



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - PPGEM

Dissertação de Mestrado

Análise da viabilidade técnica do uso de biodiesel e gás natural em motores do ciclo diesel operando no modo dual

Autor: Luciano Venceslau Rodrigues

Campina Grande, Dezembro 2012.
Paraíba - Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Análise da viabilidade técnica do uso de biodiesel e gás natural em motores do ciclo diesel operando no modo dual

Autor: Luciano Venceslau Rodrigues
Orientador: Yoge Jerônimo Ramos da Costa

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Fenômenos de Transporte e Energia

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Mecânica.

Campina Grande, Dezembro de 2012.
PB - Brasil



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R696a Rodrigues, Luciano Venceslau.
Análise da viabilidade técnica do uso de biodiesel e gás natural em motores do ciclo diesel operando no modo dual / Luciano Venceslau Rodrigues. - Campina Grande, 2012.
96 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.
Orientador: Prof. Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa.

Referências.

1. Energia Alternativa. 2. Motor Dual. 3. Biodiesel. 4. Gás Natural.
I. Título.

CDU 620.92(043)

ANÁLISE DA VIABILIDADE TECNICA DO USO DE BIODIESEL E GÁS NATURAL
EM MOTORES DO CICLO DIESEL OPERANDO NO MODO DUAL

LUCIANO VENCESLAU RODRIGUES

Dissertação Aprovada em 03/12/2012 pela banca examinadora constituída dos
seguintes membros:



Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa

Orientador

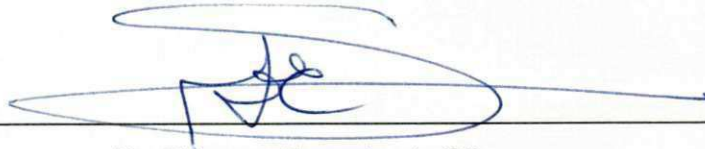
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Zaqueu Ernesto da Silva

Examinador Externo

UFPB

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Antonio Rodrigues da Silva e Neusa Venceslau Rodrigues, as minhas irmãs, e com um carinho muito especial, a minha esposa Mary Janaina Henrique Costa Venceslau e aos meus queridos filhos, Pedro Henrique Costa Venceslau e Maria Júlia Costa Venceslau.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, por ter me concedido a graça de alcançar esse grande sonho, e a possibilidade de ampliar meus conhecimentos.

Ao professor Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa, pela grande dedicação e estímulo para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, irmãs, esposa e filhos pelo incentivo em todos os momentos.

A UFCG, DEM, GEBRA, BRASYMPE, ANEEL, PRH 42, ANP, CNPq e FINEP, pelo suporte e apoio financeiro concedido.

Aos colegas professores das Unidades Acadêmicas de Engenharia Mecânica e Elétrica da UFCG, os quais contribuíram com este trabalho.

Aos demais colegas de mestrado, pelo auxílio e apoio durante as pesquisas e a todos que colaboraram direta ou indiretamente para conclusão deste trabalho.

“O verdadeiro otimista tem o dom de saber que algo vai dar certo não por presunção, mas simplesmente por acreditar que a força que define o que vai dar certo ou errado em sua vida está em seu interior, em suas competências, em sua fé.”
(Luis Alves)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

| | |
|-----------------------------|----|
| 1.1. Contextualização | 17 |
| 1.2. Objetivos | 20 |
| 1.3. Motivação | 20 |

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

| | |
|---|----|
| 2.1. Motores de Combustão Interna – MCI | 22 |
| 2.1.1. Processo de combustão nos MCI's | 26 |
| 2.1.2. Processo de combustão nos Motores Diesel | 28 |
| 2.2. Tecnologia dos Motores Dual | 29 |
| 2.3. Combustíveis | 31 |
| 2.3.1. Óleo Diesel | 36 |
| 2.3.2. Biocombustíveis e Biodiesel | 38 |
| 2.3.3. Gás Natural – GN | 44 |

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

| | |
|---|----|
| 3.1. Materiais – Combustíveis | 50 |
| 3.1.1. Óleo diesel | 50 |
| 3.1.2. Biodiesel | 51 |
| 3.1.3. Gás Natural | 52 |
| 3.2. Materiais – Equipamentos | 53 |
| 3.2.1 Sistema motor-gerador | 54 |
| 3.2.2. Sistema de aquisição e armazenamento de dados | 54 |
| 3.2.3. Sistema de pesagem do combustível líquido | 56 |
| 3.2.4. Sistema de medição de temperatura e pressão no motor-gerador | 57 |
| 3.2.5. Sistema de análise dos gases de escape | 61 |
| 3.2.6. Sistema de medição de vazão de ar | 62 |
| 3.2.7. Sistema de medição da vazão do gás natural | 63 |
| 3.2.8. Sistema de redução de pressão do gás natural | 64 |
| 3.2.9. Sistema de armazenagem de gás natural | 65 |
| 3.2.10. Unidade de controle de mistura ar-gás para o motor | 65 |
| 3.2.11. Sistema de medição de potência no motor-gerador | 66 |

CAPÍTULO 4 – COMENTÁRIOS E RESULTADOS OBTIDOS

| | |
|--|----|
| 4.1. Comentários e discussões dos resultados obtidos | 68 |
| 4.1.1. Dióxido de Enxofre | 69 |
| 4.1.2. Dióxido de Carbono | 70 |
| 4.1.3. Monóxido de Carbono | 71 |
| 4.1.4. Óxidos Nítricos | 73 |
| 4.1.5. Oxigênio | 74 |

CAPÍTULO 5

| | |
|---|----|
| 5.1. Conclusões | 76 |
| 5.2. Recomendações para trabalhos futuros | 77 |

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 79 |

MATERIAL DE APOIO CONSULTADO 83 |

ANEXOS 85 |

APÊNDICES 90 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Oferta de energia – 2011 (em Mtep) | 23 |
| Tabela 2.2 – Especificações de um motor Diesel novo | 27 |
| Tabela 2.3 – Padrão Nacional da qualidade do ar | 28 |
| Tabela 2.4 – Classificação dos Combustíveis | 33 |
| Tabela 2.5 – Elementos presentes em combustíveis industriais | 33 |
| Tabela 2.6 – Características e especificações do óleo diesel | 37 |
| Tabela 2.7 – Especificação para o Gás Natural Comercializado no Brasil | 46 |
| Tabela 3.1 – Composição do diesel em base mássica | 51 |
| Tabela 3.2 – Propriedades do biodiesel de óleo de soja | 52 |
| Tabela 3.3 – Composição do gás natural do gasoduto Nordeste | 52 |
| Tabela 3.4 – Propriedades do gás natural do gasoduto Nordeste | 53 |
| Tabela 3.5 – Especificações técnicas do medidor de vazão marca Nykon Dwyler, modelo mtg100f1seerfn/mrtb3..... | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel | 40 |
| Figura 2.2 – Produção de Oleaginosas no Brasil..... | 41 |
| Figura 2.3 – Fonte de obtenção de biodiesel no Brasil..... | 42 |
| Figura 3.1 – Laboratório de Termogeração da UFCG | 53 |
| Figura 3.2 - Sistema eletro-mecânico | 54 |
| Figura 3.3 – Sistema de aquisição de dados | 55 |
| Figura 3.4 – Interface gráfica do sistema de aquisição e armazenamento de dados | 55 |
| Figura 3.5a – Sistema de pesagem do combustível diesel/biodiesel | 56 |
| Figura 3.5b – Sistema de controle de pesagem do combustível diesel/biodiesel | 56 |
| Figura 3.6 – Termopares instalados no coletor de escapamento | 57 |
| Figura 3.7 – Sensor de medição de pressão e temperatura do ar na entrada do motor | 58 |
| Figura 3.8 – Sensores de medição de pressão e temperatura após o turbo e <i>aftercooler</i> | 58 |
| Figura 3.9 – Transdutor para medição da pressão do óleo lubrificante | 59 |
| Figura 3.10 – Termopar para medição da temperatura do óleo lubrificante | 59 |
| Figura 3.11 – Termopar instalado a montante do radiador | 60 |
| Figura 3.12 – Termopar instalado a jusante do radiador | 60 |
| Figura 3.13 – Sistema de medição das condições atmosférica no laboratório | 61 |
| Figura 3.14 – Sonda do analisador de gases | 61 |
| Figura 3.15 – Analisador de gases/modelo K 940 | 62 |
| Figura 3.16 – Medidor de vazão de ar – Tipo turbina | 63 |
| Figura 3.17 – Medidor de vazão de gás – Tipo turbina | 64 |
| Figura 3.18 – Redutor de pressão de gás natural | 64 |
| Figura 3.19 – Sistema de armazenagem de gás natural | 65 |
| Figura 3.20 – Controle de mistura ar-gás para o motor (kit gás) | 66 |
| Figura 3.21 – Banco de carga ALFA OHMIC/150 KW | 66 |
| Figura 4.1 – Dióxido de enxofre x Potência | 69 |
| Figura 4.2 – Dióxido de carbono x Potência | 71 |
| Figura 4.3 – Monóxido de carbono x Potência | 72 |
| Figura 4.4 – Óxidos nítricos x Potência | 73 |
| Figura 4.5 – Oxigênio x Potência | 74 |
| Figura 4.6 – Eficiência de Combustão x Potência | 75 |

NOMENCLATURA

| | | |
|-----------------|-------------------------|----------------------|
| Ar | Ar atmosférico | [-] |
| cc | Cilindrada | [cm ³] |
| d | Densidade | [kg/m ³] |
| HC | Hidrocarbonetos | [-] |
| ρ_{ar} | Densidade do ar | [kg/m ³] |
| \overline{NC} | Número de cetano | [] |
| \overline{NO} | Número de octano | [] |
| P | Pressão | [Pa] |
| T | Temperatura | [°C] |
| TC | Taxa de compressão | [] |
| V | Volume | [m ³] |
| W | Trabalho | [kW] |
| \dot{W} | Potência | [W] |
| η | Eficiência | [%] |
| η_c | Eficiência da combustão | [%] |
| η_t | Eficiência térmica | [%] |
| η_v | Rendimento volumétrico | [%] |

SÍMBOLOS E SIGLAS

| | |
|----------------|---|
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| ANEEL | Agencia Nacional de Energia Elétrica |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| $C_{12}H_{26}$ | Fórmula química do óleo diesel deste trabalho |
| CH_4 | Metano |
| CO | Monóxido de carbono |
| CO_2 | Dióxido de carbono (gás carbônico) |
| CETENE | Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste |
| CONAMA | Conselho Nacional de Meio Ambiente |
| CTGAS | Centro de Tecnologia do Gás |
| C_xH_y | Hidrocarboneto |
| DEE | Departamento de Engenharia Elétrica |
| EPA | Agencia de proteção ao meio ambiente – Estados Unidos |
| EPE | Empresa de Pesquisa e Energia |
| Eq. | Equação |
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| GN | Gás Natural |
| GNV | Gás Natural Veicular |
| GNL | Gás Natural Liquefeito |
| H_2 | Hidrogênio |
| H_2O | Água |
| H_2SO_4 | Ácido sulfúrico |
| HC | Hidrocarbonetos não queimados |
| HP | Horse power |
| IEMA | Instituto Estadual de Meio Ambiente |
| N_2 | Nitrogênio |
| NO | Monóxido de nitrogênio |
| NO_2 | Dióxido de nitrogênio |
| NO_x | Óxidos de nitrogênio |
| MCI | Motor de Combustão Interna |
| MCE | Motor de Combustão Externa |

| | |
|-------------------------------|---|
| Mtep | Milhões de toneladas equivalentes de petróleo |
| O ₂ | Oxigênio |
| O ₃ | Ozônio |
| PBGÁS | Companhia Paraibana de Gás |
| PCI | Poder Calorífico Inferior |
| PCS | Poder Calorífico Superior |
| ppb | Partes por bilhão |
| PM | Material Particulado |
| PMI | Ponto Morto Inferior |
| PMS | Ponto Morto Superior |
| PROALCOOL | Programa Nacional do Álcool |
| PROCONVE | Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores |
| SO ₂ | Dióxido de enxofre (Anidrido sulfuroso) |
| SO ₃ | Óxido sulfúrico (Trióxido de enxofre) |
| UAEM | Unidade acadêmica de engenharia mecânica |
| UPGN | Unidade de Processamento de Gás Natural |
| UFCEG | Universidade Federal de Campina Grande |
| V ₂ O ₅ | Pentóxido de vanádio |
| μ | micro = 10 ⁻⁶ |

RESUMO

RODRIGUES, Luciano Venceslau; *Análise da viabilidade técnica do uso de biodiesel e gás natural em motores do ciclo diesel operando no modo dual*; Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

Os motores de combustão interna são uns dos principais causadores da elevação dos índices de poluição do planeta, assim, diante de tal situação e onde a vida sem geração de energia se tornaria complicada, a procura por fontes energéticas alternativas que minimizem tais questões é uma constante no nosso dia-a-dia. Nos motores do ciclo diesel, operações com o diesel e gás natural estão sendo testadas para reduzir as emissões de poluentes para o meio ambiente, como o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂) e o dióxido de enxofre (SO₂). Neste sentido, este trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente as emissões desses e outros gases a partir de um motor de combustão interna do ciclo diesel, operando com misturas de biodiesel e gás natural, e comparar os resultados obtidos com os dados coletados com o motor operando com diesel e gás natural. O sistema térmico experimental é composto de um motor de combustão interna acoplado a um gerador elétrico, instrumentado com sensores de temperatura, pressão, medidores de vazão de ar, diesel e gás natural, sondas de gás e sistema de absorção de potência constituído por um banco de carga e seu sistema de controle. Para análise energética do motor foram obtidos valores da eficiência de combustão através do analisador de gases. Com o decorrer dos trabalhos, verificou-se uma

redução considerável da emissão de gases poluentes para a atmosfera e com relação à eficiência e ao consumo de combustível, as variações foram aceitáveis.

Palavras Chave: Energia alternativa, motor dual, biodiesel, gás natural.

ABSTRACT

RODRIGUES, Luciano Venceslau; *Analysis of the technical feasibility of using biodiesel and natural gas in diesel engines operating in dual mode*; Campina Grande: Pós-Graduate in Mechanical Engineering, Federal University of Campina Grande, 2012.

The internal combustion engines are a major cause of rising levels of pollution of the planet, thus facing such situation and where life without energy generation would become complicated, the demand for alternative energy sources that minimize such issues is a constant in our day-to-day. In diesel engines, operations with diesel and natural gas are being tested to reduce emissions of pollutants to the environment, such as carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂) and sulfur dioxide (SO₂). Thus, this work aims to study experimentally these emissions and other gases from an internal combustion engine diesel cycle, operating with biodiesel blends and natural gas, and compare the results with data collected with the engine running with diesel. The thermal system is composed of an experimental internal combustion engine coupled to an electric generator, instrumented with sensors for temperature, pressure, air flow meters, diesel and natural gas probe and gas absorption system consisting of a power bank load and its control system. For energy analysis engine efficiency values were obtained through the combustion gas analyzer. In the course of the work, there was a considerable reduction of greenhouse gas emissions into the atmosphere and with respect to efficiency and fuel consumption, the changes were acceptable.

Keywords: Alternative energy, dual engine, biodiesel, natural gas.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

No nosso dia-a-dia não se pode negar a importância das diversas formas de energia que nos rodeia. Por exemplo, a interrupção da energia elétrica nos dias de hoje é um dos maiores atrasos que podemos sofrer, assim, utilizamos aparelhos alternativos para geração de energia, os grupos geradores. Por sua vez, os grupos geradores operam com motores do ciclo diesel, onde a partir da energia termodinâmica de um combustível é gerada energia elétrica. A utilização desse sistema gera resíduos que são lançados no meio ambiente, devido à combustão incompleta, necessitando que pesquisas sejam realizadas no intuito de buscar combustíveis alternativos, o desenvolvimento de novas tecnologias e aperfeiçoar os processos atuais.

Deve-se ter em mente que o diesel é um combustível não renovável, com previsão de escassez para um curto tempo, visto o seu grande consumo e esgotamento das reservas de petróleo. Outro fato importante é que alguns dos gases lançados na atmosfera, após a combustão, são os elementos principais causadores das mudanças no meio ambiente e causadores de problemas para a saúde do homem. Nesse sentido pesquisas estão sendo desenvolvidas com esse intuito, de encontrar soluções que minimizem o uso de fontes não

renováveis de energia e em paralelo reduzam os danos ambientais causados a partir da utilização dessas fontes.

Uma das formas já utilizadas nessa geração elétrica a partir de um grupo gerador, com motores de combustão interna do ciclo diesel, é a utilização desses motores operando em modo dual (biodiesel/gás natural), visto que para tanto não se faz necessária muitas mudanças na estrutura física do motor ou de seus elementos.

O gás natural (GN) está sendo utilizado atualmente em larga escala, como combustível gasoso que entra no sistema, visto as sua característica de combustível limpo, provocando uma combustão com menor emissão de poluentes, e também por ser um combustível que apresenta um maior rendimento.

O GN é um combustível fóssil, basicamente uma mistura de hidrocarbonetos leves, encontrado em rochas porosas no subsolo. Pela lei do Petróleo (Nº 9.478/97), o GN "é a porção do petróleo que existe na fase gasosa ou em solução no óleo, nas condições originais de reservatório, e que permanece no estado gasoso nas condições atmosféricas".

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (Abegás), o consumo de gás natural no Brasil subiu 35,5% em 2010 comparado a 2009, para uma média diária de 52,9 milhões de metros cúbicos. O uso de gás pela indústria cresceu 20,15%, mas o destaque ficou por conta das usinas termelétricas, que elevaram o consumo em 171%. A co-geração registrou alta de 19,6 % em 2010 e as residências demandaram mais 7,2% do combustível, seguidos do segmento comercial, com alta de 6,26% no consumo. A única queda registrada foi do setor automotivo, da ordem de 4,7%, com o gás natural veicular (GNV) perdendo espaço para outros combustíveis.

Segundo Grando (2005), com a crescente demanda por combustíveis renováveis como alternativa aos combustíveis fósseis e a maior preocupação internacional com o aquecimento global, amplificada com o Protocolo de Kyoto, evidencia os benefícios dos biocombustíveis.

Com o intuito de minimizar ao máximo a emissão de particulados, o diesel vem sendo também substituído, parcial ou totalmente, pelo biodiesel, que é um combustível renovável, de origem vegetal ou animal, obtido a partir de uma transformação conhecida como

transesterificação (processo de separação da glicerina do óleo vegetal) e apresenta algumas características que o colocam em igualdade com o combustível fóssil “diesel”, como pode ser visto pelas características apresentadas a seguir: poder calorífico semelhante ao do diesel, baixo teor de enxofre quando comparado ao diesel, alto ponto de fulgor e excelente lubricidade.

O Brasil, por ser um país tropical, possui uma grande variedade de alternativas de matéria-prima para obtenção do biocombustível, como a soja, mamona, girassol, caroço de algodão, entre outras, dependendo das peculiaridades de cada região.

De acordo com Sidhu et al. (2001), as emissões de poluentes particulados de motores operando com biodiesel, qualquer que seja o óleo vegetal empregado em sua produção, parecem ser sempre inferiores às verificadas na queima do diesel mineral.

Segundo a *Renewable Fuel Standards Program Regulatory Impact Analysis* (Análise de Impacto e Programa Regulatório de Padrões para Combustível Renovável), da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, *Environmental Protection Agency*), o relatório apresentado em fevereiro de 2010, mostra que o uso de biodiesel de óleo de soja apresenta, em média, uma redução de 57% das emissões de gases causadores do efeito estufa, em comparação com o diesel.

A partir de então se justifica estudar e aperfeiçoar meios e técnicas apropriadas na produção de energia elétrica a partir de grupos geradores que trabalham com motores do ciclo diesel, alimentados por biodiesel e GN (dual), visto que o biodiesel é um combustível renovável e biodegradável e o GN além de suas características de combustível limpo, mistura-se mais facilmente com o ar, ocasionando uma melhor e mais completa combustão, o que proporciona uma redução considerável da emissão de poluentes para a atmosfera.

Neste contexto, a utilização do sistema operando no modo dual, onde o GN é o combustível principal e o biodiesel o combustível “piloto”, é objeto de estudo deste trabalho, visando conciliar o uso mais eficiente do motor em avaliação frente a disponibilidade abundante destes combustíveis e a redução da emissão de poluentes decorrente de sua queima.

1.2. Objetivos

Visando contribuir cada vez mais com os estudos já desenvolvidos para otimização da utilização de motores diesel operando em modo dual, este trabalho tem como objetivos:

- a) Analisar o desempenho de um motor do ciclo diesel, quando submetido a variações de carga (40, 60, 80, 100 e 120 kW) e diferentes porcentagens de diesel/biodiesel, mantendo uma taxa de substituição fixa de 85% de biodiesel por o gás natural, no processo de combustão;
- b) Analisar a emissão de gases desse motor para a atmosfera, quando este operou em modo dual utilizando mistura diesel/biodiesel e GN;
- c) Traçar um perfil comparativo, com relação a emissão de gases, entre a operação dual do motor com a mistura diesel puro e GN e a mistura diesel/biodiesel e GN, fixada uma taxa de substituição de 85%;

1.3. Motivação

Este trabalho tem como motivação procurar alternativas eficientes para a redução de emissões de gases poluentes quando se gera energia elétrica a partir de um sistema motor-gerador, que opera normalmente com motor diesel, passando a operar de forma dual, com misturas de biodiesel e GN. Sua aplicabilidade pode ser como fonte primária de energia, uma vez que no Brasil os recursos para sua geração estão começando a dar sinais de colapso, tais como as dificuldades por geração hídrica, com a qual vem se verificando inúmeros *black outs* ao longo dos últimos anos, ou apenas como um sistema auxiliar para indústrias que a energia elétrica é vital para seu funcionamento, ou em plataformas de extração de petróleo onde existe dificuldade no fornecimento de energia elétrica, não deixando de expor, nesses casos, a necessidade da região possuir GN.

Deve-se ressaltar que o Brasil desfruta de posição privilegiada em sua matriz energética, com o grande número de reservas provadas com altos volumes acumulados de GN, possui uma rede de distribuição (gasodutos), os quais estão em crescente expansão e

finalmente, por ser um país tropical, possuindo condições de flora e clima favoráveis, dispõe em abundância de matéria-prima para produzir o biodiesel.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo serão abordados alguns tópicos, referentes às diversas literaturas pesquisadas que comentam sobre os elementos que compõem o tema de nosso trabalho, com destaque para: as emissões dos motores operando com diesel puro e biodiesel/GN, o rendimento desses motores operando nestas condições, o princípio de funcionamento dos motores diesel e os processos de combustão dos motores diesel operando de modo dual, assim, como os principais combustíveis utilizados nesses motores e como ocorre o processo de combustão e conseqüentemente quais os gases poluentes liberados.

2.1. Motores de Combustão Interna - MCI

Antes de conhecermos os motores térmicos, precisamos compreender o termo energia, tão presente no nosso meio, porém não é de fácil definição. Geralmente associamos energia à capacidade de um corpo realizar trabalho ou realizar uma ação, tal conceito fundamentado na física, porém utilizado em várias áreas do conhecimento como na mecânica e na eletricidade, por exemplo.

A fonte primária de energia é o sol, sua energia é responsável por quase todos os processos naturais do mundo. Existem várias formas de energia, obtidas das mais variadas formas, como a energia eólica derivada dos ventos, a energia térmica presente nos processos termodinâmicos, e a energia hidrelétrica que obtém energia elétrica a partir do aproveitamento do potencial hidráulico de um rio, são exemplos.

A Tabela 2.1 mostra a oferta de energia no Brasil com base no ano de 2011, onde a utilização de fontes de energia não renováveis contribui com maior parcela.

Tabela 2.1 – Oferta de energia – 2011 (em Mtep)

| FONTE | 2011 | 2010 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|
| RENOVÁVEIS | 120,1 | 121,2 |
| Energia hidráulica e eletricidade | 39,9 | 37,7 |
| Biomassa da cana | 42,8 | 47,1 |
| Biomassa tradicional | 26,3 | 26,0 |
| Outras renováveis | 11,1 | 10,4 |
| NÃO RENOVÁVEIS | 152,2 | 147,6 |
| Petróleo | 105,2 | 147,6 |
| Gás natural | 27,6 | 27,5 |
| Carvão mineral | 15,2 | 14,5 |
| Urânio | 4,1 | 3,9 |

Fonte: BEN-2012

Nos processos termodinâmicos destacam-se os motores térmicos, que são responsáveis por converter a energia armazenada em um combustível na forma química em trabalho, ou seja, em energia mecânica. Os motores térmicos podem ser classificados em motores de combustão interna – (MCI) e motores de combustão externa – (MCE).

Neste trabalho será dada ênfase especial aos motores de combustão interna do ciclo diesel de quatro tempos, com seis cilindros em linha, trabalhando de forma estacionária no acionamento de geradores de energia elétrica.

No final do século passado, o alemão Rudolph Diesel realizou diversas pesquisas em busca de um motor eficiente, potente e que trabalhasse com uma elevada taxa de compressão. Essa alta compressão da mistura ar/combustível (ciclo Otto) elevaria sua temperatura de 450°C a 550°C, entretanto, a maioria dos combustíveis queimam de forma espontânea antes de se atingir esta temperatura. Por isso, Rudolph Diesel decidiu que nenhum combustível seria adicionado ao ar durante a compressão. Com essa modificação o combustível era injetado no cilindro pouco antes do limite superior do tempo de compressão. Dessa forma o combustível se mistura com o ar já aquecido e começa a queimar, esse fenômeno é a auto-ignição ou ignição espontânea.

O óleo diesel, derivado do petróleo, é utilizado nesses motores por ser econômico, possui elevada taxa de compressão, implicando numa maior eficiência na conversão da energia térmica em energia cinética, apresenta uma combustão mais lenta e fornece ao motor uma potência maior.

A energia térmica liberada na combustão dos motores diesel não é totalmente aproveitada para a realização de trabalho pelo motor, na realidade, a maior parcela da energia é desperdiçada de várias formas.

De acordo com Martinelli (2003), os motores diesel de grande porte e baixa rotação possuem melhor aproveitamento da energia liberada na combustão, já os motores diesel de pequeno porte e alta rotação, em média, o rendimento térmico se situa entre 36 e 40%, o que para máquinas térmicas, é considerado alto.

Ainda, segundo Martinelli (2003), do total da energia contida no combustível, quando este é queimado em um motor diesel de grande cilindrada, gera um aproveitamento de 41,5 % em energia útil (potência efetiva), 22,4 % dessa energia é perdida para o sistema de arrefecimento e 36,1 % da energia é perdida pelo sistema de escapamento, sendo lançados para a atmosfera.

A taxa de compressão é um dos fatores responsável pelo rendimento térmico do motor, do ponto de vista da termodinâmica. Assim, quanto maior a taxa de compressão, melhor será o aproveitamento energético que o motor estará fazendo do combustível consumido. Para motores diesel trabalhando com taxas de compressão altíssimas (17:1 nos turbodiesel e até

22:1 nos diesel aspirados), verifica-se um consumo específico menor do que um motor do ciclo Otto de mesma potencia funcionando com gasolina.

A Taxa de Compressão (TC) corresponde à relação entre:

$$TC = \frac{CM + VCC}{VCC} \quad (01)$$

Onde: CM = Cilindrada do Motor

VCC = Volume da Câmara de Combustão

Os MCI são constituídos por vários componentes essenciais. Estes componentes são projetados para tornar o motor eficiente e confiável. Os componentes básicos de um MCI de quatro tempos são os seguintes: bloco do motor, eixo de manivelas, bielas, pistões, anéis dos pistões, cabeçote do cilindro e trem de válvulas.

O funcionamento do motor de quatro tempos só é possível pela sincronização dos movimentos de seus pistões e válvulas, que controlam a entrada de ar nos motores do ciclo Diesel, e da mistura ar combustível nos motores do ciclo Otto, assim como a saída dos gases queimados para o escapamento.

O primeiro protótipo de motor Diesel foi alimentado com óleo vegetal, porém o combustível utilizado desde então pelos motores diesel é o óleo diesel. Recentemente no Brasil, por lei, o diesel é vendido após receber uma adição percentual de biodiesel. Há pesquisas desde 1920 para aprimorar a produção de diesel sintético através de tecnologias de conversão utilizando como insumo substâncias que contém carbono e hidrogênio (MOTOR A DIESEL, 2012).

Devido a sua grande robustez e capacidade de potencia, os motores diesel podem ser utilizados em: veículos para transporte terrestre, embarcações de médio a grande porte e instalações industriais, e instalações estacionárias de grande porte.

Para melhorar a performance dos motores diesel, a indústria tem usado novas tecnologias tais como *sprays* de combustíveis com pressão de injeção ultra-alta (para reduzir níveis de emissão de poluentes) e o uso de materiais avançados (cerâmicas, para influenciar a

transferência de calor dos motores). Mas recentemente, modelos computacionais avançados estão sendo desenvolvidos para uso na indústria como uma ferramenta para acelerar o passo de desenvolvimento dessas pesquisas (COSTA, 2007).

2.1.1. Processo de combustão nos MCI's

Nos MCI's em geral, o processo de combustão oxida uma parcela dos componentes que são admitidos no interior do cilindro, tal processo é uma reação química que se dá em temperaturas elevadas.

O processo de combustão ocorre a partir da união do combustível, que fornece a energia para o processo, do comburente, que é o elemento que reage quimicamente com o combustível, e a fonte de calor que dá início a reação entre os dois elementos anteriores. O combustível é na realidade uma mistura de hidrocarbonetos que contém também outros materiais, tais como enxofre, vanádio, sódio, potássio, etc., principalmente os combustíveis derivados do petróleo. O ar é definido como uma mistura de diversos gases, e este é utilizado como comburente.

O oxigênio contido no ar é o que realmente interessa para o processo de combustão. Os demais gases, a exemplo do nitrogênio, ao se combinar com o oxigênio formando os óxidos nítricos, compostos indesejáveis, os quais são lançados na atmosfera misturando-se ao ar que respiramos o que pode provocar a irritação das vias respiratórias superiores (MARTINELLI, 2003).

Algumas organizações nacionais e internacionais, das quais se pode citar o CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente), estabeleceu a resolução 8/86, que deu origem ao PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), ANEXO I, onde vem a cada vez mais aprimorando os padrões para controle dos níveis de emissões de poluentes, como o CO₂ causador do efeito estufa, o SO₂ causador de chuvas ácidas, dentre outros, sendo, portanto objeto de preocupação mundial.

Os compostos dos gases de exaustão emitidos, tanto por motores a diesel quanto a gasolina, ou ainda com combustíveis mistos, podem ser classificados em dois tipos: os que não causam danos à saúde (CO₂, H₂O, O₂ e N₂), e os que causam danos à saúde, sendo esses

subdivididos em compostos cuja emissão está regulamentada (CO, HC, NO_x, SO₂ e material particulado), e aqueles que ainda não estão sob regulamentação (aldeídos, amônia, benzeno, cianetos, tolueno e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) (COSTA, 2007).

Os motores diesel produzidos atualmente necessitam atender a limites estabelecidos em normas internacionais, sendo estes periodicamente reduzidos a fim de obrigar os fabricantes a desenvolverem motores capazes de produzirem potência com o máximo aproveitamento do combustível e o mínimo de emissões. Como ilustração, vide Tabela 2.2, onde são apresentados valores de emissões de um motor diesel novo, em boas condições de operação e aprovado em testes de emissões.

Tabela 2.2 - Especificações de um motor Diesel novo

| Descrição | | Emissão (Gr/HP.h) |
|-----------------------|--|--------------------------|
| HC | Hidrocarbonetos não queimados | 2,40 |
| NO_x | Óxidos de Nitrogênio como N ₂ | 11,49 |
| CO | Monóxido de Carbono | 0,40 |
| PM | Material particulado | 0,50 |
| SO₂ | Anidrido Sulfuroso | 0,62 |
| CO₂ | Gás Carbônico | 510 |
| N₂ | Nitrogênio | 3400 |
| O₂ | Oxigênio | 490 |
| H₂O | Vapor d'água | 180 |

Fonte: Martinelli, 2003

A Tabela 2.3 apresenta os padrões nacionais de qualidade do ar de acordo com a resolução N° 03 de 28/06/90 do CONAMA.

Uma das alternativas que vem sendo estudada, para minimizar a emissão de particulados, é o uso de combustíveis alternativos, em especial o GN. Este vem sendo utilizado constantemente, como combustível alternativo nos motores diesel devido sua fácil emulsão com o ar, tornando a combustão mais eficiente e reduzindo a emissão de tais partículas poluidoras.

Tabela 2.3 - Padrão Nacional da qualidade do ar

| Poluente | Tempo de amostragem | Padrão primário | | Padrão secundário | |
|-----------------|---------------------|-----------------|-------|-------------------|-------|
| | | μ/m^3 | Ppb | μ/m^3 | PPB |
| PTS | 24 horas (1) | 240 | | 150 | |
| | MGA (2) | 80 | | 60 | |
| | 24 horas (1) | 150 | | 150 | |
| | MAA (3) | 50 | | 50 | |
| CO | 1 hora (1) | 40000 | | 40000 | 35000 |
| | 8 horas | 10000 | 35000 | 10000 | 10000 |
| O ₃ | 1 hora (1) | 160 | 81,6 | 160 | 81,6 |
| SO ₂ | 24 horas (1) | 365 | 139 | 100 | 38,2 |
| | MAA (3) | 80 | 30,5 | 40 | 15,3 |
| NO ₂ | 1 hora (1) | 320 | 170 | 190 | 101 |
| | MAA (3) | 100 | 53,2 | 100 | 53,2 |

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano. (2) Média geométrica anual.

(3) Média aritmética anual. Fonte: IEMA, 2002

2.1.2. Processo de combustão nos Motores Diesel

O processo de combustão no motor diesel ocorre por compressão do ar e injeção de diesel ao final do ponto morto superior, onde ocorre a auto-ignição. Uma parte do combustível, injetado em primeiro lugar, queima rapidamente e o que é injetado em seguida, em maior quantidade, queima a pressão aproximadamente constante. A combustão não ocorre inteiramente, caso não se sucedam no tempo certo o aquecimento do combustível e a ignição.

A injeção começa antes do pistão atingir o PMS, no tempo de compressão. Só se consegue uma boa combustão, quando há a melhor mistura possível entre as gotículas de combustível e o ar necessário à combustão. Com relação ao processo de ignição as gotículas de combustível que são injetadas, inflamam-se após terem sido levadas à temperatura de auto-ignição, pelo ar comprimido e aquecido no cilindro. O intervalo de tempo entre a injeção e a ignição deve estar sincronizado com a calagem da árvore de manivelas, correspondente a elevação adequada de pressão.

Uma situação também que é válida comentar é o retardo da injeção, este é medido pela calagem da árvore de manivelas, é o intervalo de tempo necessário ao pistão da bomba de injeção, para levar a quantidade de combustível contida entre a canalização da bomba e o assento da válvula de injeção (bico injetor), à pressão de injeção. No tempo de alguns centésimos de segundo entre o começo da injeção e a ignição, uma parte importante da quantidade injetada penetra na câmara de combustão e se inflama rápida e simultaneamente com o aumento de pressão. Além disto, durante a ignição, na fase fluida se formam peróxidos com um indesejável caráter explosivo. Estas “batidas” dão aos carburantes um maior retardamento de ignição impróprio para motores diesel (MARTINELLI, 2003).

2.2. Tecnologia dos Motores Dual

O uso de combustíveis gasosos alternativos em motores diesel está aumentando em todo o mundo e deve-se a natureza limpa de sua combustão comparada aos combustíveis líquidos convencionais, assim como pelo seu aumento de disponibilidade e preços atrativos.

A técnica da conversão do motor diesel que passa a consumir diesel e um gás combustível é conhecida desde os meados do ano 1895, onde Rudolph Diesel verificou que adicionando uma certa quantidade de GN ao ar da admissão, o motor aumentava consideravelmente a potência e diminuía drasticamente a emissão de fuligem. Entre estes existem os de injeção direta de GN que conseguem taxas de substituição na ordem dos 80%, tendo já conseguido chegar aos 95% em condições muito específicas de funcionamento do motor (GPL-DIESEL, 2012).

Outra técnica usada nos sistemas de motores dual é a de injetar o gás combustível através da admissão misturado-o com o ar. São normalmente sistemas que não alteram a mecânica original do motor nem os seus componentes.

As percentagens de substituição de diesel que se obtêm dependem do equipamento, do motor, do tipo de utilização e do tipo de gás utilizado, GLP ou GN.

Em um ciclo dual (diesel+GN) utiliza-se o diesel como chama piloto e o GN como combustível principal. Uma mistura de GN e ar é admitida e comprimida durante a fase de compressão, uma quantidade piloto de diesel é injetada para iniciar a combustão. Logo, para

se desenvolver uma combustão correta em um motor que utilize esses dois combustíveis é preciso estabelecer uma proporção correta entre eles.

De acordo com Obert (1971), nesses motores, o óleo diesel continua sendo usado normalmente, porém apenas como combustível piloto para proporcionar a ignição por compressão, dando início à combustão do combustível principal (gás ou líquido vaporizado) que é admitido no cilindro pelo coletor de admissão, semelhante à alimentação de um motor de ciclo Otto, mas com mistura pobre.

Segundo Costa (2007) a impossibilidade de substituição total do diesel justifica-se pelo princípio de funcionamento do motor (explosão por compressão) e como o GN pode suportar altas taxas de compressão sem explodir, isto inviabiliza a substituição total do diesel por GN. Observa-se que no motor diesel a variação na relação de mistura ar/combustível é muito grande, podendo-se chegar a relações de até 50:1 em peso, segundo Giacosa (1964), isto proporciona uma condição de queima de qualquer quantidade de diesel que for injetada na câmara de combustão.

Para que o GN, que tem uma relação ar/combustível muito menor 15:1, de acordo com Obert (1971), possa ser utilizado nestes motores, se faz necessário que este combustível seja admitido com o ar durante a fase de admissão, tal como ocorrem nos motores do ciclo Otto; isto é possível devido à alta octanagem do gás natural, que o faz resistir a altas pressões de compressão.

Casos de substituição de até 90% do diesel pelo GN já são relatados.

Devido às características do GN, como seu alto número de octanas, ele vem sendo utilizado com maior frequência nos motores com alta taxa de compressão. Além disso, ele se mistura uniformemente com o ar, resultando numa combustão eficiente e numa redução considerável dos elementos poluentes.

O motor dual permite, além da redução do custo/kWh em operação, uma redução da emissão do particulado característico dos motores diesel convencionais, permitindo um nível de emissões que corresponde aos objetivos dos órgãos regulamentadores, sem a necessidade de modificações substanciais na parte mecânica destes motores (OLIVEIRA *et al*, 2007).

Tem sido mostrado em vários trabalhos na literatura que o alvo das reduções nas emissões, fumaça e NO_x pode ser alcançado usando o modo dual. De fato eles podem ser reduzidos em mais de 90% e 20%, respectivamente, dependendo do tipo de combustível piloto empregado. As baixas emissões de fumaça são devido primeiramente a relação mais alta de hidrogênio para carbono dos combustíveis de alto número de octano (comparados aos combustíveis de alto número de cetano convencionais) e maior tempo de residência para a mistura ar-combustível após a injeção. A redução de NO_x é devida às baixas temperaturas de combustão da operação dual, as quais se originam de velocidades mais baixas de combustão do gás natural. Entretanto, a operação dual tem aumentado significativamente as emissões de hidrocarbonetos não queimados e CO (em torno de 80% e 60% respectivamente). A ignição retardada por combustível piloto geralmente é ainda estendida por algo em torno de 3 % do tempo em relação aos motores convencionais devido a uma concentração mais baixa de oxigênio na entrada de carga como também uma maior calor específico. Emissões de HC e CO em particular indicam que a ignição da carga ar-gás natural pode ser muito melhorada conduzindo a uma combustão mais completa (NAMASIVAYAM *et al.*, 2010).

Quanto às emissões de gases poluentes, a opacidade e as partículas diminuem drasticamente (pode chegar aos 80%), CO_2 (12%) e os NO_x (30%) também têm diminuições significativas (GPL-DIESEL, 2012).

Um dos objetivos com as modificações no motor consiste em alterar o mínimo possível a estrutura deste para que, se necessário, o mesmo volte a sua configuração original somente com a retirada dos equipamentos adicionados.

2.3. Combustíveis

O combustível pode ser definido como qualquer substância que entre em reação com um comburente, por exemplo, o oxigênio, produz calor, gases ou chamas. A partir dessa reação é liberada energia que atividades cotidianas do ser humano dependem exclusivamente dela, podemos citar as atividades industriais, onde as máquinas funcionam a partir dessa energia oriunda de combustíveis.

Inúmeros elementos e compostos químicos possuem esta propriedade, principalmente quando a reação é feita entre eles e o oxigênio. Assim, o benzeno, o tolueno e muitos outros

compostos orgânicos são combustíveis. Os metais como o ferro, o alumínio, o magnésio, em certas condições comportam-se como combustíveis. Muitos outros elementos também queimam, como o silício e o enxofre (CLAÚDIO, 2004).

Quando da utilização de combustíveis é conveniente classificá-los e estudá-los quanto a sua forma física: sólidos, líquidos ou gases.

Entre as substâncias sólidas pode-se destacar a lenha e o carvão, no Brasil, estes estão em desuso devido aos desmatamentos das florestas como também em função das legislações ambientais vigentes, mesmo assim o carvão participa ainda em 6,0% da matriz energética nacional (BEN, 2010).

No grupo dos líquidos destacam-se o álcool, os óleos vegetais, que são de origem vegetal e animal, e temos também os de origem mineral, os derivados do petróleo como o óleo diesel e a gasolina.

Por fim, entre os gasosos destaca-se o GN e o gás liquefeito de petróleo (GLP), este derivado do petróleo e conhecido como “gás de cozinha”.

Segundo sua origem, os combustíveis podem ser classificados como: fósseis (não renováveis) e vegetais (renováveis), como apresentados na Tabela 2.4.

Os combustíveis industriais apresentam em sua composição alguns dos seguintes elementos ou compostos, como mostrados na Tabela 2.5.

O Carbono e o Hidrogênio são os elementos que mais contribuem para o poder calorífico dos combustíveis, já o oxigênio, que geralmente está presente nos combustíveis vegetais, diminui o poder calorífico do combustível, bem como as exigências teóricas de ar de combustão.

Tabela 2.4 - Classificação dos Combustíveis

| ORIGEM | COMBUSTÍVEL BÁSICO | DERIVADO |
|-----------------|--------------------------------------|---|
| FÓSSEIS | Petróleo | GLP Gasolina Óleo Diesel Óleo Combustível Óleos Residuais |
| | Gás Natural | |
| | Xisto Betuminoso Carvões Minerais | Gases Manufaturados |
| VEGETAIS | Cana-de-açúcar | Bagaço de cana Álcool Etílico |
| | Lenha | Carvão Vegetal Gases Manufaturados Metanol |
| | Resíduos Vegetais | Biogás |

Fonte: Bizzo, 2003

Tabela 2.5 – Elementos presentes em combustíveis industriais

| ELEMENTO | SIMBOLOGIA |
|-----------------|-------------------|
| Carbono | C |
| Hidrogênio | H |
| Oxigênio | O |
| Enxofre | S |
| Nitrogênio | N |
| Água | H ₂ O |
| Cinzas | (Z) |

Fonte: Bizzo, 2003

O enxofre, que também é um combustível, trás consequências prejudiciais ao meio ambiente e aos equipamentos.

O enxofre e seus compostos apresentam algumas características:

- Seu poder calorífico é menor que o do carbono e o do hidrogênio;
- Os produtos de combustão, SO_2 e SO_3 , em presença de umidade formam o ácido sulfúrico, que irá atacar as partes mais frias da instalação. O ácido sulfúrico (H_2SO_4) é o principal causador de "chuva ácida", com consequências desastrosas ao meio ambiente;
- Se a atmosfera da combustão for redutora, pode haver formação de sulfeto de hidrogênio (H_2S), ou outros compostos, que são perigosos, extremamente tóxicos, mais denso que o ar e produzem mal cheiro característico.

Nos combustíveis líquidos e gasosos o enxofre é encontrado na forma de *mercaptanas* (um radical R-S-H) ou também na forma de dissulfetos (radicais R-S-R).

O Nitrogênio, que é um gás inerte, é responsável pela formação de diversos óxidos: óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2), que são compostos de alta irritabilidade para as mucosas além de reagirem com o ozônio da atmosfera (O_3).

Além dos elementos apresentados, outros elementos ocorrem eventualmente nos combustíveis, porém em concentrações muito pequenas, com efeitos não menos importantes. Dentre esses elementos temos os metais, que aparecem com mais frequência: Níquel, Vanádio, Cálcio, Sódio, Potássio e Manganês.

O pentóxido de vanádio (V_2O_5), formado a partir do vanádio, é um catalizador da reação de formação de ácido sulfúrico, agravando as consequências de corrosão com combustíveis que contenham enxofre.

O sódio e o potássio (metais alcalinos) contribuem para a corrosão a baixa temperatura formando compostos com baixo ponto de fusão, podendo inclusive atacar materiais refratários, que são aqueles capazes de manter sua resistência a altas temperaturas.

A água é normalmente encontrada em todos os combustíveis, principalmente nos combustíveis sólidos, na forma de umidade, e traz duas consequências:

- Diminui o poder calorífico;

- Aumenta a temperatura do ponto de orvalho do ácido sulfúrico, aumentando os problemas de corrosão.

Devido à necessidade de procurar fontes alternativas que possam substituir os combustíveis convencionais, como o carvão, a gasolina e o gás de cozinha, ocorreu um grande aumento nas pesquisas desenvolvidas para a obtenção de biocombustível.

Cada tipo de combustível apresenta características e propriedades específicas, assim Bizzo (2003) destaca as seguintes propriedades dos combustíveis líquidos:

Poder calorífico: também designado por calor específico de combustão, é definido como a quantidade de calor desprendido pela combustão completa do combustível.

Quando a quantidade de calor é medida com os produtos de combustão na fase gasosa, denomina-se de Poder Calorífico Inferior (PCI). No entanto, caso a água dos produtos de combustão for considerada na fase líquida, ou seja, com os produtos de combustão à temperatura ambiente, o calor liberado é denominado de Poder Calorífico Superior (PCS). A diferença entre os dois valores é a entalpia de vaporização da água, tanto a que é formada na combustão como a que está presente no combustível como umidade (CLAÚDIO, 2004).

Ponto de fulgor: é a temperatura do combustível na qual, sob a ação de uma chama escorvadora sobre a superfície líquida do mesmo, provoca uma ignição e combustão transitória. Importante propriedade para a segurança de armazenamento.

Ponto de ignição: temperatura do combustível na qual a chama escorvadora provoca uma combustão continuada sobre a superfície do mesmo.

Temperatura de auto-ignição: temperatura mínima de uma mistura ar/combustível na qual a combustão é iniciada e se mantém, sem a presença de uma chama escorvadora.

Ponto de fluidez: temperatura mínima necessária para que o combustível se torne um fluido.

Viscosidade: importante propriedade que vai determinar as temperaturas de armazenamento, bombeamento econômico e pulverização (atomização) para combustão.

Outras propriedades de combustíveis líquidos são aplicáveis a combustíveis automotivos, tais como a octanagem, o período de indução e o índice de cetano.

Octanagem: consiste na resistência à detonação de um determinado combustível utilizado em motores no ciclo de Otto. Quanto mais elevada a octanagem, maior será a capacidade do combustível ser comprimido, sob altas temperaturas, na câmara de combustão sem que ocorra a detonação.

Cetanagem: O número de cetano de um óleo combustível corresponde ao percentual volumétrico de cetano e alfa-metil naftaleno contidos neste. O índice de cetano é a medida da qualidade de combustão dos combustíveis diesel. Esse índice está relacionado com a velocidade de ignição, que corresponde ao período entre o início da injeção de combustível e o início da combustão. Uma combustão de boa qualidade ocorre com uma ignição rápida seguida de uma combustão suave e completa do combustível. Um número adequado de cetano no combustível favorece o bom funcionamento do motor.

2.3.1. Óleo Diesel

O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo sendo constituído basicamente por hidrocarbonetos, que são compostos orgânicos que contém átomos de carbono e de hidrogênio. Outros compostos presentes no diesel, além de carbono e hidrogênio, são o enxofre e nitrogênio. Produzido a partir da refinação do petróleo, o óleo diesel é formulado através da mistura de diversas correntes como querosene, gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, provenientes das diversas etapas de processamento do óleo bruto (COSTA, 2007).

Martinelli (2003) define o óleo diesel como uma mistura de hidrocarbonetos com ponto de ebulição entre 200 e 360°C, obtido por destilação do petróleo por hidrogenação, síntese, ou craqueamento catalítico a baixas temperaturas. Tem poder calorífico médio (ou calor de combustão) de 11.000 Kcal/kg.

A fórmula molecular do diesel varia de acordo com o seu tipo, no entanto, em se tratando da combustão do combustível líquido é conveniente exprimir a composição em termos de um único hidrocarboneto, embora ele seja uma mistura de vários hidrocarbonetos.

O óleo diesel é usualmente considerado como duodecano $C_{12}H_{26}$, segundo Van Wylen e Sonntag (1976). No entanto, outras fórmulas moleculares são também usadas. Por exemplo, de acordo com Ferguson (2001), pode-se escrever para óleo diesel: $C_{14,4}H_{24,9}$.

A Tabela 2.6 apresenta algumas características e especificações para o óleo diesel.

Tabela 2.6 – Características e especificações do óleo diesel

| PROPRIEDADE | ESPECIFICAÇÃO | METODO DE TESTE EM LABORATÓRIO |
|---|----------------------|--|
| Viscosidade | ASTM D-445 | 1,3 A 5,8 CentiStoke a 40°C |
| Número de Cetano | ASTM D-613 | No mínimo 40, exceto em clima frio e serviço em marcha lenta por períodos prolongados, quando será necessário número mais elevado. |
| Teor de enxofre | ASTM D-129 ou 1552 | Não deve exceder a 1,0% em peso. |
| Teor de água e sedimentos | ASTM D-1796 | Não deve exceder a 1,0% em peso. |
| Resíduos de carbono | ASTM D524 OU D-189 | Não deve exceder a 0,25% em peso em 10% de resíduos. |
| Ponto de fulgor | ASTM D-93 | 52°C (125°F) mínimo. Algumas sociedades classificadoras exigem ponto de fulgor mais elevado. |
| Ponto de Névoa | ASTM D-97 | 12°C abaixo da temperatura esperada de operação. |
| Corrosão por enxofre ativo sobre lamina de cobre | ASTM D-130 | Não deve exceder o nº 2 após 3 horas a 50°C |
| Teor de cinzas | ASTM D-482 | Não deve exceder a 0,02% em peso. |
| Destilação | ASTM D-86 | A curva de destilação deve ser suave e continua, 98% do combustível deve evaporar abaixo de 360°C. Todo o combustível deve evaporar abaixo de 385°C. |

Fonte: Martinelli, 2003

A resolução da ANP N° 42, DE 16.12.2009 - DOU 17.12.2009 classifica os óleos diesel de uso rodoviário em:

I - **Óleo diesel A:** combustível produzido por processos de refino de petróleo e processamento de GN destinado a veículos dotados de motores do ciclo Diesel, de uso rodoviário, sem adição de biodiesel.

II - **Óleo diesel B:** combustível produzido por processos de refino de petróleo e processamento de GN destinado a veículos dotados de motores do ciclo diesel, de uso rodoviário, com adição de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente.

Fica também estabelecido, para feitos da resolução citada, que os óleos diesel A e B deverão apresentar as seguintes nomenclaturas, conforme o teor máximo de enxofre:

- a) Óleo diesel A S50 e B S50: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 50 mg/kg.
- b) Óleo diesel A S500 e B S500: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 500 mg/kg.
- c) Óleo diesel A S1800 e B S1800: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 1800 mg/kg.

2.3.2. Biocombustíveis e Biodiesel

O bicombustível é uma fonte de energia renovável, de origem não fóssil, porém de origem biológica, obtido a partir de uma ou mais plantas. A matéria-prima principal do bicombustível são os resíduos agropecuários, a cana-de-açúcar, a biomassa florestal e as plantas oleaginosas, como a soja, o milho e a mamona, dentre outras.

Os principais biocombustíveis são a biomassa, o bioetanol, o biodiesel e o biogás.

O biocombustível é menos agressivo ao meio ambiente, quando comparado com os combustíveis populares, devido à emissão de poluentes durante sua combustão ser inferior aos valores apresentados pelos combustíveis convencionais.

Na década de 70 foram iniciadas pesquisas que visavam utilizar diretamente nos motores diesel, vários óleos vegetais como mamona, coco, algodão e babaçu. De maneira similar foram desenvolvidos e avaliados processos de craqueamento, com o objetivo de viabilizar a utilização dos ácidos graxos.

No ano de 1980 o programa de substituição parcial do combustível diesel, ProÓleo, foi iniciado, propondo a mistura de 30% de óleo vegetal no combustível diesel, porém a queda nos preços internacionais do barril do petróleo desestimulou este programa, o qual não evoluiu após o ano 1986 (POUSADA *et al*, 2007).

No Brasil, podemos obter o biodiesel a partir da mamona, dendê, canola, girassol, amendoim, soja e algodão. Matérias-primas de origem animal, como o sebo bovino e gordura suína, também são utilizadas na fabricação do biodiesel.

Em setembro de 2004, o governo brasileiro deu o primeiro passo para regularizar o biodiesel. O combustível já havia sido incluído na Medida Provisória – 214 (MP-214), Lei do Petróleo, 1997. Segundo esta medida, biodiesel "é um combustível renovável e biodegradável, derivado de óleos vegetais ou de gorduras animais, que possa substituir parcial ou totalmente o óleo diesel de origem fóssil".

Em janeiro de 2008, entrou em vigor a mistura obrigatória de 2% de biodiesel no diesel derivado de petróleo em todo o País. Esse percentual foi ampliado sucessivamente até atingir 5% em janeiro de 2010, antecipando em três anos a meta estabelecida pela Lei nº 11.097, de 2005. O biodiesel é vendido misturado ao diesel de petróleo em mais de 30 mil postos de abastecimento espalhados pelo País (BIOCOMBUSTIVEIS, 2012).

A regulamentação para o biodiesel foi desenvolvida nos diferentes países onde seu uso foi permitido. Nos Estados Unidos o padrão do biodiesel está definido pela norma técnica ASTM 6751-08, na União Européia a norma relacionada é a EN 14214 e no Brasil está definida na Resolução ANP N° 07 de 29.03.2008 - DOU 20.03.2008.

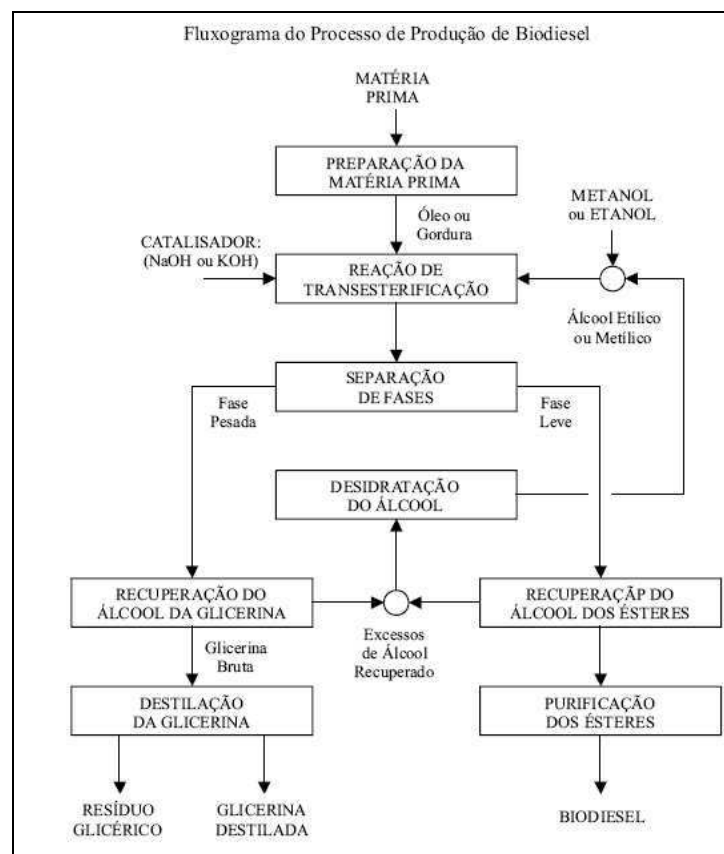
Desde o lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, em dezembro de 2004, até o fim de 2011, o Brasil deixou de importar 7,9 bilhões de litros de diesel, o equivalente a de cerca de US\$ 5,2 bilhões, reduzidos na balança comercial brasileira (BIOCOMBUSTIVEIS, 2012).

A ANP, na função de regulamentar a lei, redefine o biodiesel e delimita o tipo de biocombustível que pode ser comercializado com esse nome no Brasil para uso veicular. A

resolução nº. 42 de 2004 define: “Biodiesel - B100 combustível composto de alquil-ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais conforme a especificação contida no Regulamento técnico nº 4/2004, parte integrante dessa Resolução”. O regulamento técnico apresenta as especificações mínimas que deve cumprir o biodiesel os métodos adequados para realizar os ensaios de caracterização do biocombustível. Detalhes deste regulamento técnico são apresentados no ANEXO II.

A partir de então, pode-se definir o biodiesel como sendo uma fonte alternativa aos combustíveis fósseis, e o processo de obtenção deste é comumente chamado de transesterificação, que nada mais é do que a separação da glicerina do óleo vegetal. Cerca de 20% de uma molécula de óleo vegetal é formada por glicerina. A glicerina torna o óleo mais denso e viscoso. Durante o processo, a glicerina é removida do óleo vegetal, deixando o óleo mais fino e reduzindo a viscosidade. O processo de produção do biodiesel pode ser representado através do fluxograma na Figura 2.1, sendo que a matéria prima utilizada pode ser uma das citadas anteriormente.

Figura 2.1 – Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel



Do processo de transesterificação obtêm-se subprodutos, um deles é o glicerol (glicerina). Em média, 100 kg de glicerol são produzidos a partir de 1 tonelada de biodiesel que é fabricado. Com o aumento da produção global de biodiesel, o preço de mercado para o glicerol bruto caiu, este contendo 20% de água e de resíduos de catalisador.

Uma iniciativa no Reino Unido é o *The Glycerol Challenge* ("o desafio do glicerol"), onde pesquisas estão sendo conduzidas para usar o glicerol como um componente químico.

Devido à grande extensão territorial e a seu clima propício a plantação de sementes oleaginosas, o Brasil é um país com grande potencial para exploração da biomassa para fins alimentício, químicos e energéticos.

A Figura 2.2 apresenta uma distribuição de produção, por regiões brasileiras, dessas oleaginosas, tais como a soja, a mamona, o girassol e o dendê.

Figura 2.2 – Produção de Oleaginosas no Brasil

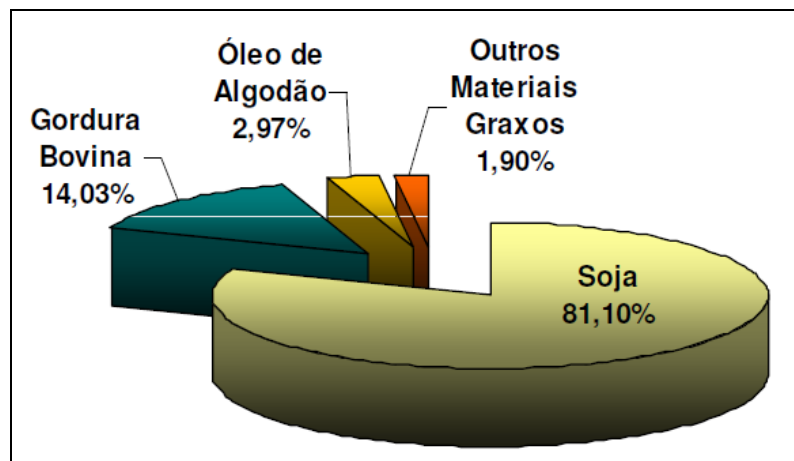


Fonte: Penteadó, 2010

O Brasil tem condições de liderar a produção mundial de biodiesel, promovendo a substituição de 60% da demanda mundial de óleo diesel mineral, tal afirmação dada após estudos divulgados pela *National Biodiesel Board*, dos Estados Unidos. Afirmação essa devido o país, cultivar diversas espécies de oleaginosas, onde estas possuem potencial para serem utilizadas como matéria-prima na produção de biodiesel.

Verificou-se que a oleaginosa soja esta presente em todas as regiões do Brasil, assim ela representa em percentual certa de 80% das fontes de matéria-prima para obtenção do biodiesel, ver Figura 2.3.

Figura 2.3 – Fonte de obtenção de biodiesel no Brasil



Fonte: Brasil, 2009

Segundo a Empresa de Pesquisa e Energia – EPE “O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de biocombustíveis e, reconhecidamente, aquele que estabeleceu o mais bem sucedido programa de substituição de combustíveis líquidos de origem fóssil, usados para transporte, por biocombustíveis renováveis” (EPE/2012 – convênio nº 039/2005).

Em 2010 o montante de B100 produzido no país atingiu 2.397.272 m³ contra 1.608.053m³ do ano anterior. Com isto, verificou-se aumento de 49,1% no biodiesel disponibilizado no mercado interno. Ao longo de 2010 o percentual de B100 adicionado compulsoriamente ao diesel mineral foi constante em 5%. A principal matéria prima foi o óleo de soja (82,2%) seguido do sebo bovino (13,0%), dados fornecido pelo BEN (2010).

No Brasil, a Lei 11.097, aprovada em 13 de janeiro de 2005, estabelece percentuais mínimos de mistura de biodiesel ao diesel mineral e o monitoramento da inserção do novo combustível no mercado. A Lei autoriza a mistura de 2% de 2008 a 2012, de 2013 em diante, o percentual obrigatório aumentará para 5%. Para atender à primeira fase do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (B2) serão necessários 840 milhões de litros de biodiesel em 2008. Para a segunda fase (B5), serão necessários 2,2 bilhões de litros em 2013 (RODRIGUES, 2006).

O biodiesel distribuído no mercado de varejo na verdade são misturas de biodiesel e combustível diesel convencional à base de hidrocarbonetos. A maioria das localidades que consomem o biodiesel utiliza um sistema conhecido como o "fator B" (do inglês *Blend*) para indicar a quantidade de biodiesel em qualquer mistura de combustível, diesel mais biodiesel, por exemplo biodiesel a 100% é referido como B100, ou seja, a mistura apresenta apenas biodiesel, biodiesel a 20% é rotulado B20, onde 80% é diesel, biodiesel a 5% é rotulado B5, onde 95% é diesel, e assim sucessivamente.

O biodiesel tem propriedades lubrificantes melhores e muito mais alto número de cetano, que os atuais combustíveis diesel de mais baixo teor de enxofre. O número de cetano é o indicador do ponto de ignição, pois os motores diesel precisam, para a auto-ignição e queima perfeita, de combustíveis de alto ponto de ignição. A pré-combustão é a tendência do combustível à auto-ignição quando da injeção no motor diesel, e é característica importante para o desempenho do combustível. Além do biodiesel reduzir o desgaste do sistema de combustível, e em níveis baixos em sistemas de alta pressão aumenta a vida útil do equipamento de injeção de combustível que depende do combustível para a sua lubrificação. Dependendo do motor, isso pode incluir a bombas de injeção de alta pressão, bomba injetoras (também chamado *injetores de unidade*) e injetores de combustível.

Uma propriedade marcante do biodiesel é seu poder calorífico que vale cerca de 37,27 MJ/L, que é 9% inferior ao óleo diesel derivado de petróleo classificado como Número 2. A densidade de energia do biodiesel variam de acordo com a matéria-prima utilizada no processo de produção. O biodiesel tem uma densidade de aproximadamente 0,88 g/cm³, menor do que a da água. Ainda sim estas variações são menores do que o diesel derivado do petróleo (petrodiesel), segundo a *National Biodiesel Board*.

O biodiesel proporciona uma boa lubrificação e uma combustão quase que completa, isso faz com que o motor-gerador aumente a produção de energia e atua compensando a maior densidade de energia do diesel.

Ainda dependendo de sua matéria-prima de produção, o biodiesel é um líquido que varia de cor, entre dourado e castanho escuro. É imiscível com água, tem um alto ponto de ebulição e baixa pressão de vapor. O ponto de inflamação de biodiesel (menor que 130°C) é significativamente mais alto que o petrodiesel (64°C) ou gasolina (-45°C). O biodiesel praticamente não apresenta nenhum conteúdo de enxofre, e é frequentemente utilizado como aditivo para óleo diesel com ultrabaixo teor de enxofre (*Ultra-Low Sulfur Diesel*, ULSD) de combustível, porque confere a este, melhores características de lubricidade, sendo apontado como uma excelente alternativa o uso dos ésteres em adição de na taxa de 5 a 8% buscando reconstituir essa lubricidade. Também é essencialmente isento de compostos aromáticos (BIODIESELBR, 2011).

Como vantagens da utilização do biodiesel pode-se citar:

- É uma fonte de energia renovável, biodegradável e atóxica;
- todo o gás carbônico emitido na queima do combustível é capturado pelas plantas;
- sua produção é segura, não causando riscos ao meio ambiente,
- sua utilização diminui a emissão de gases causadores do efeito estufa;
- através da produção de biodiesel podem-se gerar mais empregos no setor primário evitando assim o fluxo migratório para as cidades;
- é um excelente lubrificante, que pode aumentar a vida útil do motor;
- apresenta alto número de cetano;
- teor médio de oxigênio;
- maior ponto de fulgor;
- fácil produção, transporte e armazenamento.

2.3.3. Gás Natural – GN

Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos no intuito de gerar energia elétrica, a partir de motores a diesel, trabalhando de forma dual, junto com combustíveis gasosos, em especial

o gás natural (GN), devido a suas características, propriedades e disponibilidade; sem deixar de lado as questões ambientais.

O GN é uma mistura de hidrocarbonetos gasosos, originados da decomposição de matéria orgânica fossilizada ao longo de milhões de anos. Em seu estado bruto, o GN é composto principalmente por metano, com proporções variadas de etano, propano, butano, hidrocarbonetos mais pesados e também CO₂, N₂, H₂S, água, ácido clorídrico, metanol e outras impurezas (GASNET, 2012).

O GN pode ser obtido em poços associado ou não com o petróleo. O GN não associado apresenta os maiores teores de Metano, enquanto o GN associado apresenta proporções mais significativas de Etano, Propano, Butano e hidrocarbonetos mais pesados.

A composição comercial do GN é variada e depende da composição do GN bruto, do mercado atendido, do uso final e do produto gás que se deseja. Para adquirir as características comerciais desejadas o GN bruto passa por tratamento em uma Unidade de Processamento de Gás Natural – UPGN, que efetua a retirada de impurezas e a separação dos hidrocarbonetos pesados. Apesar desta variabilidade da composição, são parâmetros fundamentais que determinam a especificação comercial do GN: o seu teor de enxofre total, o teor de gás sulfídrico, o teor de gás carbônico, o teor de gases inertes, o ponto de orvalho da água, o ponto de orvalho dos hidrocarbonetos e o poder calorífico.

Apresenta-se a seguir as normas para a especificação do GN a ser comercializado no Brasil, de origem interna e externa, igualmente aplicáveis às fases de produção, de transporte e de distribuição desse produto, determinadas pela Agência Nacional do Petróleo – ANP na Portaria N.º 41, de 15 de Abril de 1998. O GN deverá atender às especificações apresentadas na Tabela 2.7.

As principais propriedades do GN são a sua densidade em relação ao ar, o poder calorífico, o índice de Wobbe, o ponto de orvalho da água e dos hidrocarbonetos e os teores de carbono, CO₂, hidrogênio, oxigênio e compostos sulfurosos. Outras características intrínsecas importantes são os baixos índices de emissão de poluentes, em comparação a outros combustíveis fósseis, rápida dispersão em caso de vazamentos, os baixos índices de odor e de contaminantes. Sua temperatura de auto-inflamação é da ordem de 450°C. Esta

característica apresenta ótima possibilidade de utilização em motores do ciclo Otto e do ciclo Diesel. Ainda, em relação a outros combustíveis fósseis, o GN apresenta maior flexibilidade, tanto em termos de transporte como de aproveitamento (ANEEL – GÁS NATURAL, 2011).

Tabela 2.7 – Especificação para o Gás Natural Comercializado no Brasil

| Características | Unidades | Grupos | | | Métodos de Ensaio |
|--|---------------------|-------------|--------------|---------------|---------------------------|
| | | B (baixo) | M (médio) | A (alto) | |
| PCS | Kcal/m ³ | 8000 a 9000 | 8800 a 10200 | 10000 a 12500 | ASTM D 3588 |
| Densidade Relativa do Ar | | 0,54 a 0,60 | 0,55 a 0,69 | 0,66 a 0,82 | ASTM D 3588 |
| Teor Máximo de Gás Sulfídrico (H ₂ S) | mg/m ³ | 20 | 20 | 20 | ASTM D 5504 OU ISO 6326-3 |
| Teor Máximo de Enxofre (H ₂ S e Enxofre mercaptídico) | mg/m ³ | 80 | 80 | 80 | ASTM D 5504 ou ISO 6326-3 |
| Teor Máximo de Dióxido de Carbono CO ₂ | % volume | 2 | 2 | 2 | ASTM D 1945 ou ISO 6974 |
| Teor Máximo de Inertes | % volume | 4 | 4 | 4 | ASTM D 1945 ou ISO 6974 |
| Teor Máximo de Oxigênio (O ₂) | % volume | 0,5 | 0,5 | 0,5 | ASTM D 1945 ou ISO 6974 |
| Ponto de Orvalho Máximo da água à 1 atm | °C | -45 | -45 | -45 | ASTM D 5454 |

Fonte: GASNET, 2012

O GN tem uma temperatura de ignição relativamente alta em automóveis e, além disso, é um combustível de queima limpa e econômica. A temperatura de ignição alta em automóveis com GN é uma vantagem séria em relação a outros combustíveis gasosos. Além disso, a combustão do GN praticamente não produz partículas, este contém menos impurezas dissolvidas (por exemplo, compostos de enxofre). A presente contribuição está principalmente relacionada com uma investigação experimental das características de operação bi-

combustível para motores diesel, quando o líquido é parcialmente substituído por GN em temperatura ambiente (R.G. PAPAGIANNAKIS, D. T. HOUNTALAS, 2003).

Uma das propriedades consideradas é que o GN tem um elevado número de octano e, portanto, é adequada para motores com taxa de compressão relativamente alta. Além disso, mistura-se uniforme com o ar, resultando em combustão eficiente e redução substancial das emissões de gases de escape.

Motores operando no modo dual o gás é normalmente introduzido com a entrada de ar através do colector de admissão. eles são misturados e comprimidos como em um motor diesel convencional. Uma quantidade de combustível líquido é injetado perto do final do curso de compressão, que inicia a combustão. O biodiesel se auto-inflama e cria fontes de ignição para o combustível gasoso em torno da mistura.

A grande vantagem da utilização do GN é a maior possibilidade de preservação e conservação do meio ambiente. Pelas características apresentadas, é um ótimo substituto para o carvão e o diesel nas usinas termelétricas, reduzindo os níveis de poluição, de desmatamento e de acidentes ambientais.

Em 2010 os seguintes acontecimentos foram destaque na área de GN: a recuperação do mercado de GN, o aumento da geração termelétrica e a construção de 1.599 km de gasodutos, atingindo um total de 9.295 km (BEN, 2010).

Em função do aumento da demanda por eletricidade no país, além das condições hidrológicas não tão favoráveis em 2010, houve expressivo aumento de 180% na geração térmica a GN (incluindo autoprodutores e usinas de serviço público).

Ainda em 2010 o consumo médio de GN no setor elétrico atingiu 22,1 milhões m³/dia, significativamente maior que o patamar de 8,0 milhões m³/dia, registrado em 2009. A média diária de produção do ano foi de 62,8 milhões de m³/dia (+8,5% em comparação com 2009) e o volume de GN importado foi, em média, de 34,6 milhões de m³/dia. Com isto, houve aumento na participação do GN na matriz energética nacional, para o patamar de 10,3%.

A demanda industrial por GN aumentou 29,0% em relação ao ano de 2009, em função da recuperação de diversos setores econômicos. Os maiores aumentos na demanda por este energético foram observados na siderurgia e na pelotização (BEN, 2011).

De acordo com o BEN com base no ano de 2011, a produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 2.176,6 GWh em 2010. Isto representa um aumento em relação do ano anterior (75,8%), quando se alcançou 1.238,0 GWh.

Em função do aumento da demanda por eletricidade no país, além das condições hidrológicas não tão favoráveis em 2010, houve expressivo aumento de 180% na geração térmica a GN (incluindo autoprodutores e usinas de serviço público), segundo o BEN (2011).

De acordo com o BEN 2012 – ano base 2011, o total de emissões antrópicas (resultantes da ação do ser humano) associadas à matriz energética brasileira atingiu 395,8 milhões de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (MtCO₂-eq) no ano de 2011, sendo a maior parte desse total (192,0 MtCO₂-eq) gerado no setor de transportes.

Em termos de emissões por habitante, cada brasileiro, produzindo e consumindo energia, emitiu no ano de 2011 cerca de 2,0 tCO₂-eq, ou seja, 4 vezes menos do que um europeu, nove vezes menos do que um americano e menos da metade do que emite um chinês (BEN, 2012).

Ainda segundo o BEN (2012), por apresentar elevada participação de renováveis, para produzir 1 MWh, o setor elétrico brasileiro emitiu 56 kgCO₂, em média, no ano de 2011 – relativamente pouco se comparado aos setores elétricos americano e chinês, que emitem, respectivamente, 8 e 12 vezes mais que o brasileiro.

Diante do exposto, verificamos então que energia é um termo técnico, muito abrangente e abstrato. Essa energia gerada a partir de fontes renováveis e não renováveis, os combustíveis, esta presente à nossa volta e nas atividades que desenvolvemos, e então se deve poupar e utiliza-la de forma eficiente sem causar tantos danos ao meio que nos rodeia.

Ao término desse capítulo passa-se a conhecer o que as diversas literaturas abordadas apresentam como base teórica e prática para o desenvolvimento de novas pesquisas correlacionadas aos temas abordados, logo, a partir de então será apresentado nossa metodologia de trabalho.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E METÓDOS

Em síntese, os materiais utilizados principalmente nesse trabalho são o diesel e o biodiesel, combustíveis líquidos e o gás natural, o combustível gasoso. O motor grupo gerador utilizado nos ensaios está ligado a um sistema computacional que reconhece e armazena os dados em tempo real, tal monitoramento é realizado através de sensores, instalados em pontos estratégicos do motor gerador. Para coletar os gases de escape utilizou-se um analisador de gases junto com uma sonda, instalada no escapamento do grupo gerador. As medições foram realizadas em dias diferentes e com tempo adequado para o motor-gerador atingir o regime permanente, nas diferentes cargas.

3.1. Materiais – Combustíveis

3.1.1. Óleo diesel

O diesel utilizado na parte experimental deste trabalho foi adquirido nos postos de combustíveis próximos da UFCG - Campus I, sendo transportados e armazenados em depósitos de 200 litros, mantidos a temperatura e pressão ambiente.

Para carregar o programa computacional com dados matemáticos, foram utilizados os valores apresentados na Tabela 3.1, valores esses referentes à composição mássica do óleo diesel B S500.

Tabela 3.1 – Composição do diesel em base mássica

| Componente | % em massa |
|----------------|------------|
| $C_{12}H_{26}$ | 99,72 |
| S | 0,28 |

Fonte: Medeiros *et al.*, (2002)

3.1.2. Biodiesel

O biodiesel que foi utilizado nas proporções dos ensaios veio do estado de Pernambuco, especificamente da cidade Caetés, fornecido pela empresa CETENE (Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste), obtido a partir da semente de algodão.

Oliveira *et al* (2008) apresenta os dados referentes a um biodiesel de algodão que possui ácido palmítico (17-31% em sua composição) com fórmula química $C_{16}H_{32}O_2$, ácido esteárico (1 a 4% em sua composição) com fórmula química $C_{18}H_{36}O_2$, ácido oléico (13 a 44% em sua composição) com fórmula química $C_{18}H_{34}O_2$, ácido linoléico (33 a 59% em sua composição) com fórmula química $C_{18}H_{32}O_2$ e o ácido linolênico (0,1 a 2,1% de sua composição) com fórmula química $C_{19}H_{32}O_2$.

Os vários tipos de biodieseis existentes possuem em sua composição vários ácidos graxos, como foi mostrado anteriormente, e seu teor varia de acordo com a natureza da oleaginosa que serviu de matéria prima para sua obtenção. Assim, foi verificado que as composições de ácidos graxos do óleo de soja e do óleo de algodão são semelhantes, implicando então na utilização dos dados do biodiesel de óleo de soja, não iria causar tanto prejuízo com relação aos resultados obtidos.

Na Tabela 3.2, é apresentado algumas propriedades do biodiesel de soja que foi utilizado neste trabalho.

Tabela 3.2 – Propriedades do biodiesel de óleo de soja

| | |
|--|-------------------------|
| Fórmula molecular | $C_{18,74}H_{34,43}O_2$ |
| Massa molecular (kg/kmol) | 291,77 |
| Poder calorífico superior (kJ/kg) | 39.450 |

Fonte: Canakci *et al*, (2006)

3.1.3. Gás Natural

O GN que chega à cidade, oriundo do gasoduto Nordesteão, foi adquirido no posto próximo a UFCG – Campus I e transportado para o laboratório em um banco de cilindros dispostos em um reboque. Tal logística facilitou o reabastecimento dos cilindros durante o tempo dos ensaios.

Tomou-se como bases de dados para o GN utilizado neste trabalho, quanto à composição química, apresentada na Tabela 3.3 e quanto às propriedades físico-químicas, dadas na Tabela 3.4, dados esses fornecidos pela Companhia Paraibana de Gás – PBGás.

Tabela 3.3 - Composição do gás natural do gasoduto Nordesteão

| Composição | Quantidades |
|---------------------|------------------------|
| Metano | 89,42% |
| Etano | 7,24% |
| Propano | 0,16% |
| Butano | 0,18% |
| Hexano (superiores) | 0,061% |
| Nitrogênio | 1,27% |
| Dióxido de Carbono | 1,66% |
| O ₂ | 0,08% |
| H ₂ S | 0,10 mg/m ³ |
| S | 0,2 mg/m ³ |
| Inertes | 2,230% |

Fonte: PBGÁS (2011)

Tabela 3.4 – Propriedades do gás natural do gasoduto Nordeste

| Propriedades | |
|-------------------------------------|--------|
| Índice de Wobe (MJ/m ³) | 48,778 |
| Densidade Relativa | 0,62 |
| PCS (MJ/m ³) | 38,286 |

Fonte: PBGÁS (2011)

3.2. Materiais – Equipamentos

Os ensaios foram realizados no laboratório de Termogeração da UFCG, Figura 3.1. Esse laboratório foi construído em parceria com o Departamento de Engenharia Mecânica, Engenharia Elétrica, e as empresas GEBRA, BRASYMPE e a ANEEL.

Figura 3.1 – Laboratório de Termogeração da UFCG

Fonte: Autoria própria

O sistema experimental é composto por um motor de combustão interna do ciclo diesel acoplado a um gerador elétrico, instrumentado com sensores de temperatura, pressão, medidores de vazão de ar, diesel e gás natural, sondas para captura de gás de escapamento, analisador de gases, sistema de absorção de potência, sistema de aquisição de dados, computadores para controle dos diversos sistemas do motor e sistema de absorção de potencia constituído por um banco de carga e sistema de interligação com a rede externa, tudo controlado por computador.

3.2.1 Sistema motor-gerador

O sistema eletro-mecânico ou sistema motor-gerador estudado, Figura 3.2, é composto por um motor CUMMINS 6CTA8.3 com capacidade de 188 kW à 1800 rpm, acoplado a um gerador marca Onan Genset de 150 kW.

Os dados necessários para este trabalho foram coletados em tempo real via sistema de aquisição de dados.

Figura 3.2 – Sistema eletro-mecânico



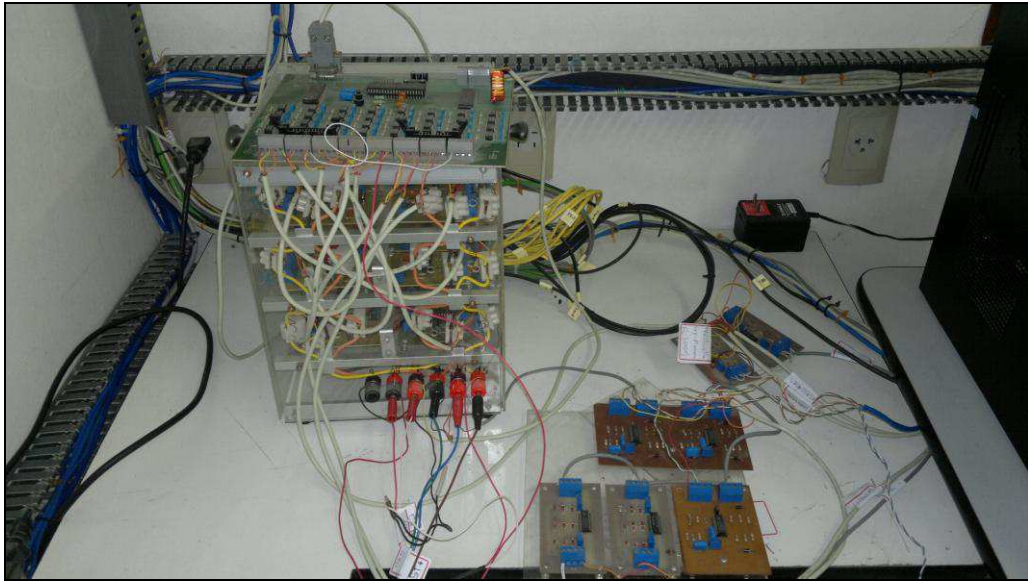
Fonte: Autoria própria

3.2.2. Sistema de aquisição e armazenamento de dados

O sistema de aquisição de dados é composto por uma unidade de leitura e tratamento de sinal, desenvolvido no Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, e um micro computador Pentium 4 que tem como função processar e armazenar as informações coletadas em tempo real, Figura 3.3.

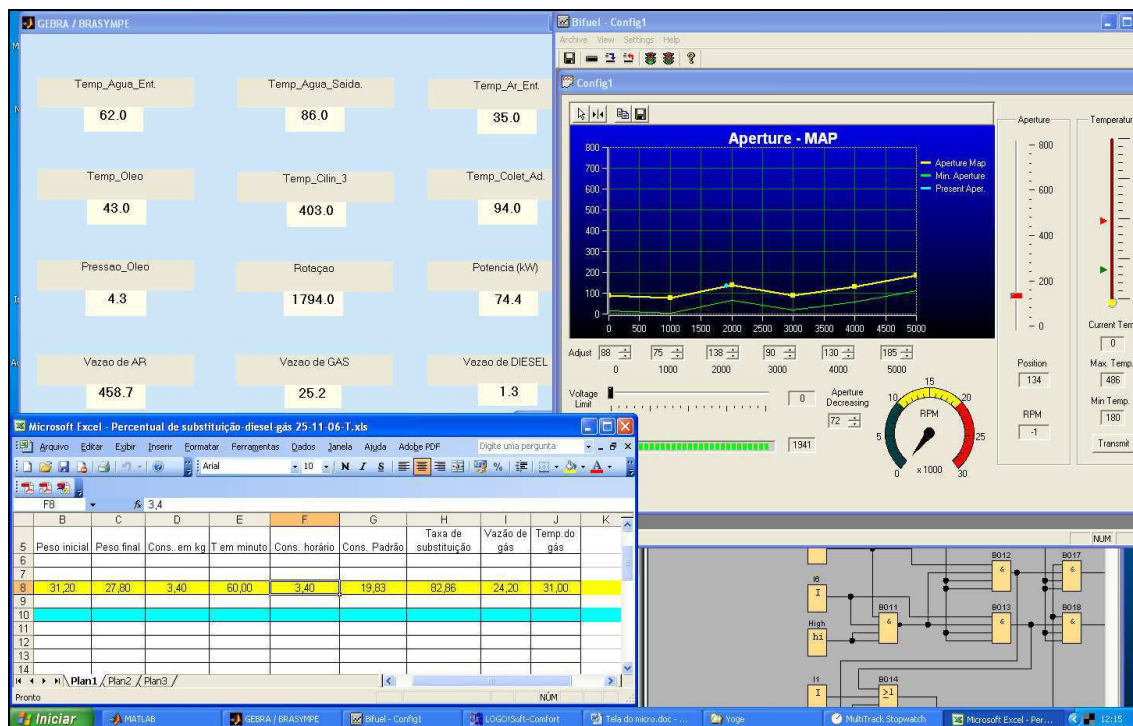
A Figura 3.4 mostra a interface gráfica do sistema de aquisição e armazenamento de dados, controle da injeção de GNV, controle de carga aplicada e planilha Excel para controle da taxa de substituição.

Figura 3.3 – Sistema de aquisição de dados



Fonte: Autoria própria

Figura 3.4 – Interface gráfica do sistema de aquisição e armazenamento de dados



Fonte: Autoria própria

No ANEXO III é mostrado desenhos esquemáticos do motor-gerador, com indicação dos pontos onde foram realizadas medições, e de vários outros elementos externos do motor. Pode-se ver também o sistema de aquisição e armazenamento de dados.

3.2.3. Sistema de pesagem do combustível líquido

Para medir com maior precisão o consumo da mistura de combustível diesel/biodiesel foi empregada uma balança da marca Filizola, como verificado nas Figuras 3.5, a e b, com capacidade de 120 kg com divisões de 20 gramas a qual possui uma saída serial que permite a conexão ao sistema de aquisição de dados.

Figura 3.5a – Sistema de pesagem do combustível diesel/biodiesel



Fonte: Autoria própria

Figura 3.5b – Sistema de controle de pesagem do combustível diesel/biodiesel



Fonte: Autoria própria

3.2.4. Sistema de medição de temperatura e pressão no motor-gerador

Em pontos estratégicos ao longo do motor estão instalados termopares, com precisão de 1% nas medidas, a fim de se poder avaliar o comportamento térmico do motor.

Foram utilizados termopares cromel-alumel com faixa de medição de -50°C a 1300°C para avaliar a temperatura dos gases de escapamento, conforme Figura 3.6.

Figura 3.6 – Termopares instalados no coletor de escapamento



Fonte: Autoria própria

Para realizar as medições de temperaturas do ar de admissão, do óleo lubrificante, do combustível e da água de refrigeração do motor os termopares usados foram os de ferro-constantan, e o de cromel-alumel foram utilizados para medição da temperatura do escapamento.

Para registrar as variações de pressão do ar na entrada do motor foi instalado um transdutor de pressão, marca Hytronic, modelo TP (piezoresistivo), que opera nas faixas de pressão absoluta de 0 a 5×10^7 Pa, possuindo sinal de saída de 10 mV/V (TP) e temperatura do fluido variando de -40°C à 135°C na imediação deste transdutor também está instalado um termopar para registro da temperatura do ar de admissão, isso pode ser visto na Figura 3.7.

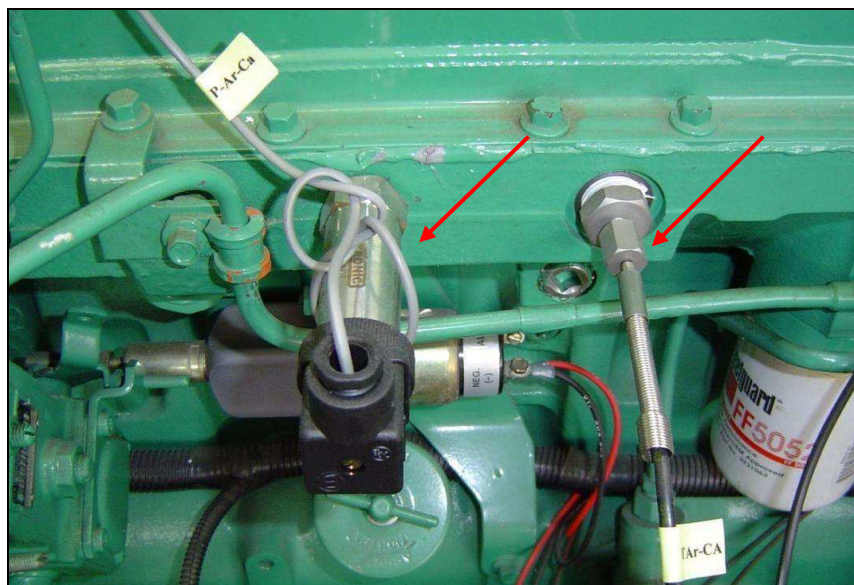
Figura 3.7 – Sensor de medição de pressão e temperatura do ar na entrada do motor



Fonte: Autoria própria

Foi utilizado também um transdutor que é responsável por monitorar a pressão do ar após na passagem pelo turbo-compressor e outros dois termopares encarregados de registrar a temperatura do ar após o compressor e após o *aftercooler*, como mostrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Sensores de medição de pressão e temperatura após o turbo e *aftercooler*

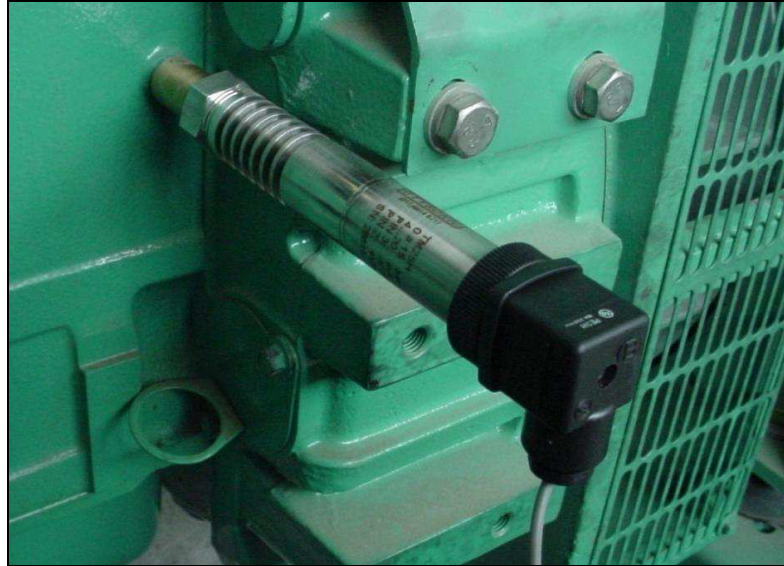


Fonte: Autoria própria

Para medir a pressão e a temperatura do óleo lubrificante existe um transdutor de pressão, Figura 3.9, na seção de distribuição de lubrificante e um termopar, Figura 3.10,

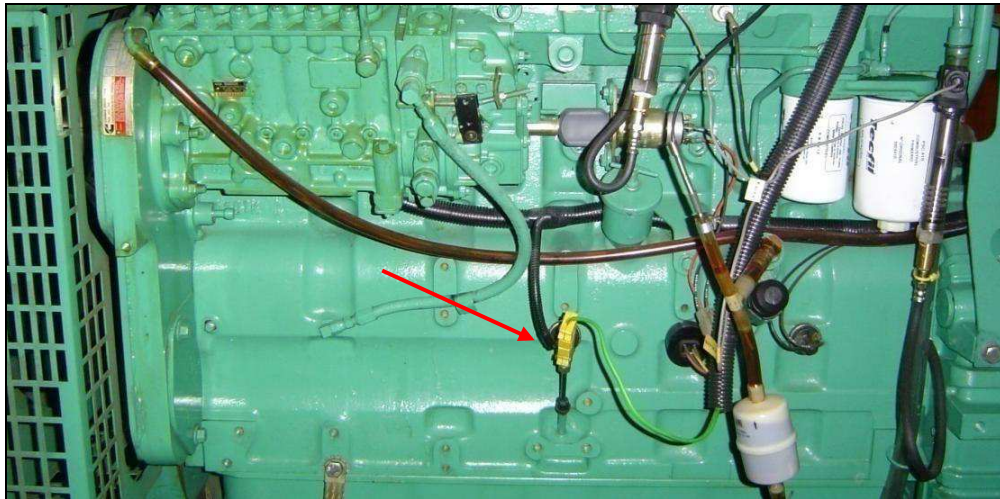
instalado no cárter do motor, estes com a função de acompanhar e monitorar a lubrificidade do motor de forma preventiva.

Figura 3.9 – Transdutor para medição da pressão do óleo lubrificante



Fonte: Autoria própria

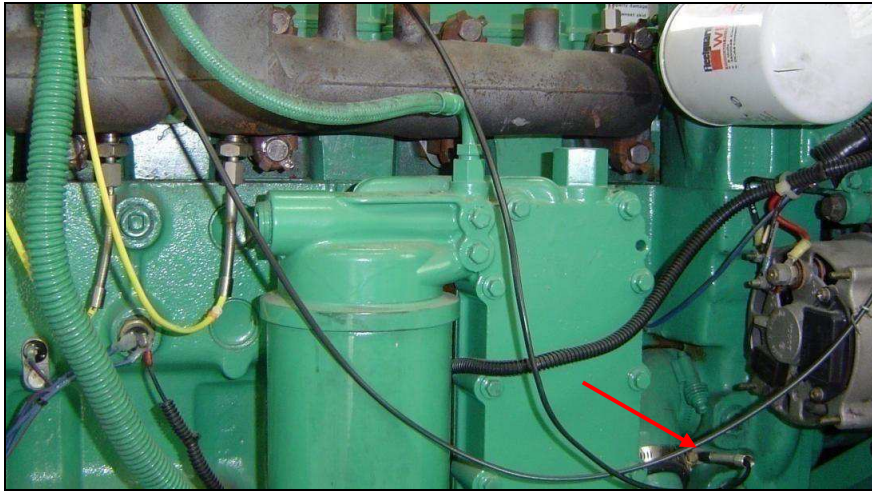
Figura 3.10 – Termopar para medição da temperatura do óleo lubrificante



Fonte: Autoria própria

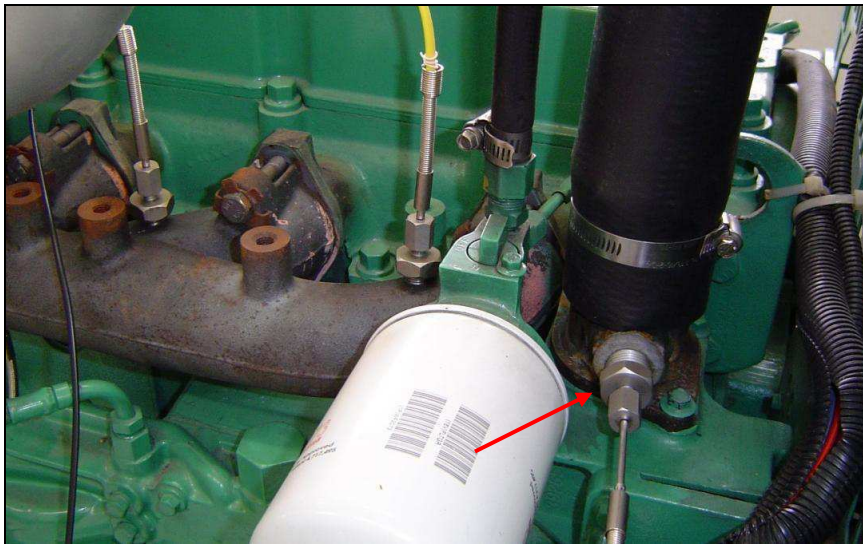
Existe um termopar instalado nas imediações da entrada e saída de água no motor, Figuras 3.11 e 3.12, isto é, a montante e a jusante do radiador, de forma a permitir o acompanhamento da temperatura da água no sistema de arrefecimento do motor a fim de impedir o seu superaquecimento.

Figura 3.11 – Termopar instalado a montante do radiador



Fonte: Autorial própria

Figura 3.12 – Termopar instalado a jusante do radiador



Fonte: Autorial própria

Um ponto que é importante resaltar destes termopares, Figura 3.11 e 3.12, é o fato de que, se for conhecida a vazão de água poder-se calcular a quantidade de calor retirada pelo sistema.

Também há instalados no laboratório transdutores de pressão e termopares, com o intuito de medir a pressão atmosférica local, e as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco, no sentido de possibilitar uma correção de valores de potência disponibilizada pela unidade e transferência de calor entre o motor-gerador e o ambiente externo, além das propriedades do ar na entrada do motor, Figura 3.13.

Figura 3.13 – Sistema de medição das condições atmosférica no laboratório

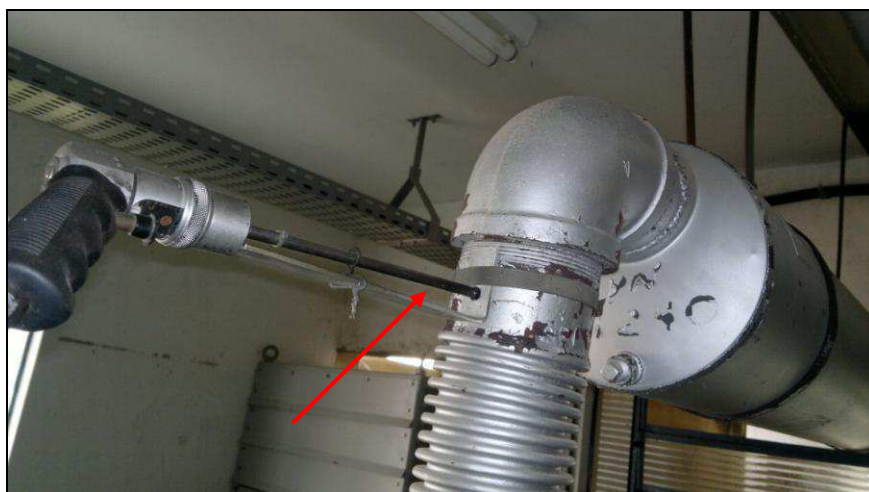


Fonte: Autoria própria

3.2.5. Sistema de análise dos gases de escape

Com o objetivo de se avaliar a emissão de poluentes do motor operando em condições previamente estabelecidas, uma sonda instalada no coletor de descarga do motor, Figura 3.14, para coletar os gases durante o processo, isso em tempo real, e acoplado ao sistema foi utilizado um analisador de gases fabricado por *Kane International Limited*, modelo K 940, Figura 3.15.

Figura 3.14 – Sonda do analisador de gases



Fonte: Autoria própria

Figura 3.15 – Analisador de gases/modelo K 940



Fonte: Autoria própria

Na Figura 3.14, vê-se a sonda do analisador de gases instalada no escapamento do motor, onde os gases foram captados para análise.

3.2.6. Sistema de medição de vazão de ar

O medidor de vazão de ar utilizado no sistema é do tipo turbina, Figura 3.16, e sua funcionalidade consiste em um corpo e um rotor, montado em seu interior, cuja velocidade angular é diretamente proporcional à velocidade do fluído em que está sendo medido.

Um sensor de configuração magnética ou indutiva é montado no corpo do medidor de maneira a captar a passagem das aletas do rotor, gerando um trem de pulsos de característica senoidal. Estes pulsos são, na sequencia, enviados para uma unidade pré-amplificadora ou um conversor para que resultem em sinal de saída (pulsos quadrados) de alta impedância ou sinais analógicos.

Figura 3.16 – Medidor de vazão de ar – Tipo turbina



Fonte: Autoria própria

A Tabela 3.5 apresenta as características técnicas do medidor de vazão, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.5 – Especificações técnicas do medidor de vazão marca Nykon Dwyler, modelo mtg100f1seerfn / mrtb3.

| | |
|--------------------------------|-----------------------|
| Precisão para gases | 1% |
| Repetibilidade | 0,05% |
| Pressão máxima de operação | 3×10^7 Pa |
| Temperatura máxima de operação | 180°C |
| Vazão máxima de ar | 735 m ³ /h |
| Vazão máxima de gás | 44 m ³ /h |

3.2.7. Sistema de medição da vazão do gás natural

O sistema de medição de vazão de gás natural, que pode ser visto na Figura 3.17 possui as mesmas especificações do medidor de vazão de ar (Tabela 3.5), mudando apenas a sua capacidade de vazão (44 m³/h). O medidor de vazão de gás está instalado na linha de alimentação de gás que vem do redutor de pressão, passando pelo kit gás até o motor.

Figura 3.17 – Medidor de vazão de gás – Tipo turbina

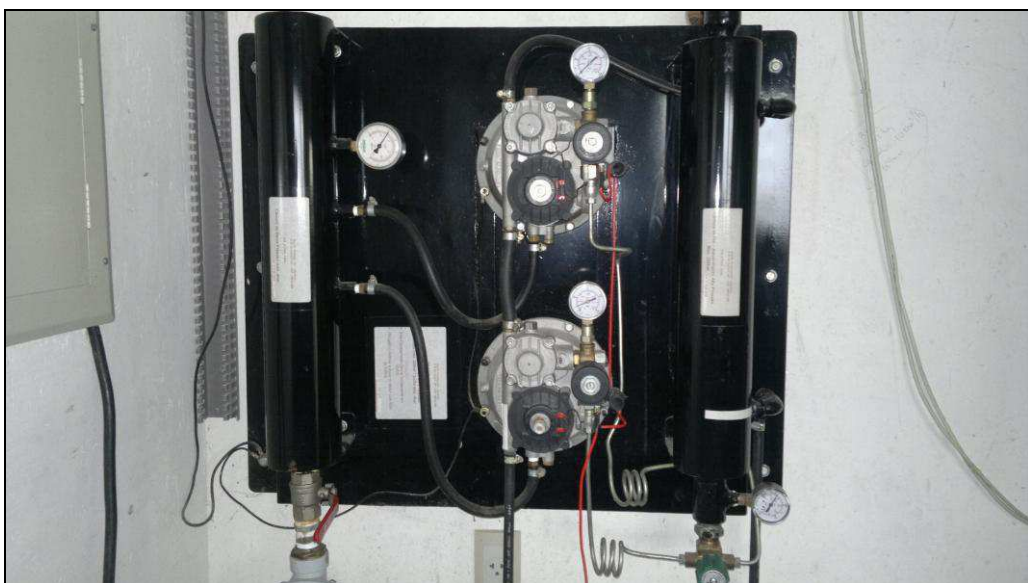


Fonte: Autoria própria

3.2.8. Sistema de redução de pressão do gás natural

O sistema conta com um redutor de pressão de gás instalado na linha de alimentação, Figura 3.18, este se encontra entre a linha do berço dos cilindros onde o GN sai com a uma pressão de 220 bar e é reduzida para próximo da pressão atmosférica (0,02 bar), o que vai ser necessário para operar o motor.

Figura 3.18 – Redutor de pressão de gás natural



Fonte: Autoria própria

3.2.9. Sistema de armazenagem de gás natural

O sistema de armazenagem de gás natural é composto por um conjunto de 10 (dez) cilindros, alocados num reboque, Figura 3.19. Tal alocação facilita o transporte dos cilindros até um posto de GNV para ser reabastecido. Este conjunto de cilindro tem uma capacidade máxima de 260 Nm³. O GNV se encontra armazenado a uma pressão de 220 bar, em temperatura ambiente.

Figura 3.19 – Sistema de armazenagem de gás natural



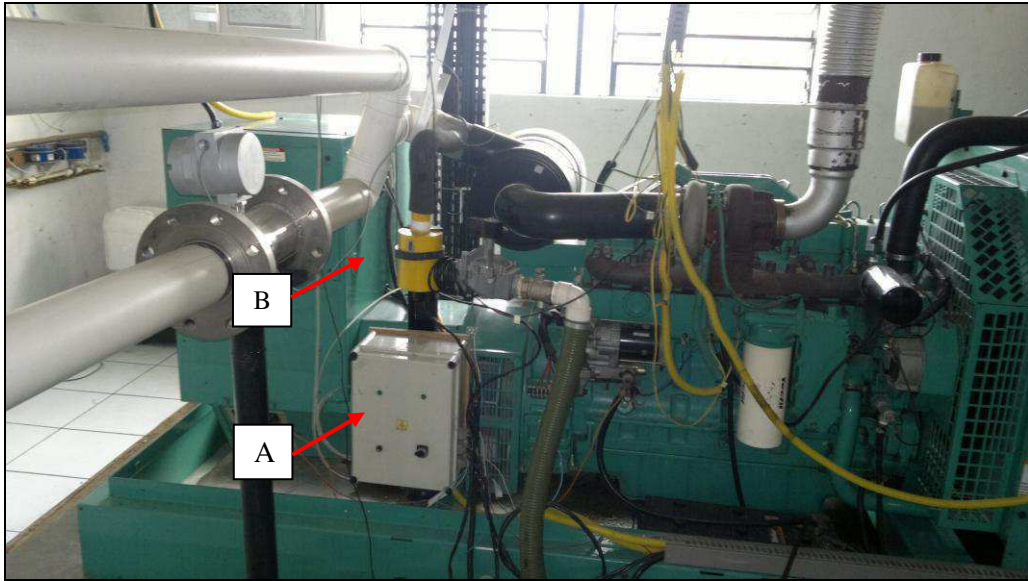
Fonte: Autoria própria

3.2.10. Unidade de controle de mistura ar-gás para o motor

O fluxo de gás para o motor é controlado em função de parâmetros, tais como: temperatura dos gases de escapamento e pressão no coletor de admissão. É constituído de uma central eletrônica, que recebe as informações de temperatura e pressão e em função destas, envia sinal para a válvula controladora de fluxo, que dosa a mistura ar-gás natural fornecida ao motor.

Na Figura 3.20 apresenta-se o sistema montado, onde se destaca a central eletrônica (A), e a válvula dosadora de GN (B).

Figura 3.20 – Controle de mistura ar-gás para o motor (kit gás)



Fonte: Autoria própria

3.2.11. Sistema de medição de potência no motor-gerador

Foi utilizado no sistema um banco de carga resistiva, da marca ALFA OHMIC, com capacidade de 150 kW, Figura 3.21, para obter a potência no eixo do motor, onde se trata de uma unidade acoplada ao motor-gerador, que tem como objetivo medir a potência elétrica no gerador.

Figura 3.21 – Banco de carga ALFA OHMIC/150 kW



Fonte: Autoria própria

Durante os testes as cargas foram variadas em: 40, 60, 80, 100 e 120 kW.

O primeiro ensaio foi realizado com motor-gerador operando com o óleo diesel B5, para servir de padrão para os ensaios posteriores. Conseqüentemente foram utilizadas as misturas de biodiesel e GN, que variaram do B50 ao B100, ou seja, até 100% de biodiesel.

Após a conclusão dos ensaios e a partir dos dados coletados, em forma de planilha no Excel, planilhas estas disponibilizadas nos APENDICES do trabalho, gráficos foram gerados para se obter um melhor entendimento das situações que ocorreram e estes serão apresentados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

COMENTÁRIOS E RESULTADOS OBTIDOS

Nesse capítulo serão apresentados e discutidos, a partir dos ensaios desenvolvidos no laboratório, os resultados obtidos.

4.1. Comentários e discussões dos resultados obtidos

As emissões provenientes da combustão do motor-gerador diesel, foco do nosso trabalho, influenciam significativamente na poluição do ar e nas condições de vida do homem, daí algumas situações precisam ser enfatizadas, por exemplos, o motor utilizado em nosso trabalho possui uma rotação fixa, com a variação da potencia, e o biodiesel utilizado foi oriundo da semente de algodão, assim os dados apresentados, com relação a emissão de gases para o meio ambiente precisam ser analisados e comparados com trabalhos próximos das especificações deste, porque assim gera-se uma conformidade com os resultados obtidos.

Utilizou-se nesse trabalho um comparativo com resultados de outros que tinham especificações próximas aos elementos utilizados nessa pesquisa, como: cilindrada, taxa de compressão, tipo de injeção, potência nominal e, principalmente, a metodologia de uso dual

de combustível empregada, entre outras, sendo possível na maioria das vezes apenas analisar dados pontuais.

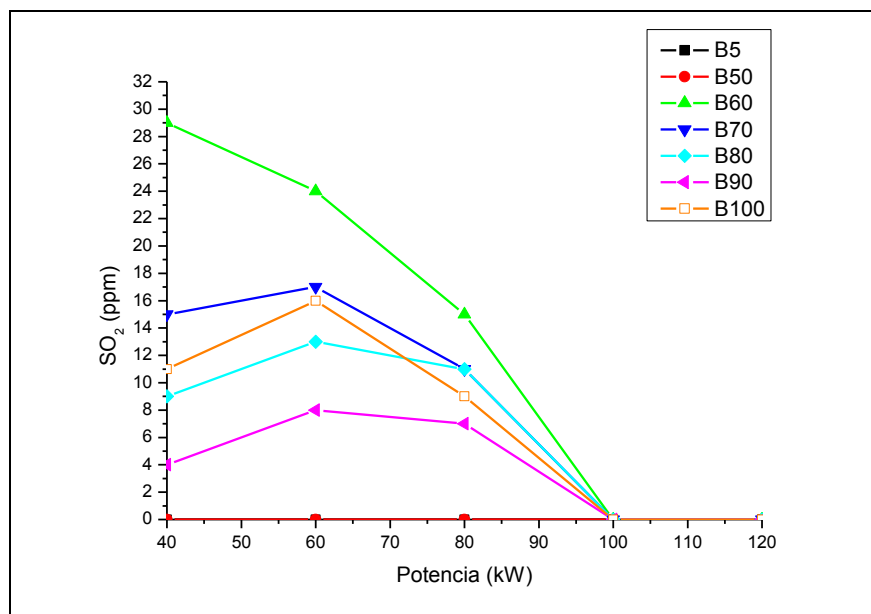
Durante os testes o consumo de combustível se apresentou sem grandes variações com a variação da carga, seja qual fosse à variação de biodiesel e GN; porém verificou-se a necessidade de maior vazão de diesel/biodiesel e de GN na medida em que a carga evoluiu para poder manter a taxa de substituição em torno de 85%. Estes valores praticamente concordam com os de Costa (2007) que avaliou este mesmo motor a diesel puro, mas com taxa de substituição em torno de 84%.

4.1.1. Dióxido de Enxofre

Primeiramente será analisado o dióxido de enxofre (SO_2), elemento causador de chuvas ácidas, visto ser este um dos componentes mais agressivos emitidos pelo motor diesel.

Os valores de SO_2 neste trabalho variaram em torno de 4 a 29 ppm, com a carga de 40 kW, para as diversas misturas, conforme Figura 4.1.

Figura 4.1 – Dióxido de enxofre x Potência



Fonte: Autoria própria

Para o diesel padrão (B5) e para a mistura B50 verificou-se uma inconsistência dos resultados obtidos, devido possivelmente consequências internas durante a combustão, assim sendo, o composto formado não foi reconhecido pelo analisador de gases, pois o próprio GN apresenta em sua composição pequena percentagem de enxofre, que serve como odorizador (*mercaptana*) do GN, para que em casos de vazamento ele seja detectado, e assim sendo este deveria ser expelido na combustão.

A mistura B60 foi que gerou maior quantidade de SO₂, em baixa carga, porém com a elevação da carga todas as misturas tenderam para 0 (zero) ppm, permanecendo nula com a continuação dessa elevação da carga, indicando uma característica de não poluição por componentes de enxofre pelo gás natural.

Verificando-se os dados coletados, percebe-se um decréscimo de SO₂ com a variação da carga, e tendendo a ter um valor quase constante com o aumento da carga, o que não é de se esperar, pois na medida em que se aumenta a quantidade de diesel com a variação da carga, proporcionalmente se aumenta a injeção de enxofre ao motor com conseqüente aumento proporcional de SO₂ no escape.

Costa (2007) apresenta que para a maior taxa de substituição, em torno de 82% e diesel puro, verificou uma variação quase linear crescente das emissões de SO₂ na faixa de 40 kW a 120 kW iniciando em torno de 15 ppm até em torno de 70 ppm.

4.1.2. Dióxido de Carbono

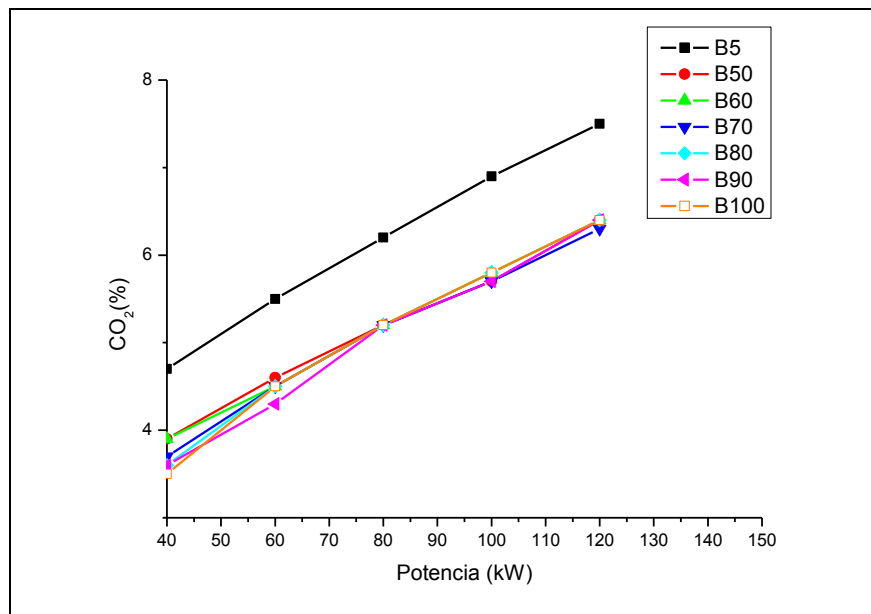
Com relação às emissões de dióxido de carbono (CO₂) percebe-se que o nível da emissão de CO₂ cresce com a elevação da potência, isso decorre da qualidade da combustão, apresentando uma maior eficiência com o crescimento do nível deste componente e um decréscimo do nível de CO.

Para baixas cargas, a quantidade de combustível fornecida é pequena, isto é, a mistura permanece pobre, produzindo mais calor na câmara de combustão, resultando em temperatura de chama baixa, conseqüentemente existe menos conversão de CO para CO₂, porém quando a quantidade de combustível fornecido aumenta, a combustão deste combustível produz mais

calor na câmara de combustão resultando em maior conversão de CO em CO₂, conforme Sheti e Salariay (2004).

Analisando a Figura 4.2 verificamos que para quaisquer combinações de diesel/biodiesel proporcionaram menores emissões em relação ao motor operando com o B5, porém as emissões aumentam com o aumento da carga.

Figura 4.2 – Dióxido de carbono x Potência



Fonte: Autoria própria

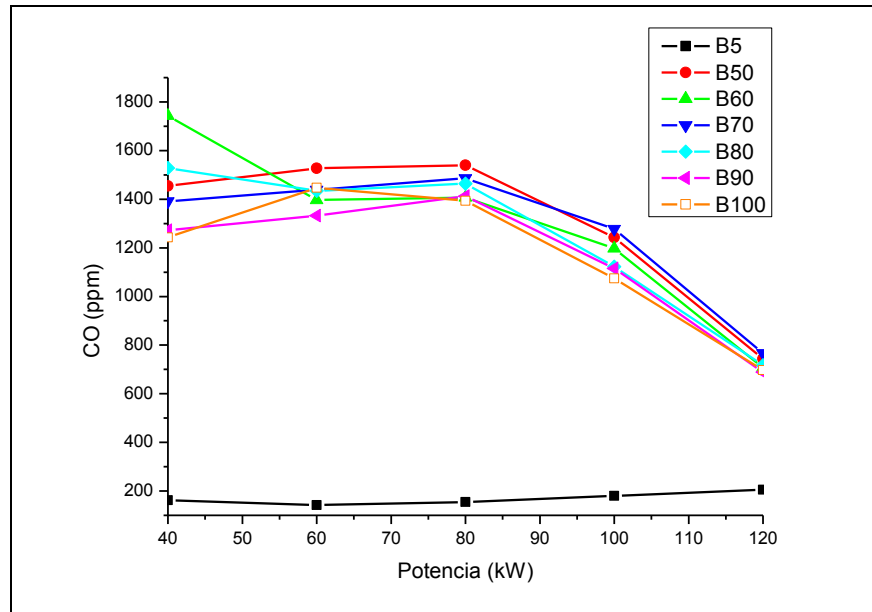
Costa (2008) registrou para a maior taxa de substituição (em torno de 84%) e diesel puro estes percentuais variando entre 3,4 e 5,5%, apontando para a operação dual com biodiesel ser bastante promissora do tocante às emissões deste composto.

4.1.3. Monóxido de Carbono

Agora serão analisadas as emissões do monóxido de carbono (CO).

Observando a Figura 4.3 percebe-se que a aplicação de combinações diesel/biodiesel tornou as emissões do CO maiores do que as experimentadas com o motor operando com o B5, este fato pode ser explicado principalmente pelo motivo do motor está operando em modo dual, o que leva este modo de operação a apresentar um maior percentual de CO, característico da utilização de um combustível gasoso.

Figura 4.3 – Monóxido de carbono x Potência



Fonte: Autoria própria

Segundo Papagiannakis e Hountalas (2003), em geral os valores de emissão de CO sob operação de forma dual são consideravelmente mais altos quando comparados a operando com diesel puro. Para pequenas cargas, a baixa taxa de combustão de combustíveis gasosos, que mantêm a temperatura da carga em níveis baixos, resulta na redução do monóxido de carbono. Em potências mais elevadas, as emissões de CO aumentam com o aumento da taxa de substituição do diesel e, atingindo determinado valor de taxa de substituição ela começa a decrescer, como resultado da alta temperatura do gás e rápida taxa de combustão, em concordância com os valores obtidos neste trabalho.

Entre as misturas diesel/biodiesel verifica-se que a B90 e a B100 tem a melhor resposta em relação à emissão deste poluente e que todas as misturas possuem uma tendência de reduzir as emissões de CO com o aumento da carga, em torno da carga de 80 kW. Possivelmente, se aumentássemos a carga de operação dos ensaios, os resultados das misturas e o do diesel padrão se igualariam.

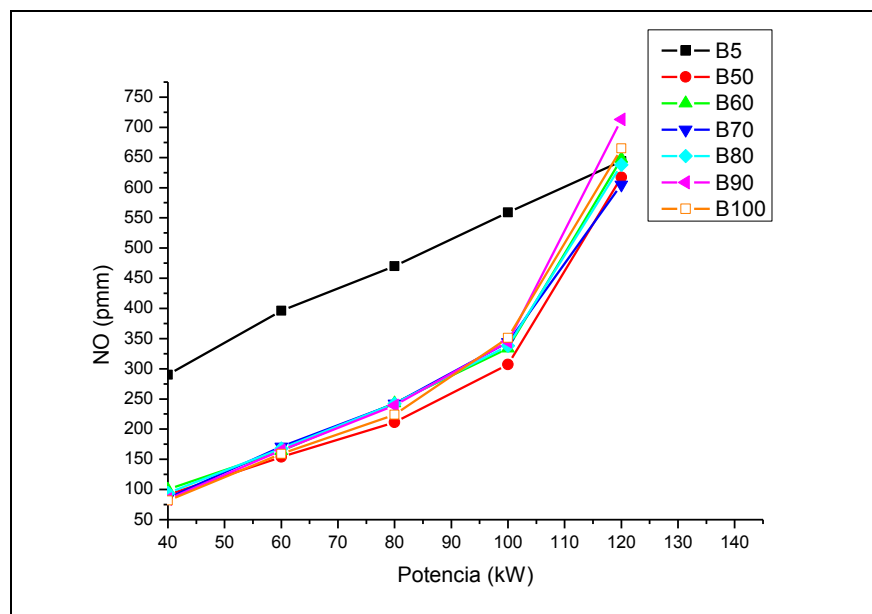
Heywood (1988) relata que valores de CO dependem do tipo de motor e das condições de trabalho, variando de 1 % a 2 %. Destaca ainda que a emissão de CO em motores do ciclo diesel é relativamente baixa e não denotam uma importância muito grande.

Observando os resultados de Costa (2008) verifica-se que os resultados aqui obtidos para as misturas de diesel com biodiesel foram bastante promissoras, visto que foram observadas variações deste composto na gama de valores de 0,07 a 0,17%, enquanto que naquele trabalho estes valores foram de 0,075 a 0,20 % para a maior taxa de substituição (84%), tomando como intervalo de potências as mesmas cargas deste trabalho.

4.1.4. Óxidos Nítricos

Com relação aos Óxidos Nítricos (NO), a Figura 4.4 revela que o motor operando com combinações de diesel/biodiesel sejam quais forem às proporções, apresenta resultados bem satisfatórios na emissão de NO, quando comparado com a utilização do B5.

Figura 4.4 – Óxidos nítricos x Potência



Fonte: Autoria própria

Na medida em que se aumenta a carga, há um aumento gradativo da emissão deste poluente, onde estes tendem a convergir para os da operação com o diesel padrão, porém os valores que superam o B5 foram apenas as misturas B90 e B100.

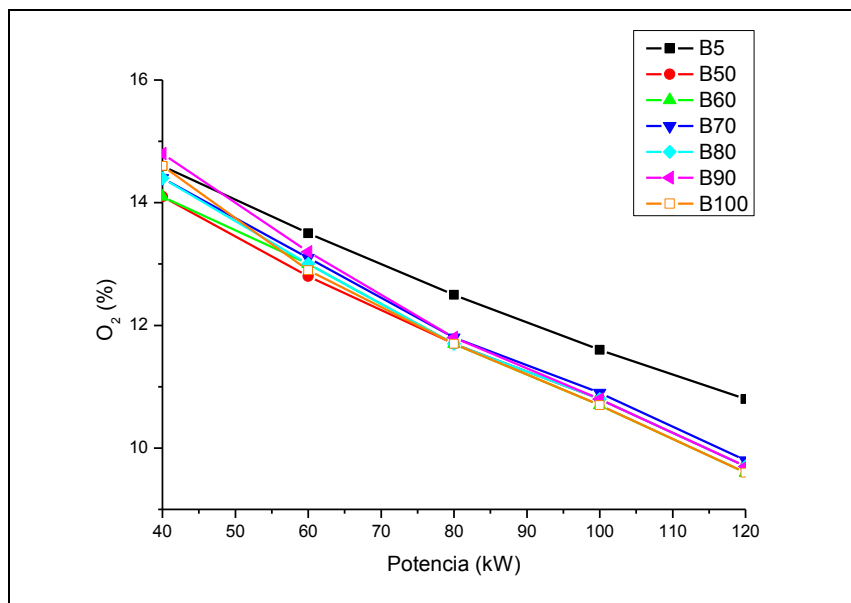
A formação de NO depende muito da alta temperatura de combustão que propicia a formação deste composto através da reação, porém como não há tempo para a estabilização nos cursos de expansão e exaustão (curto tempo de residência), estes compostos tem tendência de aumentar sua concentração em altas cargas.

Em geral, não se tem consistência em dizer que as emissões de NO_x são melhores ou piores quando se compara o uso de biodiesel (puro ou em combinações) com o do diesel fóssil, pois os resultados variam muito de acordo com o tipo de máquina, a tecnologia empregada, tipo de matéria prima do biodiesel entre outros, embora muitos apontem para um leve aumento das emissões desse composto.

4.1.5. Oxigênio

Analisando os resultados do oxigênio (O_2), Figura 4.5, verifica-se que as misturas de diesel/biodiesel produziram menor emissão de O_2 em relação à operação com o B5, tal fato é desejável, pois na combustão espera-se que todos os elementos se oxidem e o mínimo deste composto possa sobrar nos produtos de escape.

Figura 4.5 – Oxigênio x Potência



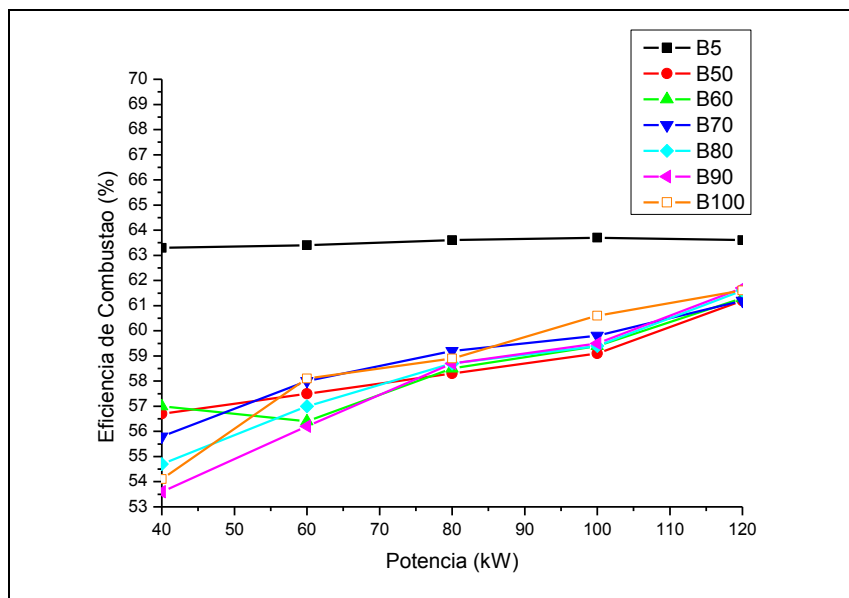
Fonte: Autoria própria

Sendo o tempo de injeção do combustível para rotações elevadas muito pequeno, a uniformidade do combustível com o oxigênio presente na câmara de combustão não ocorre completamente, então, o O_2 não usado aparece nos gases de exaustão do motor. Para regime de baixas potências, menos combustível é fornecido à câmara de combustão e a mistura permanece pobre, resultando em mais O_2 não usado na exaustão. Em cargas mais elevadas, mais oxigênio foi consumido devido ao aumento da quantidade de combustível fornecido, resultando no decréscimo de O_2 não usado.

Ao se usar mistura de diesel e gás natural, a homogeneização da mistura com o ar é maior, resultando um melhoramento da combustão, gerando menos O_2 não usado nos gases de exaustão, segundo Shethi e Salariay (2004).

Com relação à eficiência de combustão do sistema testado, observando-se a Figura 4.6 percebe-se que, todas as misturas de diesel/biodiesel apresentaram valores de eficiência crescentes, quando se eleva a carga, até atingirem valores próximos de 60%, porém, inferiores aos apresentados quando o motor operou com B5, onde se registrou valores de aproximadamente 63,5%. Este comportamento da combustão confirma os resultados das emissões apresentadas e discutidas anteriormente.

Figura 4.6 – Eficiência de Combustão x Potência



Fonte: Autoria própria

CAPÍTULO 5

5.1. Conclusões

Pode-se concluir que o motor operou satisfatoriamente em modo dual com biodiesel e gás natural, não apresentando qualquer anormalidade em seu funcionamento, o que nos leva a afirmar que este modo de operação dual com biodiesel, nas misturas testadas com o gás natural, é perfeitamente viável, como exemplo na utilização em grupos geradores.

Analisando os resultados obtidos no decorrer desse trabalho podem-se observar as seguintes conclusões, em relação às emissões:

Com relação à emissão de SO_2 , verificou-se que quando o motor operou com o B5 e com a mistura B50, talvez tenham acontecido reações intrínsecas durante o processo de combustão e conseqüentemente o analisador não reconheceu o composto formado, mas para as demais misturas houve um decréscimo considerável da emissão desse elemento quando a carga foi elevada.

Para o caso da emissão de CO_2 , este apresentou valores mais baixos para as misturas diesel/biodiesel ensaiadas quando comparado ao B5, sendo que a emissão desse elemento aumentou com o aumento da carga, o que é característica dos motores diesel.

Verificando a emissão de CO, para as misturas testadas todas apresentaram uma maior emissão desse elemento, quando comparado com o B5, porém quando a carga aumentou houve um decréscimo acentuado da emissão do CO. Observando o aumento da carga, ocorre praticamente uma redução de 50% na emissão de CO para a mistura B60. Vale ainda enfatizar se compararmos os resultados alcançados com as misturas de diesel/biodiesel, todas apresentam valores inferiores que um motor ciclo Otto, onde esse valor é aproximadamente 2000 ppm de emissão de CO.

Quanto à emissão de NO, as misturas ensaiadas apresentaram valores inferiores quando comparasse o motor operando com o B5, para cargas pequenas. Quando a carga se elevou, ocorreu um aumento da emissão de NO para todas as misturas, convergindo para os resultados quando o motor operou com o B5, porém B90 e B100 foram as que ultrapassaram tal valor.

A análise dos gases de escape indicou valores de 14,80% de O₂, com a carga de 40 kW e a mistura de B90 e 14,60% para o B5, na mesma carga. Quando a carga foi de 120 kW o motor operando com o B5 apresentou 10,80% de O₂ e 9,70% com a mistura B90.

Daí, com relação às emissões desse motor operando em modo diesel/biodiesel e gás natural, pode-se verificar nos gráficos apresentados, que o sistema apresenta algumas reduções, quando comparado ao modo diesel/gás natural. Vale se destacar neste momento que as emissões para o motor trabalhando em modo simples apenas com diesel, estes valores são bem acima dos mostrados no modo dual como mostrado em outras literaturas.

Com relação à eficiência de combustão, o motor operando com o B5 apresentou um resultado melhor, isso devido possivelmente à presença de um combustível gasoso nas misturas, mas com a elevação das cargas a eficiência de combustão das misturas tende a convergir para os valores do motor operando com o B5, 63,60%. Com relação à eficiência e ao consumo de combustível os valores obtidos são aceitáveis quando comparados com o padrão B5.

5.2. Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendação para trabalhos futuros, considerando o que foi apresentado no presente trabalho, pode-se propor:

- Utilizar misturas a partir do B10 a B100 de biodiesel e gás natural, e fazer um comparativo com as variáveis e resultados deste trabalho;
- Fazer a mesma análise aumentando a taxa de substituição do gás natural;
- Utilizar o biodiesel oriundo de outra matéria-prima e analisar seus gases de emissão;
- Estudar o reaproveitamento de energia do processo a partir dos gases de escape para cogeração.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – GÁS NATURAL. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em 20 set 2011.

BALANÇO ENERGETICO NACIONAL 2010 – BEN 2010, Ano base 2009/Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro, Brasil : EPE 2010.

BALANÇO ENERGETICO NACIONAL 2011 – BEN 2011, Resultados Preliminares Ano base 2010/Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro, Brasil : EPE 2011.

BALANÇO ENERGETICO NACIONAL 2012 – BEN 2012, Resultados Preliminares Ano base 2011/Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro, Brasil : EPE 2012.

BIOCOMBUSTIVEIS. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/matriz-energetica/biocombustiveis/print>>. Acesso em 06 abr 2012.

BIODIESELBR, Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com>>. Acesso em 25 out 2011.

BIZZO, W.A., **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Notas de aula, 2003. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP0.pdf>. Acesso em 05 fev 2012.

BRASIL, R., **Avaliação técnico-ambiental do uso de biodiesel em grupo-gerador**. 2009.

CANAKCI, M; HOSOZ, M. **Energy and Exergy Analyses of a Diesel Engine.Fuelled with Various Biodiesels**. Energy Sources, Part B, 1(2006):379–394. Copyright © Taylor & Francis Group, LLC.

CLÁUDIO, J.; **Princípios de funcionamento, instalação, operação e manutenção de grupos diesel geradores**. Disponível em <<http://www.joseclaudio.eng.br>>. Acesso em 10 dez 2011.

COSTA, YOGÉ JERÔNIMO RAMOS DA; **Análises Energética e Exergética de um Motor de Combustão Interna Operando com Mistura de Diesel e Gás Natural**, Tese apresentada a UFCG/DEM para titulação de doutor, em abril de 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE/2012 - Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/Petroleo/Paginas/default.aspx>>. Acesso em 02 fev 2012.

FERGUSON, C. R. **Internal combustion engines – Applied thermodynamics**. New York: Editora: John Wiley & Sons, 2001.

GASNET, Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/novo_gasnatural/gas_completo.asp>. Acesso em 23 mar 2012.

GIACOSA, D.; **Motores Endotérmicos**, Editorial Dossat, S. A., 1964.

GPL-DIESEL: Disponível em: <<http://www.mastergas.pt/gpl-diesel.shtml>>. Acesso 26 set 2012.

GRANDO, F. **A força do combustível verde**. Revista do CONFEA, Brasília, v. 9, nº 22, p. 14-17, jun. 2005.

HEYWOOD, JB.; **Internal combustion engine fundamentals. International**; ed. McGraw-Hill; 1988.

IEMA. **Relatório da qualidade do ar da grande Vitória**. Governo do estado do Espírito Santo. Ano 2002.

MARTINELLI, Jr. L. C.; **Motores de combustão interna: conceitos básicos**; Panambi, RS; Editora da Unijuí, Campus Panambi, 2003.

MOTOR A DIESEL, Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_a_diesel>. Acesso em 26 set 2012.

MEDEIROS, M. A. O.; ARAÚJO, A. S.; FERNANDES, N. S. **Estudo comparativo das propriedades físico-químicas do óleo diesel combustível nos estados do RN e PB**. In: 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, 2003. Anais, CD Rom.

NAMASIVAYAM A.M, CROOKES RJ, KORAKIANITIS T, OLSEN J., **Assessment of combustion in natural gas fuelled compression ignition engines with DME and RME pilot ignition**. International Journal of Engine. 10(3)(2009) :165–74.

NAMASIVAYAM A.M, KORAKIANITIS T, CROOKES RJ, BOB-MANUEL, K.D.H, OLSEN J., **Biodiesel, emulsified biodiesel and dimethyl ether as pilot fuels for natural gasfuelled engines**. Applied Energy 87 (2010): 769–778.

OBERT, E. F.; **Motores de combustão interna**; Porto alegre: Editora Globo, 1971.

OLIVEIRA, F. B.; VANDRESEN, M.; E PEREIRA, M.; **Desenvolvimento de kit para conversão de motores diesel estacionários de geradores para operar com mistura diesel-gás natural**; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IF-SC | Unidade Florianópolis; 2007.

PBGÁS. Companhia Paraibana de Gás Natural. Disponível em < <http://www.pbgas.pb.gov.br> >. Acesso em 10 dez 2011.

PAPAGIANNAKIS, R. G.; HOUNTALAS, D. T.; **Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a dual fuel diesel engine**; Applied Thermal Engineering; 23; pp. 353 – 365, 2003.

PARENTE, E. J. DE SÁ; **BIODIESEL: Uma Aventura Tecnológica num País Engraçado**; Fortaleza – CE, 2003;

PENTEADO, R.; **Biodiesel no Brasil - Situação atual e tendências para o futuro**; Rio de Janeiro/RJ, 2010.

POUSADA, G.; SANTOS, A.; E SUAREZ, P.; **History and policy of biodiesel in Brazil**. Energy Policy 35, 2007, P. 5393-5398. Elsevier Ltd.

RODRIGUES, R. A.; **Biodiesel no Brasil: diversificação energética e inclusão social com sustentabilidade**. In: FERREIRA, J. R.; CRISTO, C. M. P. N. (Coord.). O Futuro da indústria: biodiesel - Coletânea de Artigos. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior: IEL, 2006. 143 p. (Série Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior, 14).

SHETI, V. P.; SALARIAY, K. S.; **Exhaust analysis and performance of a single cylinder diesel engine run on dual fuels**. Disponível em: <<http://www.ieindia.org/publish/mc/0404/apr04mc1.pdf>>. Acesso em 20 ago 2011.

SIDHU, S.; GRAHAM, J., E STRIEBICH, R.; **Semi Volatile and Particle Emissions from the Combustion of Alternative Diesel Fuels**; Chemosphere; vol. 42; pp. 681 – 690, 2001.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica**: São Paulo: 2a edição, Jonh Wiley & Sons, 1976.

MATERIAL DE APOIO CONSULTADO

ANDRADE, G. S., “**Avaliação experimental da produção de Diesel + Gás Natural e o efeito da variação do ponto de injeção na pressão da câmara de combustão utilizando um motor pressão ASTM-CFR**”, UFGRS (Departamento de engenharia mecânica- RS), 2003.

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. acesso em 20 ago 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14724:2011: Informação e documentação: Trabalhos Acadêmicos: Apresentação**. Rio de Janeiro: 2011, Válida a partir de 17 abr 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-1585 (antiga NBR-5484) PROCONVE**, Legislação Veicular Federal - Resolução n.º 15, de 13 de dezembro de 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5484: motores alternativos de combustão interna de ignição por compressão (Diesel) ou ignição por centelha (Otto) de velocidade angular variável - ensaio - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1985. 8 p.

Apostila SENAI-PB, **Curso de Qualificação - Mecânico de manutenção de motores a álcool e gasolina**, Campina Grande, 2008.

D'ARCE, M.A.B.R.; **Grãos e óleos vegetais: matérias primas**. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br>>, acesso em: 24/07/2011.

DIESEL-Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em:< <http://pt.wikipedia.org/wiki/Diesel>>. Acesso em 08 nov 2010.

EMBRAPA. **Oleaginosas e seus óleos: Vantagens e desvantagens para produção do biodiesel**. Documentos 201. Dezembro/2008.

GARRINE, F.; **Trabalho de licenciatura – Motores de Combustão Interna**, 2006.

JUNIOR, D. P. DE OLIVEIRA, **Motores de combustão interna**, São Paulo, 2004.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M., **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 545p.

LASTRES, L. F.; **“Desenvolvimento de sistema eletrônico de conversão de motores Mercedes-Benz OM – 366 para uso de Gás Natural”**, CENPES (Centro de Pesquisas da Petrobras – RJ), 1984.

MORAN, M. S.; SHAPIRO, H. N.; **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. New York: Editora LTC, 2000.

SILVA, S. N., **“Uso do GNV em ônibus urbano para operar em linha comercial – PROJETO PILOTO GASBUS”** – UFRGS (Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia – RS), 2006.

TAYLOR, C. F.; **The internal combustion engine in theory and practice**. Cambridge: Volume 1; Segunda edição; Library of congress cataloging in publication data, 1977.

VILLANUEVA, L. Z. D.; **“Uso de Gás Natural em veículos leves e mecanismos de desenvolvimento limpo no cotexto brasileiro”**, USP (Tese ao programa Interunidades de Pós- graduação em energia, da Universidade de São Paulo para a arquivção do título de doutor em energia – SP), 2002.

18 RESOLUÇÃO Nº 42, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2004 Ministério De Minas E Energia, Agência Nacional Do Petróleo, fica estabelecida, através da presente resolução, a especificação de biodiesel. D.O.U. 236 De 09/12/2004.

REGULAMENTO TÉCNICO Nº 1/2008. RESOLUÇÃO Nº 7, DE 19 DE MARÇO DE 2008. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Ministério De Minas E Energia. Fica estabelecida a especificação de biodiesel. D.O.U. 20.03.2008.

ANEXO I - TÓPICOS IMPORTANTES DO PROCONVE

(PROCONVE = Programa de controle de poluição do ar por veículos automotores)

Criado em 1988 pelo CONAMA (Conselho Nacional do meio Ambiente), consiste nas seguintes resoluções:

- * Reduzir os níveis de emissão de poluentes;
- * Desenvolver tecnologia para equipamentos de ensaios e medição de poluição;
- * Criar programas de inspeção e manutenção da frota nacional;
- * Padronizar a avaliação de resultados;
- * Promover a melhoria do combustível nacional.

A partir de 01/01/88, os fabricantes devem fornecer ao consumidor, através do manual do proprietário, informações sobre a correta manutenção do veículo para a redução da poluição (esta manutenção deve ser recomendada em adesivos colocados em lugar visível e protegido), as especificações de porcentagem de CO, rotação de marcha-lenta e ponto inicial de ignição. O parafuso da mistura do carburador deve ser lacrado ou possuir limitadores invioláveis para a faixa de regulagem. A emissão de gases do carter deve ser nula em qualquer regime de trabalho.

A partir de 01/10/90, a emissão evaporativa terá o limite máximo de 6,0g/ensaio. Para atender aos níveis de emissões a partir de 1997 o CNP deverá retirar totalmente o **chumbo tetraetila** da mistura álcool/gasolina, mantendo o mínimo de 80 octanas.

ANEXO II - Regulamentação para o biodiesel no Brasil

| CARACTERÍSTICA | UNIDADE | LIMITE | ABNT NBR | ASTM D | EN/ISSO |
|--|--------------------|-------------|----------------|---------------------|--|
| Aspecto | - | LII (1) | - | - | - |
| Massa específica a 20°C | kg/m ³ | 850-900 (2) | 7148, 14065 | 1298, 4052 | - - |
| Viscosidade Cinemática a 40°C, | mm ² /s | 3-6 (3) | 10441 | 445 | EN ISO 3104 |
| Água e sedimentos, máx. (4) | % volume | 0,050 | - | 2709 | - |
| Contaminação Total (6) | mg/kg | 24 | - | - | EN 12662 |
| Ponto de fulgor, mín. | °C | 100,0 | 14508 - | 93 - | - EN ISO 3679 |
| Teor de ester (6) | % massa | 96,5 | - | - | EN 14103 |
| Destilação, 90% vol. recuperados, máx. | °C | 360 (5) | - | 1160 | - |
| Resíduo de carbono dos 100% destilados, máx. | % massa | 0,050 | - | 4530, 189 | EN ISO 10370, - |
| Cinzas sulfatadas, máx. | % massa | 0,020 | 9842 | 874 | ISO 3987 |
| Enxofre total (6) | % massa | 50 | - - | 4294 5453 | - EN ISO 14596 |
| Sódio + Potássio, máx. | mg/kg | 5 | - - | - - | EN 14108 EN 14109 |
| Cálcio + Magnésio (6) | mg/kg | 5 | - | - | EN 14538 |
| Fosforo (6) | mg/kg | 10 | - | 4951 | EN 14107 |
| Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx. | - | 1 | 14359 | 130 | EN ISO 2160 |
| Número de Cetano (6) | - | Anotar | - | 613 | EN ISO 5165 |
| Ponto de entupimento de filtro a frio, máx. | °C | 19 | 14747 | 6371 | - |
| Índice de acidez, máx. | mg KOH/g | 0,5 | 14448 - | 664 - | EN 14104 (8) |
| Glicerina livre, máx. | % massa | 0,02 | - - | 6584 (8)(9) - | EN 14105 (8)(9) EN 14106 (8)(9) |
| Glicerina total, máx. | % massa | 0,25 | - - | 6584 (8)(9) - | EN 14105 (8)(9) |
| Monoglicerídeos (6) | % massa | Anotar | - - | 6584 (8) (9) - | EN 14105 (8)(9) |
| Diglicerídeos (6) | % massa | Anotar | - - | 6584 (8) (9) - | - EN 14105 |

| | | | | | |
|--------------------------------------|---------|--------|---|-------------------|--------------------|
| | | | | | (8)(9) |
| Triglicerídeos (6) | % massa | Anotar | - | 6584 (8) (9) - | EN 14105 (8)(9) |
| Metanol ou Etanol, max. | % massa | 0,2 | - | - | EN 14110 (8) |
| Índice de Iodo (6) | - | Anotar | - | - | EN 14111 (8) |
| Estabilidade a oxidação a 110°C, min | H | 6 | - | - | EN 14112 (8) |

Nota:

(1) LII – Limpido e isento de impurezas.

(2) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para massa específica a 20°C constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

(3) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para viscosidade a 40°C constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

(4) O método EN ISO 12937 poderá ser utilizado para quantificar a água não dispensando a análise e registro do valor obtido para água e sedimentos pelo método ASTM D 1709 no Certificado da Qualidade.

(5) Temperatura equivalente na pressão atmosférica.

(6) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados pelo produtor de biodiesel à ANP, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de matéria-prima, o produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de matérias-primas utilizadas.

(7) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para ponto de entupimento de filtro a frio constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

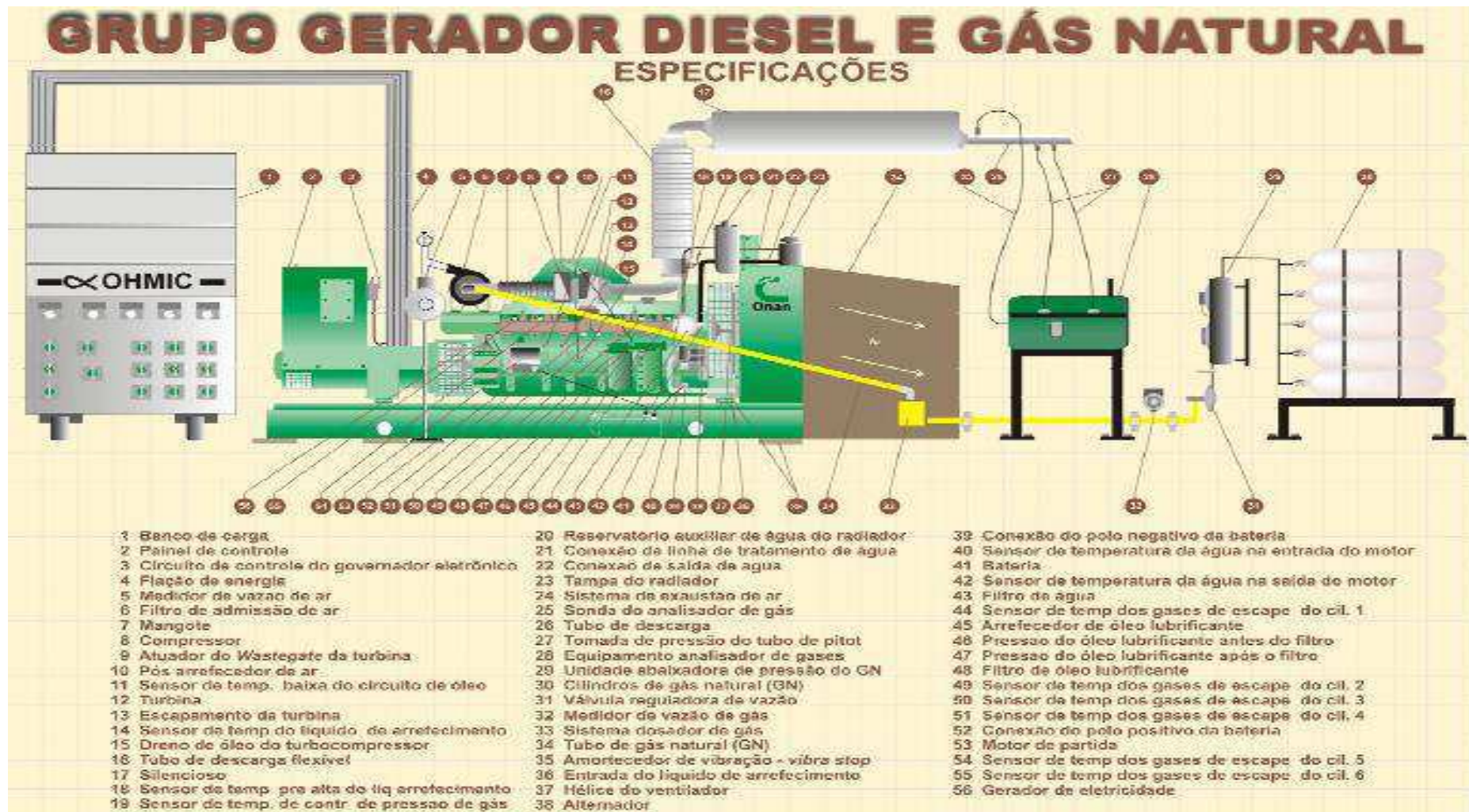
(8) Os métodos referenciados demandam validação para as oleaginosas nacionais e rota de produção etílica.

(9) Não aplicáveis para as análises mono-, di-, triglicerídeos, glicerina livre e glicerina total de palmiste e coco. No caso de biodiesel oriundo de mamona deverão ser utilizados, enquanto não padronizada norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT para esta determinação, os métodos do Centro de Pesquisas da Petrobras - CENPES constantes do ANEXO B para glicerina livre e total, mono e diglicerídeos, triglicerídeos.

Fonte: REGULAMENTO TÉCNICO Nº 1/2008, RESOLUÇÃO Nº 7, DE 19 DE MARÇO DE 2008, ANP.

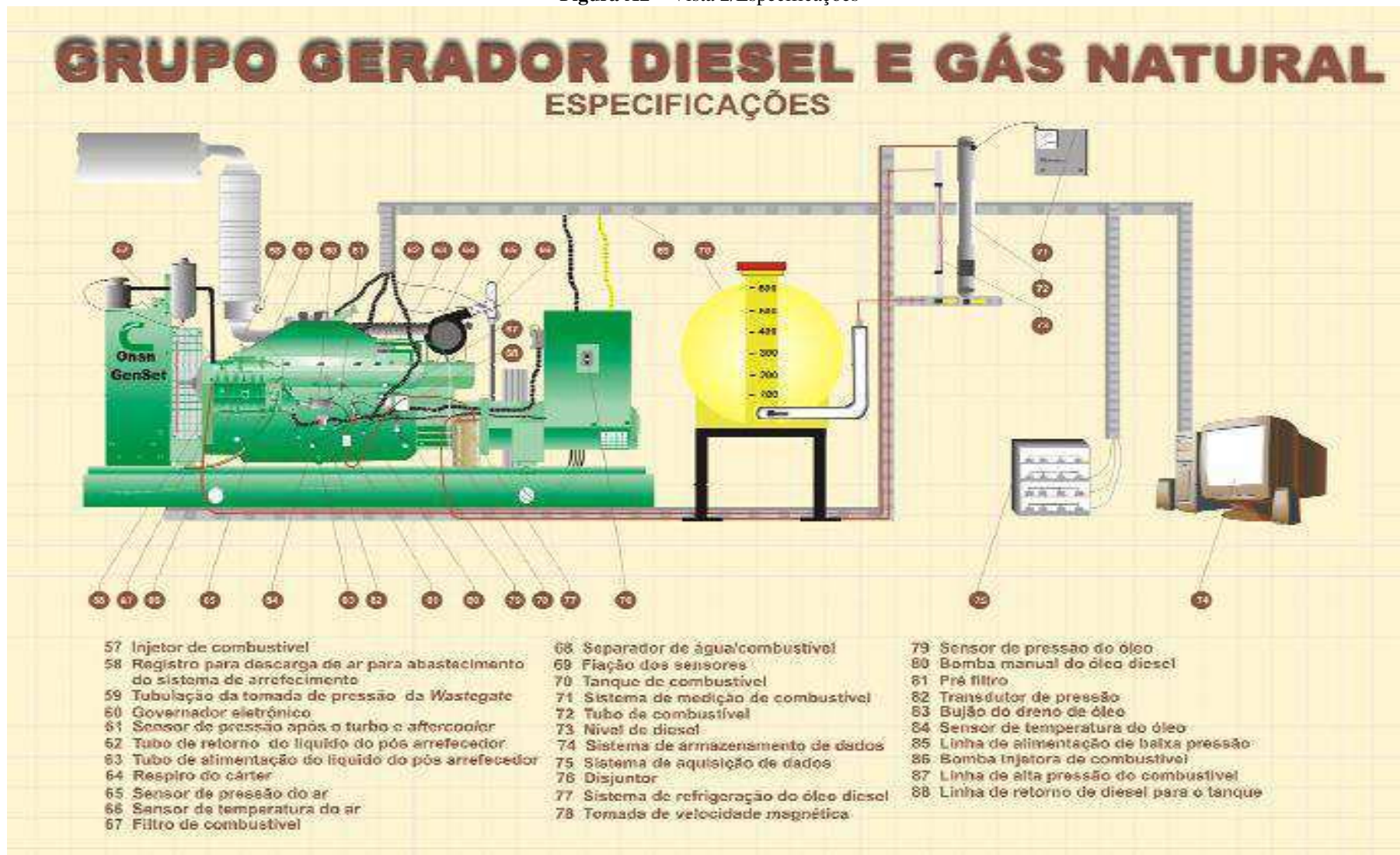
ANEXO III - Esquema do motor-gerador

Figura A1 - Vista1/Especificações



Fonte: Costa, 2007

Figura A2 – Vista 2/Especificações



Fonte: Costa, 2007

APÊNDICE A1 – ENSAIO PADRÃO – DIESEL B5

NOTA: C.P.D = Consumo Padrão Diesel; T.S.G. = Taxa Substituição Gás; V.G.C. = Vazão Gás Combustível

| Data do ensaio 06/08/2012 | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|------------|------------------------|----------------------|--------------------|---------------|-------|-----|-----|-----|-----|
| | | | | | | | | | | | |
| Padrão diesel, gerando energia direto para a rede elétrica | | | | | | | | | | | |
| Potência | 44,40Kg Peso inicial | Peso final | Consumo instantâneo | Tempo em segundos | Consumo horário | LEITURA N° | O2 | CO | NO | SO2 | NO2 |
| KW | 37,60Kg | | | | | Anal Gás | % | ppm | ppm | ppm | ppm |
| 40,00 | 42,70 | 42,10 | 0,60 | 172,20 | 12,54 | 1 | 14,60 | 162 | 290 | 0 | |
| 60,00 | 40,50 | 40,10 | 0,40 | 83,70 | 17,20 | 2 | 13,50 | 142 | 396 | 0 | |
| 80,00 | 38,50 | 38,10 | 0,40 | 68,30 | 21,08 | 3 | 12,50 | 155 | 470 | 0 | |
| 100,00 | 36,50 | 36,00 | 0,50 | 71,80 | 25,07 | 4 | 11,60 | 180 | 559 | 0 | |
| 120,00 | 34,20 | 33,60 | 0,60 | 71,50 | 30,21 | 5 | 10,80 | 205 | 644 | 0 | |
| 140,00 | 31,00 | 30,20 | 0,80 | 81,80 | 35,21 | 6 | 10,00 | 219 | 711 | 0 | |

| CPPotência | Eff | Xair | CO2 | Nox | Non | Noxn | Temp do ar na entrada | Temp do escape na sonda |
|------------|-------|--------|------|-----|---------|---------|--------------------------|----------------------------------|
| KW | % | % | % | ppm | % | % | AMBIENTE | FLUE |
| 40,00 | 63,30 | 231,70 | 4,70 | 304 | 831,00 | 871,00 | 29,70 | 310,00 |
| 60,00 | 63,40 | 182,40 | 5,50 | 407 | 933,00 | 988,00 | 30,40 | 356,00 |
| 80,00 | 63,60 | 148,80 | 6,20 | 496 | 1005,00 | 1050,00 | 30,60 | 391,00 |
| 100,00 | 63,70 | 122,30 | 6,90 | 584 | 1070,00 | 1120,00 | 30,90 | 429,00 |
| 120,00 | 63,60 | 106,90 | 7,50 | 683 | 1151,00 | 1208,00 | 31,10 | 460,00 |
| 140,00 | 63,10 | 91,70 | 8,10 | 746 | 1170,00 | 1221,00 | 31,40 | 500,00 |

APÊNDICE A2 – ENSAIO PADRÃO – MISTURA B50

Ensaio 50% de Bio & Diesel S50 Com 85% Substituição por GNV, gerando ENERGIA direto para a rede elétrica em 23 de Outubro 2012 Manhã, Pressão de Gás 200 Início e 140 Bar Final.

| Potência | Peso inicial | Peso final | MASSA | Tempo | C. P. D. | Consumo horário | T.S.G. 85% | Anal Gas | V.G.C | O2 | CO | NO | SO2 | EFF |
|----------|--------------|------------|-------|--------|----------|-----------------|------------|-------------------|-------|-------|------|--------|-----|-------|
| Kw | Kg | Kg | Kg | Seg | | Kg/h | | Nº | M3 | % | PPM | PPM | PPM | % |
| 40,00 | 11,84 | 11,72 | 0,12 | 248,00 | 12,54 | 1,74 | 86,11 | 1 a 3 | 19,30 | 14,10 | 1454 | 91,00 | 0 | 56,70 |
| 60,00 | 11,30 | 11,18 | 0,12 | 162,10 | 17,20 | 2,67 | 84,51 | 4 a 6 | 21,90 | 12,80 | 1527 | 154,00 | 0 | 57,50 |
| 80,00 | 10,56 | 10,36 | 0,20 | 218,20 | 21,08 | 3,30 | 84,35 | 7 a 9 | 25,40 | 11,70 | 1540 | 211,00 | 0 | 58,30 |
| 100,00 | 9,82 | 9,62 | 0,20 | 183,70 | 25,07 | 3,92 | 84,37 | 10 a 12 | 28,10 | 10,80 | 1243 | 307,00 | 0 | 59,10 |
| 120,00 | 8,90 | 8,70 | 0,20 | 151,80 | 30,21 | 4,74 | 84,30 | 13 a 15, 16,17,18 | 30,80 | 9,70 | 744 | 617,00 | 0 | 61,20 |

| Potência | Xair | CO2 | NOX | FLUE Temp do escape na Sonda | Temperatura Ambiente | Temperatura do Gás | Temp Combustível Com a Pistola | Temp Gas Com a Pistola | Temp. Ent Ar com Pistola |
|----------|--------|------|--------|------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Kw | % | % | PPM | °C | °C | | | | |
| 40,00 | 207,30 | 3,90 | 94,00 | 353,00 | 27,10 | 32,00 | 44,80 | 30,40 | 32,70 |
| 60,00 | 158,00 | 4,60 | 162,00 | 396,00 | 27,50 | 31,00 | 50,70 | 30,40 | 33,40 |
| 80,00 | 127,10 | 5,20 | 222,00 | 430,00 | 27,90 | 31,00 | 54,30 | 30,70 | 36,30 |
| 100,00 | 106,90 | 5,70 | 324,00 | 455,00 | 28,20 | 32,00 | 56,30 | 31,30 | 37,70 |
| 120,00 | 86,60 | 6,40 | 647,00 | 472,00 | 28,70 | 32,00 | 57,60 | 31,30 | 39,10 |

APÊNDICE A3 – ENSAIO PADRÃO – MISTURA B60

Ensaio 60% de Bio & Diesel S50 Com 85% Substituição por GNV, gerando ENERGIA direto para a rede elétrica em 22 de Outubro 2012 Tarde, Pressão de Gás 70 Início e 20 Bar Final.

| Potência | Peso inicial | Peso final | MASSA | Tempo | C. P. D. | Consumo horário | T.S.G. 85% | Anal Gas | V.G.C | O2 | CO | NO | SO2 | EFF |
|----------|--------------|------------|-------|--------|----------|-----------------|------------|----------|-------|-------|------|--------|-----|-------|
| Kw | Kg | Kg | Kg | Seg | | Kg/h | | Nº | M3 | % | PPM | PPM | PPM | % |
| 40,00 | 12,26 | 12,14 | 0,12 | 224,20 | 12,54 | 1,93 | 84,64 | 1 a 3 | 19,10 | 14,10 | 1743 | 100,00 | 29 | 57,00 |
| 60,00 | 11,66 | 11,54 | 0,12 | 178,40 | 17,20 | 2,42 | 85,92 | 4 a 6 | 24,00 | 13,00 | 1397 | 164,00 | 24 | 56,40 |
| 80,00 | 11,22 | 11,02 | 0,20 | 228,90 | 21,08 | 3,15 | 85,08 | 7 a 9 | 27,40 | 11,70 | 1407 | 243,00 | 15 | 58,50 |
| 100,00 | 10,34 | 10,14 | 0,20 | 193,00 | 25,07 | 3,73 | 85,12 | 10 a 12 | 30,80 | 10,70 | 1198 | 334,00 | 0 | 59,40 |
| 120,00 | 9,50 | 9,30 | 0,20 | 170,10 | 30,21 | 4,23 | 85,99 | 13 a 15 | 33,70 | 9,60 | 707 | 648,00 | 0 | 61,30 |

| Potência | Xair | CO2 | NOX | FLUE Temp do escape na Sonda | Temperatura Ambiente | Temperatura do Gás | Temp Combustivel Com a Pistola | Temp Gas Com a Pistola | Temp. Ent Ar com Pistola |
|----------|--------|------|--------|------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Kw | % | % | PPM | °C | °C | | | | |
| 40,00 | 207,30 | 3,90 | 103,00 | 347,00 | 27,40 | 36,00 | 38,90 | 33,00 | 32,40 |
| 60,00 | 167,90 | 4,50 | 170,00 | 396,00 | 27,80 | 40,00 | 47,80 | 35,40 | 34,70 |
| 80,00 | 127,10 | 5,20 | 239,00 | 428,00 | 27,60 | 42,00 | 51,90 | 37,20 | 36,30 |
| 100,00 | 104,90 | 5,80 | 350,00 | 456,00 | 28,10 | 44,00 | 56,20 | 38,00 | 36,40 |
| 120,00 | 84,90 | 6,40 | 689,00 | 470,00 | 28,20 | 46,00 | 58,60 | 39,20 | 39,50 |

APÊNDICE A4 – ENSAIO PADRÃO – MISTURA B70

Ensaio 70% de Bio & Diesel S50 Com 85% Substituição por GNV, gerando ENERGIA direto para a rede elétrica em 16 de Outubro 2012 Manhã, Pressão de Gás 120 Início e 75 Bar Final.

| Potência | Peso inicial | Peso final | MASSA | Tempo | C. P. D. | Consumo horário | T.S.G. 85% | Anal Gas | V.G.C | O2 | CO | NO | SO2 | EFF |
|----------|--------------|------------|-------|--------|----------|-----------------|------------|----------|-------|-------|------|--------|-----|-------|
| Kw | Kg | Kg | Kg | Seg | | Kg/h | | N° | M3 | % | PPM | PPM | PPM | % |
| 40,00 | 10,64 | 10,52 | 0,12 | 245,00 | 12,54 | 1,76 | 85,94 | 1 a 3 | 19,90 | 14,40 | 1391 | 86,00 | 15 | 55,80 |
| 60,00 | 10,34 | 10,22 | 0,12 | 172,30 | 17,20 | 2,51 | 85,43 | 4 a 6 | 22,70 | 13,10 | 1439 | 171,00 | 17 | 58,00 |
| 80,00 | 9,98 | 9,78 | 0,20 | 225,10 | 21,08 | 3,20 | 84,83 | 7 a 9 | 25,40 | 11,80 | 1486 | 242,00 | 11 | 59,20 |
| 100,00 | 9,08 | 8,88 | 0,20 | 195,60 | 25,07 | 3,68 | 85,32 | 10 a 12 | 28,80 | 10,90 | 1278 | 344,00 | 0 | 59,80 |
| 120,00 | 8,06 | 7,86 | 0,20 | 164,40 | 30,21 | 4,38 | 85,50 | 13 a 15 | 31,80 | 9,80 | 767 | 605,00 | 0 | 61,20 |

| Potência | Xair | CO2 | NOX | FLUE Temp do escape na Sonda | Temperatura Ambiente | Temperatura do Gás | Temp Combustível Com a Pistola | Temp Gas Com a Pistola | Temp. Ent Ar com Pistola |
|----------|--------|------|--------|------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Kw | % | % | PPM | °C | °C | | | | |
| 40,00 | 221,50 | 3,70 | 91,00 | 345,00 | 28,30 | 31,00 | 39,60 | 28,30 | 28,50 |
| 60,00 | 164,50 | 4,50 | 180,00 | 385,00 | 28,00 | 32,00 | 45,10 | 29,40 | 31,30 |
| 80,00 | 129,60 | 5,20 | 267,00 | 418,00 | 27,50 | 32,00 | 49,00 | 29,90 | 32,10 |
| 100,00 | 109,00 | 5,70 | 362,00 | 446,00 | 28,80 | 33,00 | | | |
| 120,00 | 88,20 | 6,30 | 654,00 | 464,00 | 28,30 | 35,00 | | | |

APÊNDICE A5 – ENSAIO PADRÃO – MISTURA B80

Ensaio 80% de Bio & Diesel S50 Com 85% Substituição por GNV, gerando ENERGIA direto para a rede elétrica em 16 de Outubro 2012 Tarde, Pressão de Gás 70 Bar Início e 20 Bar Final.

| Potência | Peso inicial | Peso final | MASSA | Tempo | C. P. D. | Consumo horário | T.S.G. 85% | Anal Gas | V.G.C | O2 | CO | NO | SO2 | EFF |
|----------|--------------|------------|-------|--------|----------|-----------------|------------|----------|-------|-------|------|--------|-----|-------|
| Kw | Kg | Kg | Kg | Seg | | Kg/h | | N° | M3 | % | PPM | PPM | PPM | % |
| 40,00 | 16,14 | 16,02 | 0,12 | 244,00 | 12,54 | 1,77 | 85,89 | 1 a 3 | 20,90 | 14,60 | 1243 | 82,00 | 11 | 54,10 |
| 60,00 | 15,74 | 15,62 | 0,12 | 174,50 | 17,20 | 2,48 | 85,61 | 4 a 6 | 23,50 | 12,90 | 1447 | 159,00 | 16 | 58,10 |
| 80,00 | 15,36 | 15,16 | 0,20 | 245,00 | 21,08 | 2,94 | 86,06 | 7 a 9 | 26,70 | 11,70 | 1393 | 224,00 | 9 | 58,90 |
| 100,00 | 14,90 | 14,70 | 0,20 | 208,80 | 25,07 | 3,45 | 86,25 | 10 a 12 | 30,00 | 10,70 | 1074 | 351,00 | 0 | 60,60 |
| 120,00 | 14,20 | 14,00 | 0,20 | 162,30 | 30,21 | 4,44 | 85,32 | 13 a 15 | 32,50 | 9,60 | 697 | 665,00 | 0 | 61,60 |

| Potência | Xair | CO2 | NOX | FLUE Temp do escape na Sonda | Temperatura Ambiente | Temperatura do Gás | Temp Combustível Com a Pistola | Temp Gas Com a Pistola | Temp. Ent Ar com Pistola |
|----------|--------|------|--------|------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Kw | % | % | PPM | °C | °C | | | | |
| 40,00 | 226,50 | 3,60 | 95,00 | 350,00 | 29,80 | 38,00 | 45,10 | 34,20 | 33,60 |
| 60,00 | 167,90 | 4,50 | 177,00 | 393,00 | 30,00 | 39,00 | 50,70 | 35,30 | 34,60 |
| 80,00 | 127,10 | 5,20 | 250,00 | 428,00 | 29,60 | 42,00 | 55,40 | 37,40 | 36,40 |
| 100,00 | 106,90 | 5,80 | 355,00 | 452,00 | 28,40 | 44,00 | 57,60 | 38,40 | 37,80 |
| 120,00 | 86,60 | 6,40 | 679,00 | 466,00 | 28,10 | 45,00 | 58,10 | 38,60 | 38,00 |

APÊNDICE A6 – ENSAIO PADRÃO – MISTURA B90

Ensaio 90% de Bio & Diesel S50 Com 85% Substituição por GNV, gerando ENERGIA direto para a rede elétrica em 17 de Outubro 2012 Manha, Pressão de Gás 180 Bar Início e 120 Bar Final.

| Potência | Peso inicial | Peso final | MASSA | Tempo | C. P. D. | Consumo horário | T.S.G. 85% | Anal Gas | V.G.C | O2 | CO | NO | SO2 | EFF |
|----------|--------------|------------|-------|--------|----------|-----------------|------------|----------|-------|-------|------|--------|-----|-------|
| Kw | Kg | Kg | Kg | Seg | | Kg/h | | Nº | M3 | % | PPM | PPM | PPM | % |
| 40,00 | 13,28 | 13,04 | 0,24 | 477,30 | 12,54 | 1,81 | 85,57 | 1 a 3 | 19,90 | 14,80 | 1272 | 84,00 | 4 | 53,60 |
| 60,00 | 12,72 | 12,60 | 0,12 | 177,10 | 17,20 | 2,44 | 85,82 | 4 a 6 | 22,90 | 13,20 | 1332 | 165,00 | 8 | 56,20 |
| 80,00 | 12,04 | 11,84 | 0,20 | 232,80 | 21,08 | 3,09 | 85,33 | 7 a 9 | 25,80 | 11,80 | 1412 | 239,00 | 7 | 58,70 |
| 100,00 | 11,38 | 11,18 | 0,20 | 199,00 | 25,07 | 3,62 | 85,57 | 10 a 12 | 28,90 | 10,80 | 1115 | 345,00 | 0 | 59,50 |
| 120,00 | 10,46 | 10,26 | 0,20 | 167,20 | 30,21 | 4,31 | 85,75 | 13 a 15 | 31,70 | 9,70 | 689 | 713,00 | 0 | 61,70 |

| Potência | Xair | CO2 | NOX | FLUE Temp do escape na Sonda | Temperatura Ambiente | Temperatura do Gás | Temp Combustivel Com a Pistola | Temp Gas Com a Pistola | Temp. Ent Ar com Pistola |
|----------|--------|------|--------|------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Kw | % | % | PPM | °C | °C | | | | |
| 40,00 | 237,00 | 3,60 | 91,00 | 350,00 | 27,40 | 32,00 | 50,30 | 30,60 | 33,00 |
| 60,00 | 175,00 | 4,30 | 177,00 | 390,00 | 28,20 | 32,00 | 53,80 | 30,90 | 34,40 |
| 80,00 | 129,60 | 5,20 | 261,00 | 425,00 | 28,80 | 33,00 | 55,90 | 31,40 | 36,50 |
| 100,00 | 106,90 | 5,70 | 359,00 | 450,00 | 29,30 | 33,00 | 57,20 | 31,90 | 36,60 |
| 120,00 | 86,60 | 6,40 | 769,00 | 467,00 | 29,70 | 34,00 | 58,30 | 32,80 | 38,10 |

APÊNDICE A7 – ENSAIO PADRÃO – MISTURA B100

**Ensaio 100% de BioDiesel Com 85% Substituição por GNV, gerando ENERGIA direto para a rede elétrica em 17 de Outubro 2012
Tarde, Pressão de Gás 120 Bar Início e 80 Bar Final.**

| Potência | Peso inicial | Peso final | MASSA | Tempo | C. P. D. | Consumo horário | T.S.G. 85% | Anal Gas | V.G.C | O2 | CO | NO | SO2 | EFF |
|----------|--------------|------------|-------|--------|----------|-----------------|------------|----------|-------|-------|------|--------|-----|-------|
| Kw | Kg | Kg | Kg | Seg | | Kg/h | | N° | M3 | % | PPM | PPM | PPM | % |
| 40,00 | 16,14 | 16,02 | 0,12 | 244,00 | 12,54 | 1,77 | 85,89 | 1 a 3 | 20,90 | 14,60 | 1243 | 82,00 | 11 | 54,10 |
| 60,00 | 15,74 | 15,62 | 0,12 | 174,50 | 17,20 | 2,48 | 85,61 | 4 a 6 | 23,50 | 12,90 | 1447 | 159,00 | 16 | 58,10 |
| 80,00 | 15,36 | 15,16 | 0,20 | 245,00 | 21,08 | 2,94 | 86,06 | 7 a 9 | 26,70 | 11,70 | 1393 | 224,00 | 9 | 58,90 |
| 100,00 | 14,90 | 14,70 | 0,20 | 208,80 | 25,07 | 3,45 | 86,25 | 10 a 12 | 30,00 | 10,70 | 1074 | 351,00 | 0 | 60,60 |
| 120,00 | 14,20 | 14,00 | 0,20 | 162,30 | 30,21 | 4,44 | 85,32 | 13 a 15 | 32,50 | 9,60 | 697 | 665,00 | 0 | 61,60 |

| Potência | Xair | CO2 | NOX | FLUE Temp do escape na Sonda | Temperatura Ambiente | Temperatura do Gás | Temp Combustivel Com a Pistola | Temp Gas Com a Pistola | Temp. Ent Ar com Pistola |
|----------|--------|------|--------|------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Kw | % | % | PPM | °C | °C | | | | |
| 40,00 | 237,00 | 3,50 | 84,00 | 350,00 | 30,10 | 38,00 | 39,70 | 34,40 | 33,50 |
| 60,00 | 164,50 | 4,50 | 168,00 | 391,00 | 29,80 | 38,00 | 44,20 | 34,60 | 33,60 |
| 80,00 | 127,10 | 5,20 | 234,00 | 424,00 | 29,00 | 38,00 | 47,80 | 34,60 | 33,60 |
| 100,00 | 102,90 | 5,80 | 372,00 | 449,00 | 28,70 | 38,00 | 50,20 | 34,90 | 35,10 |
| 120,00 | 83,30 | 6,40 | 706,00 | 465,00 | 28,30 | 39,00 | 54,40 | 35,30 | 35,20 |