam os pistões em diferentes ângulos no momento em que era disparada a centelha.

4.5. TESTES

Como mencionado anteriormente, os testes foram realizados em 3 etapas, sendo elas:

- Testes de desempenho e emissões para o motor operando com gasolina, GNV e biogás;
- Testes de desempenho e emissões para o motor operando somente com biogás variando-se a razão A/C_{real} ;
- Testes de desempenho e emissões para o motor operando somente com biogás variando-se o avanço de ignição.

Em cada etapa realizada, o motor era submetido a quatro cargas diferentes, impostas pelo banco de resistência mostrado anteriormente. As cargas correspondem a 25, 50, 75 e 100% da potência máxima do motor de 4 kW. Na segunda etapa de testes variou-se também a razão λ , tendo percorrido um range de 0,94 (mistura pobre) a 1,06 (mistura rica). Houve ainda a mudança no ponto de ignição, na etapa final dos testes. Os testes foram conduzidos para quatro avanços diferentes de ignição, sendo eles:

- 31° apms (avanço original)
- 21° apms (atraso da ignição)
- 42° apms
- 53° apms

Vale ainda ressaltar que para um avanço de 21° apms, a operação do motor quando submetido a 100% da carga máxima se mostrou extremamente instável, o que tornou impossível a tomada de qualquer dado de emissões e consumo.

4.6. TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados medidos pelo analisador de gases NAPRO foram convertidos em um arquivo para leitura no software EXCEL, onde também foram inseridas as equações (8), (9), (10) e (11). Os gráficos apresentados no capítulo 5 foram gerados no mesmo software. As tabelas com os dados de emissões e consumo são apresentadas nos apêndices A, B e C.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ENSAIOS COM GASOLINA, GNV E BIOGÁS

A seguir são apresentadas as tabelas comparativas de emissões e desempenho do motor operando com os diferentes combustíveis ensaiados.

5.1.1. EMISSÕES DE CO₂

As análises de emissões de CO₂ pelo analisador de gases NAPRO é apresentada abaixo:

Tabela 5.1 Comparação das emissões de CO₂

Emissões CO ₂ [%]			
Carga/Comb.	Biogás	GNV	Gasolina
25%	14,0	9,3	8,9
50%	14,0	10,3	9,4
75%	13,9	10,6	9,6
100%	13,9	10,1	9,1

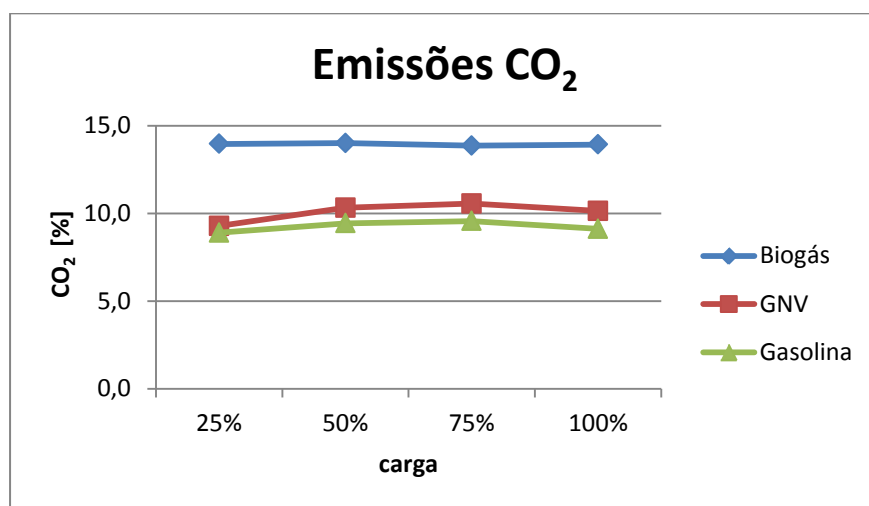


Figura 5.1 Emissões de CO₂ para diferentes combustíveis

A tabela e figura mostradas acima indicam emissões superiores de CO₂ para o motor operando com biogás, devido principalmente ao fato do combustível já possuir uma concentração em torno de 25% deste gás em sua composição, e também pelo motor apresentar maior consumo quando operando com este combustível, o que irá refletir também nas emissões.

5.1.2. EMISSÕES DE CO

Segundo Korakianitis et al. [16], motores operando com gás natural geralmente apresentam redução de 50 a 90% das emissões de CO quando comparados com os motores originalmente utilizados para operar com gasolina. Este fato se deve principalmente a menor razão de equivalência com que o primeiro motor funciona. Segue abaixo a comparação com os dados para os diferentes combustíveis utilizados neste experimento:

Tabela 5.2 Comparação das emissões de CO

Emissões CO [%]			
Carga/Comb.	Biogás	GNV	Gasolina
25%	2,06	2,68	8,50
50%	2,41	1,99	9,15
75%	2,72	1,64	9,12
100%	2,67	2,14	9,81

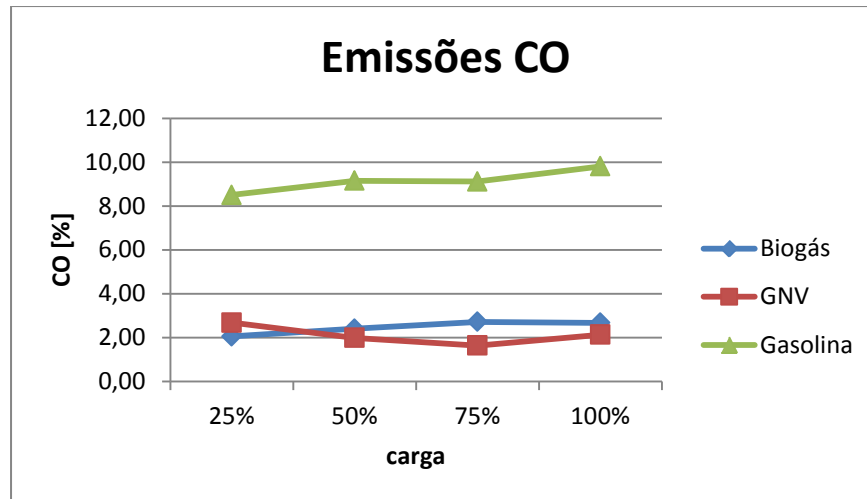


Figura 5.2 Emissões de CO para diferentes combustíveis

A figura apresentada anteriormente confirma a diminuição das emissões de CO para o motor operando com biogás e GNV (comparado à gasolina). Menores emissões de monóxido de carbono indicam a combustão mais completa para esses dois combustíveis, já que operam com razão A/C mais adequada.

5.1.3. EMISSÕES DE HC

Assim como o CO, a emissão de hidrocarbonetos não queimados está ligada a qualidade da combustão, ou seja, uma combustão mais completa leva a menores níveis de emissão de HC. Porpatham et al. [8] mostraram em seu estudo a relação das emissões de HC com a razão A/C com que o motor opera, constatando o aumento das taxas conforme o ponto de operação se afasta da razão estequiométrica.

Tabela 5.3 Comparação das emissões de HC

Emissões HC [ppm]			
Carga/Comb.	Biogás	GNV	Gasolina
25%	43	92,2	152,6
50%	45	64,2	183,4
75%	44,4	59,6	166,6
100%	77,8	55,8	176,6

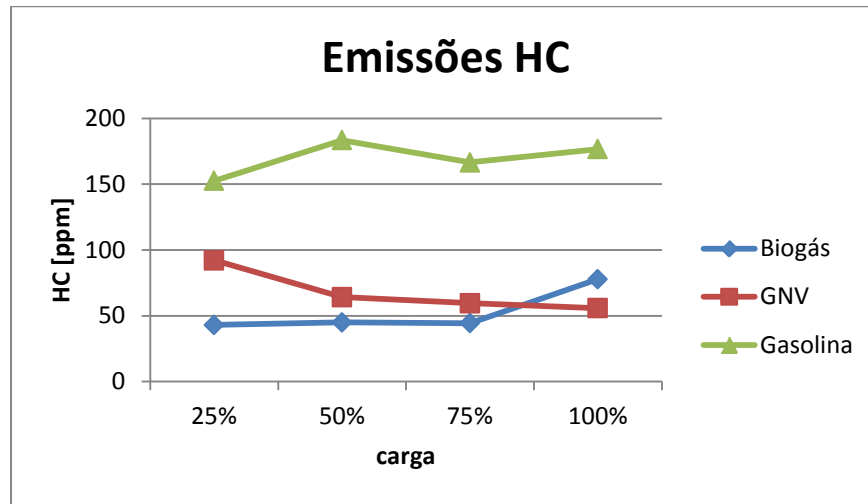


Figura 5.3 Emissões de HC para diferentes combustíveis

Podemos constatar os maiores níveis de emissão para a gasolina. Isso se deve ao fato do motor operar afastado da razão A/C estequiométrica para este combustível. Observamos também os menores níveis de HC nas emissões do motor operando com biogás.

5.1.4. EMISSÕES DE NO_x

As emissões de óxidos de nitrogênio estão relacionadas à concentração de oxigênio no combustível, bem como a altas temperaturas e pressões atingidas durante o processo de combustão. Alguns estudos comprovam a influência destes fatores nos níveis de emissões de NO_x, como pode ser visto em Gökalp et al. [20] e Rakopoulos et al. [21]. Ambos os autores realizaram testes em motores de ignição por compressão operando com biodiesel, e constataram um aumento das taxas de emissão de NO_x quando comparadas ao uso do diesel convencional, o que pode ser explicado pela maior concentração de O₂ no combustível e a melhor combustão promovida por tal mistura. Abaixo podemos ver a comparação para os três combustíveis diferentes utilizados nesse experimento:

Tabela 5.4 Comparação das emissões de NO_x

Emissões NO _x [ppm]			
Carga/Comb.	Biogás	GNV	Gasolina
25%	120,6	191	119,6
50%	197,8	500,4	175,4
75%	258,2	801,6	218,2
100%	424,2	984	221,4

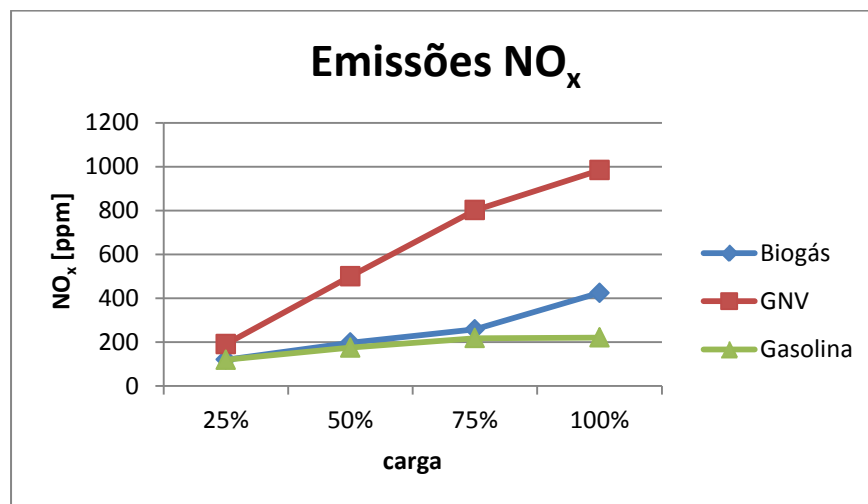


Figura 5.4 Emissões de NO_x para diferentes combustíveis

Podemos perceber que as maiores emissões são encontradas para o motor operando com GNV, o que pode ser explicado pelas maiores pressões e temperaturas atingidas na queima deste combustível. Para o biogás, o fato de ser um gás com alta concentração de CO₂ e, portanto baixo poder calorífico, torna o processo de combustão menos intenso, o que explica os menores níveis de emissões [9].

5.1.5. CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL E EFICIÊNCIA GLOBAL

Sabe-se que o CEC e a eficiência global são parâmetros inversamente proporcionais, como pode ser visto na equação (12). As tabelas e figuras a seguir mostram a comparação do desempenho do motor operando com os três combustíveis distintos:

Tabela 5.5 Comparação do consumo específico

Consumo específico [g/kW.h]			
Carga/Comb.	Biogás	GNV	Gasolina
25%	1799,1	1018,8	1347,8
50%	1183,1	540,5	846,4
75%	906,1	435,5	633,6
100%	843,3	412,2	571,0

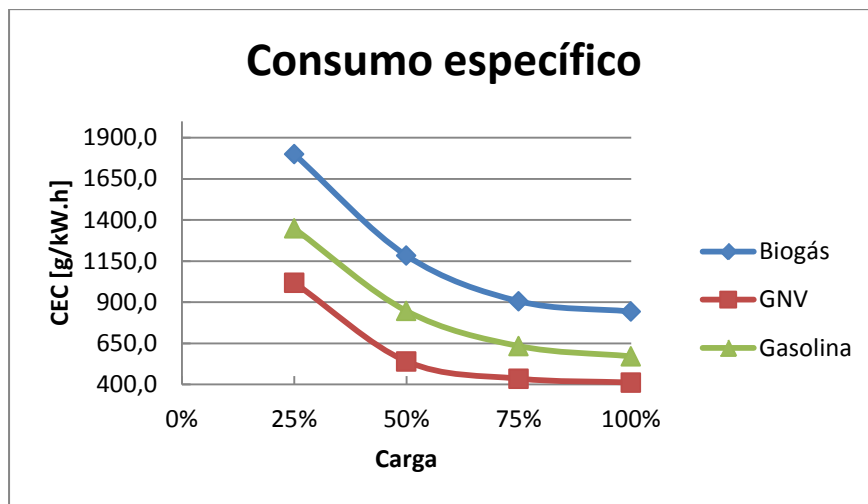


Figura 5.5 Consumo específico para diferentes combustíveis

Tabela 5.6 Comparação da eficiência global

Eficiência global			
Carga/Comb.	Biogás	GNV	Gasolina
25%	8,1%	9,4%	5,9%
50%	12,4%	17,7%	9,5%
75%	16,2%	21,9%	12,6%
100%	17,4%	23,2%	14,0%

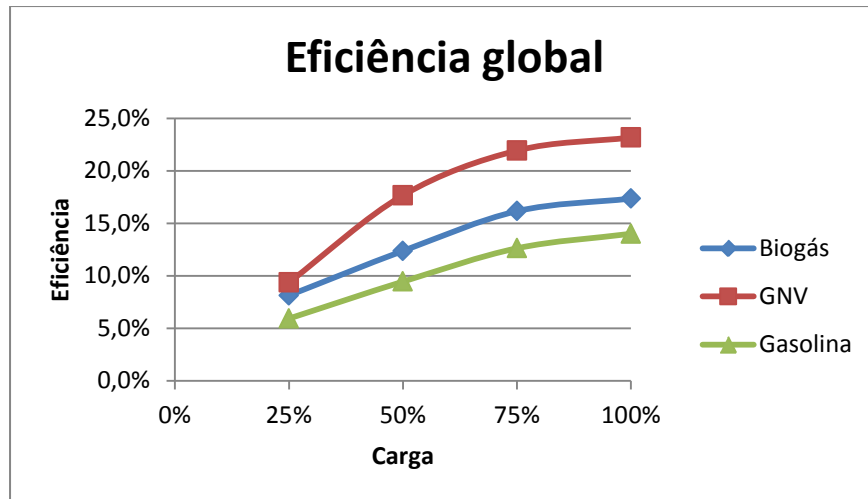


Figura 5.6 Eficiência global para diferentes combustíveis

Podemos observar a diminuição do CEC, e conseqüentemente o aumento da η_g , com o aumento da carga a que o motor está submetido, o que mostra o melhor desempenho do motor em operação próximo a sua carga nominal. Observa-se também a queda de desempenho para o motor operando com biogás, quando comparado com o GNV. Os resultados se mostraram semelhantes aos obtidos em Crookes [9], o que pode ser explicado pela melhor relação consumo/potência obtida pelo gás natural.

5.2. ENSAIOS COM BIOGÁS – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA RELAÇÃO AR-COMBUSTÍVEL

Este capítulo se dedica a analisar a influência da razão A/C, representada no fator λ , nas emissões e desempenho do motor operando com biogás.

5.2.1. EMISSÕES DE CO₂

Sabemos que a combustão completa ocorre na razão A/C estequiométrica, e conseqüentemente, maior deverá ser a taxa de emissão de CO₂ nesta região [9]. A figura abaixo mostra o comportamento do motor estudado quando aumentamos a restrição à entrada de ar no misturador:

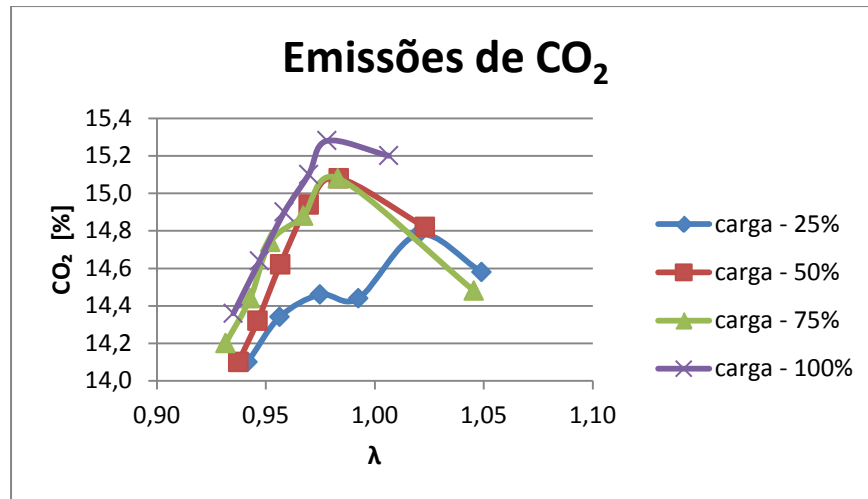


Figura 5.7 Emissões de CO₂ em função da razão λ

Podemos constatar a diminuição das emissões de CO₂ conforme a razão λ se afasta da região estequimétrica. As regiões de mistura rica ($\lambda > 1$) [22], apesar de apresentarem menores níveis de CO₂, o fazem em detrimento da queima de combustível, ou seja, níveis mais elevados de hidrocarbonetos não queimados e CO.

5.2.2. EMISSÕES DE CO

Com relação ao CO, vemos que apresenta tendência inversa ao CO₂, tendo em vista que maiores emissões deste gás estão associadas a um processo ineficiente de queima, o que ocorre justamente nas regiões de mistura pobre [17].

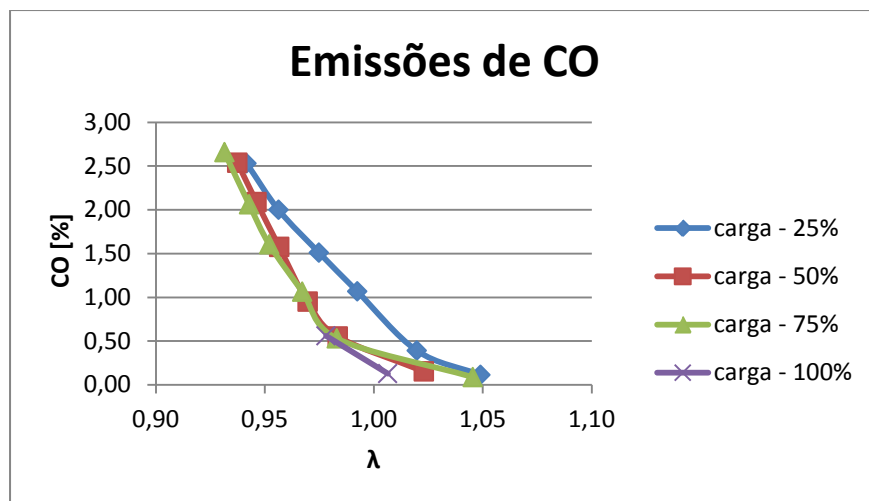


Figura 5.8 Emissões de CO em função da razão λ

Acima podemos observar os baixos níveis de CO apresentados para razão λ próxima a 1.

5.2.3. EMISSÕES DE HC

Altas taxas de emissão de hidrocarbonetos não queimados usualmente acompanham níveis altos também de CO, já que ambos provêm de processos incipientes de combustão [17]. A partida de motores a frio, por exemplo, geralmente acarreta maiores níveis de CO e HC presentes nos gases de exaustão, já que as baixas temperaturas e pressões alcançadas no cilindro se mostram insuficientes para manter a queima completa do combustível.

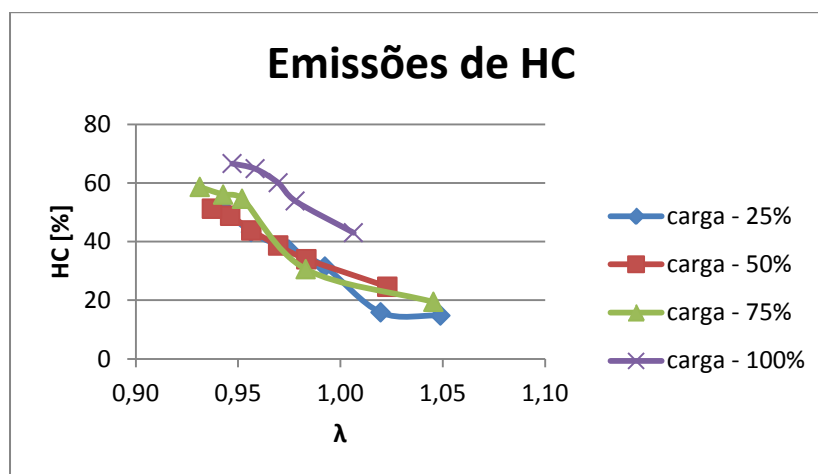


Figura 5.9 Emissões de HC em função da razão λ

Na figura acima podemos ver o declínio dos níveis de HC acompanhando o aumento da razão λ . Comportamento idêntico pode ser observado no estudo desenvolvido por Crookes [9].

5.2.4. EMISSÕES DE NO_x

Podemos observar o aumento das emissões de NO_x para o motor operando com misturas ricas. Como explicado anteriormente, a formação do NO_x está relacionado a maior liberação de calor na combustão e, conseqüentemente, as maiores temperaturas atingidas [23].

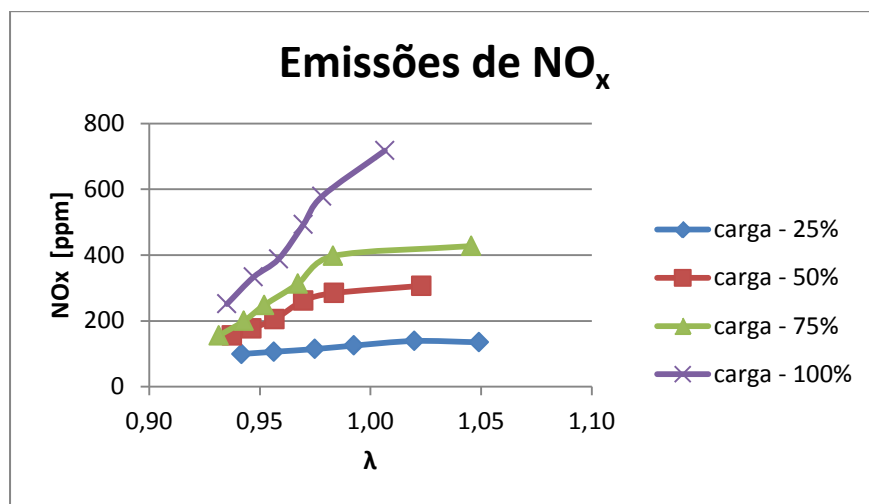


Figura 5.10 Emissões de NO_x em função da razão λ

5.2.5. CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL E EFICIÊNCIA GLOBAL

Porpatham et al. [8] mostraram em seu estudo que o aumento da relação A/C leva ao aumento na potência indicada, com o pico usualmente localizado em regiões de mistura levemente ricas. Podemos observar que esse aumento na potência se reflete no CEC e η_g do motor, como mostrado nas figuras a seguir:

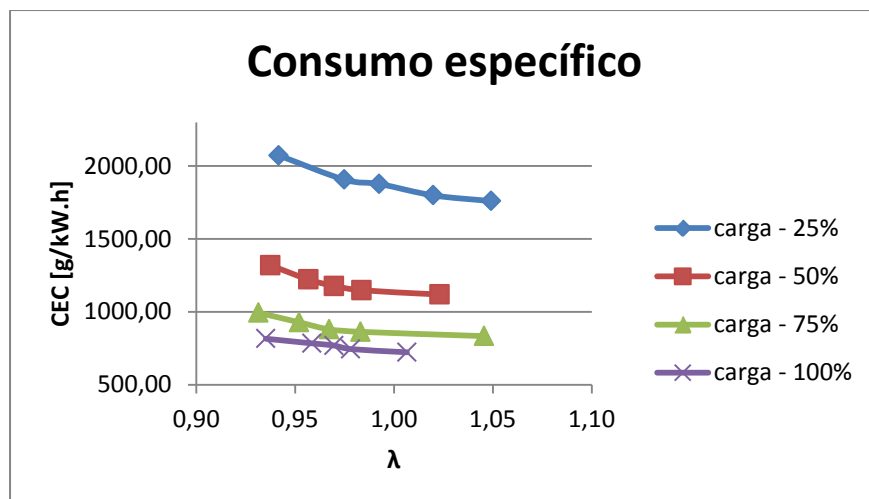


Figura 5.11 Consumo específico em função da razão λ

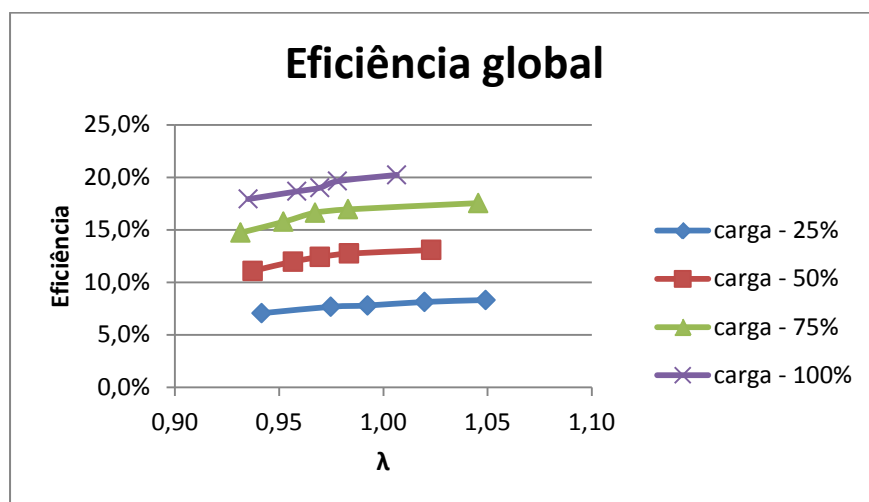


Figura 5.12 Eficiência global em função da razão λ

5.3. ENSAIOS COM BIOGÁS – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO AVANÇO DE IGNIÇÃO

O capítulo a seguir tem como objetivo estudar a influência do avanço de ignição nas emissões e desempenho do motor operando com biogás.

5.3.1. EMISSÕES DE CO₂

Podemos perceber pela análise da figura abaixo que para o motor operando em 25, 50 e 75% da carga máxima, as maiores emissões de CO₂ se encontram no avanço de ignição de 31° apms, indicando a melhor combustão do biogás para esse ponto.

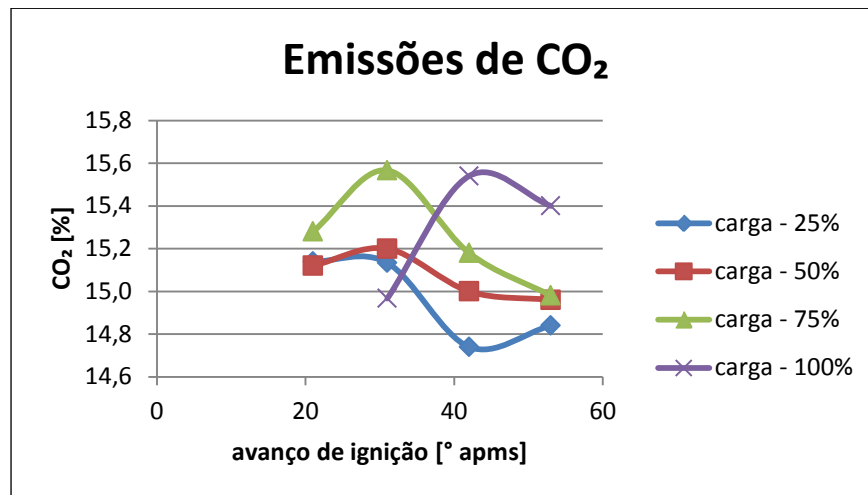


Figura 5.13 Emissões de CO₂ em função do avanço de ignição

5.3.2. EMISSÕES DE CO

Como já mencionado anteriormente, as emissões de CO₂ e CO seguem tendências inversas, sendo que ambas indicam o quão completa está sendo a queima do combustível. Percebemos na figura abaixo que para todas as cargas, com exceção da carga máxima, os menores níveis de emissões de CO são encontrados para o avanço de 31° apms.

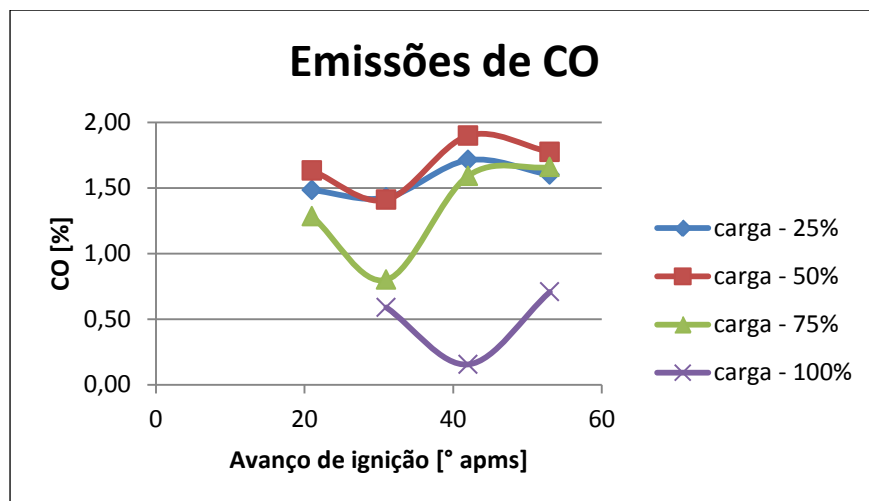


Figura 5.14 Emissões de CO em função do avanço de ignição

5.3.3. EMISSÕES DE HC

A figura abaixo apresenta a evolução das emissões de HC conforme aumentamos o avanço de ignição. Podemos observar que os maiores níveis de HC são encontrados para o ponto de ignição de 53°. Os menores níveis de emissões foram encontrados para o avanço de ignição original, de 31°.

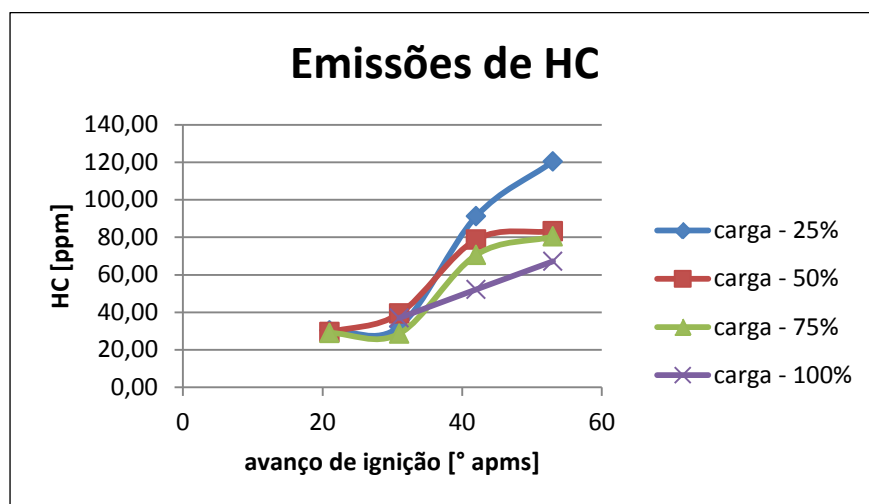


Figura 5.15 Emissões de HC em função do avanço de ignição

5.3.4. EMISSÕES DE NO_x

Podemos observar na figura abaixo o aumento das emissões de NO_x para maiores avanços de ignição. Por ser um gás com baixa velocidade de propagação de chama [10], o biogás usualmente apresenta maiores temperaturas de combustão para pontos de ignição adiantados, o que causará o aumento nos níveis de NO_x.

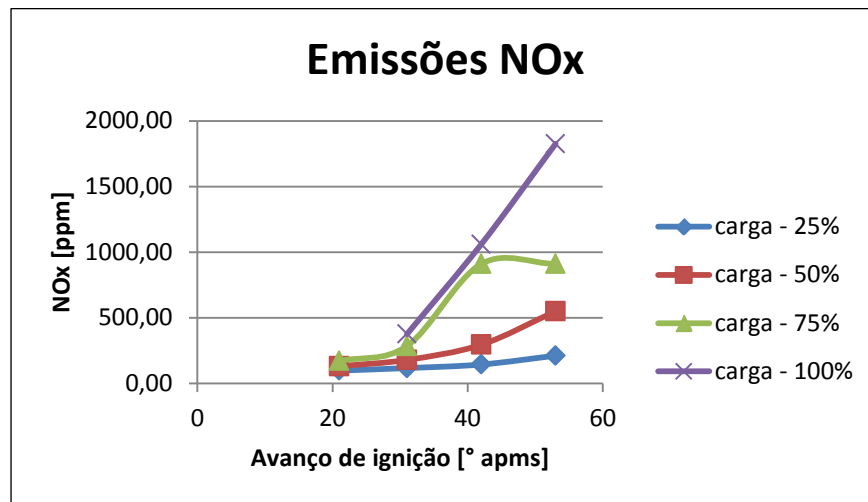


Figura 5.16 Emissões de NO_x em função do avanço de ignição

5.3.5. CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL E EFICIÊNCIA GLOBAL

As figuras a seguir mostram o menor CEC (maior eficiência global) para o motor operando com o avanço de 53° apms, com exceção para a operação em carga máxima. Como mencionado anteriormente, o biogás apresenta baixa velocidade de propagação de chama, logo, maiores avanços tendem a minimizar os efeitos dessa propriedade, levando a ganhos no desempenho do motor.

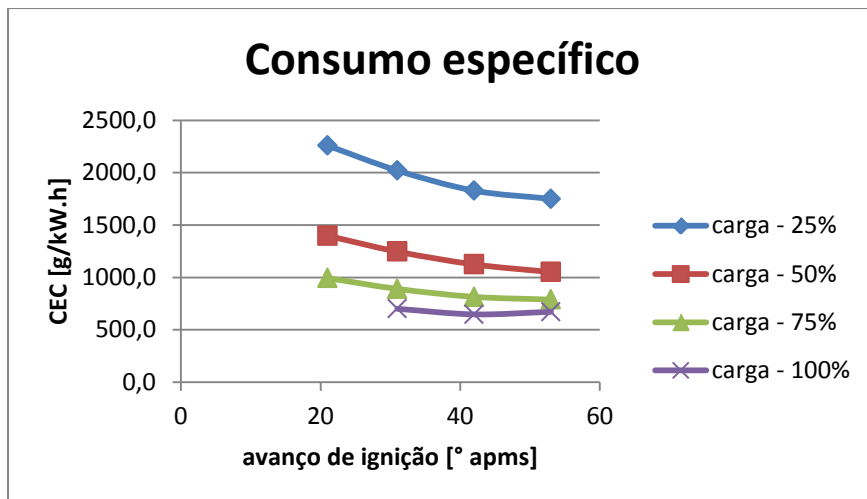


Figura 5.17 Consumo específico em função do avanço de ignição

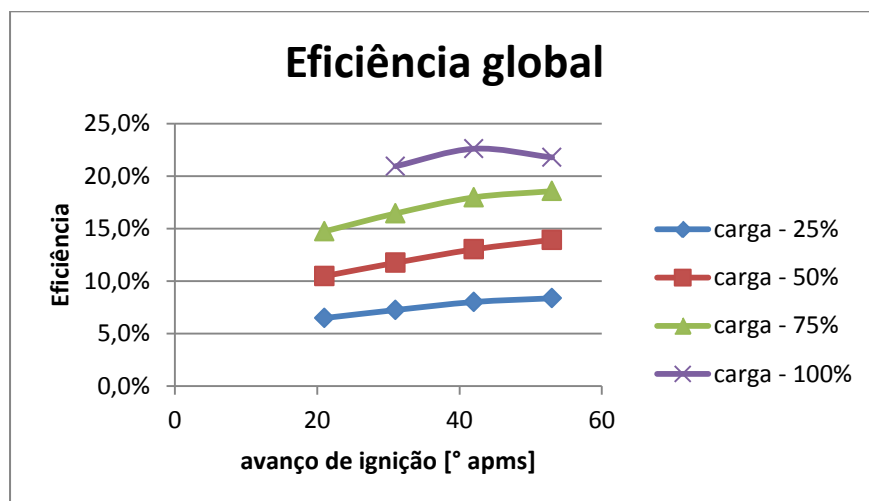


Figura 5.18 Eficiência global em função do avanço de ignição

6. CONCLUSÃO

Devido ao baixo poder calorífico (PCI), o biogás apresentou maior consumo de combustível em relação ao mesmo motor operando com gasolina ou gás natural.

Os valores de emissões nos gases de exaustão nos testes realizados com biogás foram inferiores aos do mesmo motor operando com gasolina e semelhantes aos resultados obtidos com o gás natural. A exceção é o caso das emissões de CO₂, já presente em grande quantidade no biogás. No caso do NO_x, o gás natural apresenta valores mais elevados devido as temperaturas mais altas atingidas durante seu processo de queima, enquanto que se mantem praticamente constante para a gasolina e o biogás, uma vez que o CO₂ presente no gás de esgoto tem um efeito diluente, diminuindo a intensidade de sua combustão.

Na segunda etapa dos ensaios, pode-se constatar que é possível amenizar as emissões de HC e de CO diminuindo a restrição à entrada de ar no misturador, ou seja, aumentando-se a razão λ . O fato pode ser explicado pela melhora na qualidade da combustão, já que nessas condições o motor opera mais próximo da região estequiométrica. As taxas de CO₂ e NO_x seguem tendência inversa, aumentando de valor.

Na terceira etapa o menor consumo específico de combustível é encontrado para o maior avanço de ignição (53° apms), o que significa que para uma determinada potência, este avanço implica em menor consumo. Todavia, a operação nesse ponto está associada também a maiores níveis de emissões.

Já as emissões de CO e HC são otimizadas no ponto de avanço original do motor, de 31° apms. Os valores mínimos de NO_x são encontrados em 21° apms, onde a combustão se apresenta ainda bastante incipiente, enquanto os níveis mais baixos de CO₂ são encontrados no avanço de 53° apms.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. F. DA COSTA, Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto, São Paulo: USP, 2006, p. 194.
- [2] A. T. JUNIOR, Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto, São Paulo: UNESP, 2008.
- [3] J. HUANG e R. CROOKES, “Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine,” *Fuel*, vol. 77, pp. 1793-1801, 1998.
- [4] BP, “BP Statistical Review of World Energy,” 2012.
- [5] EPE, “Balanço Energético Nacional 2013,” Rio de Janeiro, 2013.
- [6] S. B. SHRESTHA e G. NARAYANAN, “Landfill gas with hydrogen addition – A fuel for SI engines,” *Fuel*, vol. 87, pp. 3616-3626, 2008.
- [7] R. G. SOUZA, F. M. SILVA e A. C. BASTOS, “Desempenho de um conjunto motogerador adaptado a biogás,” *Ciência e Agrotecnologia*, vol. 34, pp. 190-195, jan./fev. 2010.
- [8] E. PORPATHAM, A. RAMESH e B. NAGALINGAM, “Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine,” *Fuel*, vol. 87, pp. 1651-1659, 2008.
- [9] R. CROOKES, “Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, pp. 461-468, 2006.
- [10] E. PORPATHAM, A. RAMESH e B. NAGALINGAM, “Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 2057-2065, 2007.
- [11] K. SUBRAMANIAN, V. MATHAD, V. VOJAY e P. SUBBARAO, “Comparative evaluation of emission and fuel economy of an automotive spark ignition vehicle fuelled with methane enriched biogas and CNG using chassis dynamometer,” *Applied Energy*, vol. 105, pp. 17-29, 2013.
- [12] S. T. COELHO, S. M. VELÁZQUEZ, V. PECORA e F. C. DE ABREU, “Geração de

energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto,” em *XI Congresso Brasileiro de Energia*, Rio de Janeiro, 2006.

- [13] E. PORPATHAM, A. RAMESH e B. NAGALINGAM, “Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine,” *Fuel*, vol. 95, pp. 247-256, 2012.
- [14] *Manual do motor Branco - B4T - 5000 BIO*.
- [15] F. DANTAS e E. DE OLIVEIRA, “Relatório de ensaio N° 345,” Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, 2011.
- [16] T. KORAKIANITIS, A. NAMASIVAYAM e R. CROOKES, “Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37, pp. 89-112, 2011.
- [17] I. D. BEDOYA, S. SAXENA, F. J. CADAVID, R. W. DIBBLE and M. WISSINK, “Experimental study of biogas combustion in a HCCI engine for power generation with high indicated efficiency and ultra-low NO_x emissions,” *Energy Conversion and Management*, vol. 53, pp. 154-162, 2012.
- [18] J. B. HEYWOOD, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 1^a ed., New York: McGraw-Hill, Inc., 1988.
- [19] C. PARK, S. PARK, Y. LEE, C. KIM, S. LEE e Y. MORIYOSHI, “Performance and emission characteristics of a SI engine fueled by low calorific biogas blended with hydrogen,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 10080-10088, 2011.
- [20] B. GÖKALP, H. SOYHAN, I. H. SARAÇ, D. BOSTAN e Y. SENGÜN, “Biodiesel Addition to Standard Diesel Fuels and Marine Fuels Used in a Diesel Engine: Effects on Emission Characteristics and First and Second-Law Efficiencies,” *Energy & Fuels*, vol. 23, p. 1849–1857, 2009.
- [21] C. D. RAKOPOULOS, K. A. ANTONOPOULOS, D. C. RAKOPOULOS, D. T. HOUNTALAS e E. G. GIAKOUMIS, “Comparative performance and emissions study of a direct injection diesel engine using blends of diesel fuel with vegetable oils or biodiesels of various origins,” *Energy Conversion and Management*, vol. 47, p. 3272–

3287, 2006.

[22] K. VON MITZLAFF, Engines for biogas, Viesbaden: GTZ-GATE, 1988.

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

Apêndice A - Tabela de Emissões e Consumo para Gasolina

Gasolina												
Carga	Tempo	Tensão	corrente	freq	emissões					p inicial	p final	Consumo
	minutos	volts	amperes	Hz	CO%	CO ₂ %	HC ppm	Nox ppm	O ₂ %	gramas	gramas	g/min
25%	1	122	7,6	60,2	8,23	9,1	150	112	1,5	769,28	746,59	22,69
	2	122	7,5	59,8	8,48	9,0	153	122	1,5	739,87	717,46	22,41
	3	122	7,5	59,9	8,46	8,9	154	123	1,5	712,02	689,64	22,38
	4	122	7,5	60,0	8,79	8,8	151	120	1,4	684,51	662,09	22,42
	5	122	7,5	59,8	8,55	8,7	155	121	1,5	657,71	635,29	22,42
50%	1	120	18,3	59,3	8,82	9,4	196	154	0,5	601,85	574,52	27,33
	2	120	18,3	59,2	9,19	9,5	190	183	0,2	563,82	535,46	28,36
	3	120	18,3	59,2	9,13	9,5	175	184	0,2	531,69	503,34	28,35
	4	120	18,3	59,2	9,31	9,4	181	181	0,2	499,30	471,09	28,21
	5	120	18,3	59,5	9,31	9,4	175	175	0,2	465,06	436,25	28,81
75%	1	121	25,3	59,0	8,90	9,7	172	227	0,1	415,90	383,99	31,91
	2	121	25,4	58,8	9,07	9,6	177	229	0,1	380,44	349,12	31,32
	3	121	25,0	58,9	9,18	9,5	164	212	0,1	343,91	312,20	31,71
	4	121	25,4	58,8	9,27	9,5	158	213	0,1	303,91	272,22	31,69
	5	121	25,4	58,9	9,17	9,5	162	210	0,1	268,03	236,26	31,77
100%	1	121	33,3	58,6	9,29	9,4	197	229	0,2	818,06	779,15	38,91
	2	121	33,3	58,5	9,74	9,2	176	232	0,1	761,43	722,90	38,53
	3	121	33,1	58,6	9,93	9,1	170	220	0,1	717,31	677,96	39,35
	4	121	33,3	58,7	10,01	9,0	167	217	0,1	665,10	628,88	36,22
	5	121	33,3	58,7	10,08	8,9	173	209	0,1	624,49	587,16	37,33

Apêndice B - Tabela de Emissões e Consumo para GNV

GNV												
carga	Tempo	Tensão	corrente	freq	emissões					v inicial	v final	consumo
	minutos	volts	amperes	Hz	CO%	CO ₂ %	HC ppm	Nox ppm	O ₂ %	cm ³	cm ³	cm ³ /min
25%	1	122	7,6	59,5	3,86	8,3	249	145	1,4	200	228	28
	2	122	7,6	59,5	1,24	9,9	48	207	2	570	592	22
	3	122	7,5	59,9	3,20	9,2	62	186	1,1	835	870	35
	4	122	7,5	60,0	2,93	9,4	56	210	1,1	75	98	23
	5	122	7,5	59,9	2,18	9,6	46	207	1,6	335	358	23
50%	1	120	18,2	58,9	3,17	9,6	117	356	0,3	250	273	23
	2	120	18,2	59,1	0,74	11,0	44	663	0,8	610	638	28
	3	120	18,2	59,3	2,44	10,1	62	440	0,3	875	905	30
	4	120	18,2	59,4	2,05	10,3	51	470	0,4	120	149	29
	5	120	18,2	59,4	1,55	10,6	47	573	0,5	380	409	29
75%	1	122	25,2	58,6	2,20	10,2	77	590	0,3	300	335	35
	2	121	25,1	58,8	1,48	10,6	57	830	0,4	665	698	33
	3	121	25,1	58,9	1,50	10,6	53	850	0,5	925	958	33
	4	121	25,2	59,0	1,27	10,8	48	920	0,5	180	213	33
	5	121	25	59,0	1,75	10,6	63	818	0,4	440	474	34
100%	1	121	33,2	57,8	2,26	9,9	65	870	0,4	400	443	43
	2	121	33,3	57,7	2,26	10,1	56	980	0,2	750	793	43
	3	121	33,3	57,9	2,48	10,0	55	970	0,5	1	44	43
	4	121	33,3	58,0	1,86	10,4	53	1050	0,6	245	286	41
	5	121	33,4	57,8	1,82	10,3	50	1050	0,6	560	602	42

Apêndice C - Tabela de Emissões e Consumo para Biogás

BIOGÁS												
carga	tempo	Tensão	corrente	freq	Emissões					v inicial	v final	consumo
	minutos	volts	amperes	Hz	CO%	CO ₂ %	HC ppm	Nox ppm	O ₂ %	cm ³	cm ³	cm ³ /min
25%	1	122	7,5	59,1	2,49	13,5	54	113	0,6	750	787	37
	2	122	7,5	59,4	1,89	14,1	45	120	0,6	485	521	36
	3	122	7,5	59,2	2,01	14,1	43	123	0,6	530	567	37
	4	122	7,5	59,4	2,02	14,0	36	120	0,6	575	612	37
	5	122	7,5	59,5	1,87	14,1	37	127	0,6	620	657	37
50%	1	120	18,2	58,4	2,11	14,2	40	209	0,2	900	946	46
	2	120	18,2	58,8	2,39	13,9	50	193	0,2	870	919	49
	3	120	18,2	59,1	2,56	14,0	47	195	0,2	940	989	49
	4	120	18,2	59,2	2,48	14,0	44	199	0,2	0	49	49
	5	120	18,2	59,3	2,50	13,9	44	193	0,2	65	114	49
75%	1	121	25,3	58,1	2,22	14,1	29	286	0,2	20	73	53
	2	121	25,4	58,6	2,76	13,8	47	230	0,2	200	256	56
	3	121	25,4	58,3	2,85	13,8	48	259	0,2	270	326	56
	4	121	25,3	58,5	2,88	13,8	49	260	0,2	340	396	56
	5	121	25,4	58,3	2,91	13,8	49	256	0,2	410	467	57
100%	1	121	33,5	56,8	2,48	13,9	42	414	0,2	200	276	76
	2	121	33,5	56,9	2,70	13,9	106	435	0,2	40	107	67
	3	121	33,5	57,0	2,73	13,9	93	422	0,2	135	203	68
	4	121	33,5	57,1	2,67	14,0	76	424	0,2	215	282	67
	5	121	33,5	57,3	2,79	13,9	72	426	0,2	300	367	67

Apêndice D - Tabela das médias de emissões para o biogás – variação da razão λ

- Emissões de CO₂

carga - 25%	
λ	CO ₂ [%]
1,05	14,6
1,02	14,8
0,99	14,4
0,97	14,5
0,96	14,3
0,94	14,1

carga - 50%	
λ	CO ₂ [%]
1,02	14,8
0,98	15,1
0,97	14,9
0,96	14,6
0,95	14,3
0,94	14,1

carga - 75%	
λ	CO ₂ [%]
1,05	14,48
0,98	15,08
0,97	14,88
0,95	14,74
0,94	14,44
0,93	14,2

carga - 100%	
λ	CO ₂ [%]
1,01	15,2
0,98	15,28
0,97	15,1
0,96	14,9
0,95	14,64
0,94	14,36

- Emissões de CO

carga - 25%	
λ	CO [%]
1,05	0,11
1,02	0,39
0,99	1,07
0,97	1,51
0,96	2,00
0,94	2,53

carga - 50%	
λ	CO [%]
1,02	0,15
0,98	0,55
0,97	0,95
0,96	1,57
0,95	2,09
0,94	2,54

carga - 75%	
λ	CO [%]
1,05	0,09
0,98	0,53
0,97	1,06
0,95	1,60
0,94	2,06
0,93	2,66

carga - 100%	
λ	CO [%]
1,01	0,13
0,98	0,56
0,97	0,96
0,96	1,50
0,95	1,98
0,94	2,47

- Emissões de HC

carga - 25%	
λ	HC [ppm]
1,05	14,8
1,02	15,8
0,99	31,4
0,97	37,2
0,96	43,2
0,94	52,2

carga - 50%	
λ	HC [ppm]
1,02	24,6
0,98	34
0,97	38,6
0,96	43,8
0,95	48,8
0,94	51,2

carga - 75%	
λ	HC [ppm]
1,05	19,4
0,98	30,6
0,95	54,6
0,94	56
0,93	58,6

carga - 100%	
λ	HC [ppm]
1,01	43
0,98	53,8
0,97	60
0,96	64,8
0,95	66,6

- Emissões de NO_x

carga - 25%	
λ	NOx [ppm]
1,05	135
1,02	139
0,99	125
0,97	114,4
0,96	106,2
0,94	99,4

carga - 50%	
λ	NOx [ppm]
1,02	306,6
0,98	284,6
0,97	261,6
0,96	204,6
0,95	177,2
0,94	155,8

carga - 75%	
λ	NOx [ppm]
1,05	427,4
0,98	397,2
0,97	313
0,95	248
0,94	199,8
0,93	155,2

carga - 100%	
λ	NOx [ppm]
1,01	717,6
0,98	578,2
0,97	492,8
0,96	388
0,95	333,2
0,94	251,2

Apêndice E - Tabela das médias de emissões para o biogás – variação do avanço de ignição

Emissões CO ₂ [%]				
Ponto de ignição [°]	Cargas [%]			
	25	50	75	100
21	15,1	15,1	15,3	-
31	15,1	15,2	15,6	15,0
42	14,7	15,0	15,2	15,5
53	14,8	15,0	15,0	15,4

Emissões CO [%]				
Ponto de ignição [°]	Cargas [%]			
	25	50	75	100
21	1,48	1,63	1,28	-
31	1,43	1,41	0,80	0,59
42	1,71	1,90	1,59	0,16
53	1,60	1,77	1,66	0,71

Emissões HC [ppm]				
Ponto de ignição [°]	Cargas [%]			
	25	50	75	100
21	30,40	29,40	29,00	-
31	32,33	39,33	28,67	37
42	91,20	78,80	70,60	52,20
53	120,40	83,20	80,40	67,20

Emissões NOx [ppm]

Ponto de ignição [°]	Cargas [%]			
	25	50	75	100
21	98,40	131,60	171,40	-
31	117,33	179,67	285,33	376,00
42	144,60	295,60	910,80	1060,60
53	211,80	550,20	910,80	1826,00