



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



Luiz Roberto Rocha de Lucena

**ANALISE DAS EMISSÕES, EFICIÊNCIA E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE
UM MOTOR DO CICLO DIESEL DE 206 kW, OPERANDO EM MODO DUAL
COM DIESEL/BIODIESEL E GÁS NATURAL**

Campina Grande, Julho de 2015
PB – Brasil

Luiz Roberto Rocha de Lucena

**ANALISE DAS EMISSÕES, EFICIÊNCIA E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE
UM MOTOR DO CICLO DIESEL DE 206 kW, OPERANDO EM MODO DUAL
COM DIESEL/BIODIESEL E GÁS NATURAL**

Trabalho de Dissertação de Mestrado
apresentado a Coordenação do Programa da
Pós Graduação de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG) para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa e
Prof. Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho

Campina Grande, Julho de 2015
PB – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- L935a Lucena, Luiz Roberto Rocha de.
Análise das emissões, eficiência e condições de operação de um motor do ciclo diesel de 206 kW, operando em modo dual com diesel/biodiesel e gás natural / Luiz Roberto Rocha de Lucena. – Campina Grande, 2015.
118 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.
- "Orientação: Prof. Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa, Prof. Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho".
Referências.
1. Motor Diesel. 2. Grupo Gerador. 3. Gás Natural. 4. Biodiesel. 5. Ciclo Dual. I. Costa, Yoge Jerônimo Ramos da. II. Bezerra Filho, Celso Rosendo. III. Título.

CDU 621.435.8 (043)

Luiz Roberto Rocha de Lucena

Dissertação de mestrado apresentado a
Coordenação do programa da Pós Graduação
de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Campina Grande (UFCG), área de
concentração: Energia

**ANALISE DAS EMISSÕES, EFICIÊNCIA E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE
UM MOTOR DO CICLO DIESEL DE 206 kW, OPERANDO EM MODO DUAL
COM DIESEL/BIODIESEL E GÁS NATURAL**

Dissertação aprovada em _____ / _____ /2015

Prof. Dr. Yoge Jeronimo Ramos da Costa
Instituição: UAEM/CCT/UFCG – Orientador

Prof. Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho
Instituição: UAEM/CCT/UFCG - Orientador

Prof. Dr. José Mauricio Alves de Matos Gurgel
Instituição: LES/UFPB - Examinador

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
Instituição: UAEM/CCT/UFCG - Examinador

Campina Grande, Julho de 2015
PB – Brasil

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais “in memória”, Raimundo Sarmiento Rocha e Maria Vieira de Lucena Rocha, a minha querida esposa Clara Maria Gusmão Rocha e aos meus estimados filhos, Emmanuel Gusmão Rocha, Jackeline Gusmão Rocha e Thiago Gusmão Rocha, pela compreensão manifestada por minha ausência em muitos finais de semana, feriados e outros momentos não menos importantes por necessitar de dedicação exclusiva a este trabalho de pesquisa.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que a estas alturas da vida, me permitiu fazer das minhas fraquezas forças para enfrentar e vencer mais este obstáculo, quiçá, um dos mais difíceis enfrentado até hoje.

Ao amigo, Prof. Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa, pelo companheirismo, incentivos, apoio e pela motivação que me proporcionou com sua presença e inestimável ajuda nos momentos em que mais necessitei, principalmente no desenvolvimento desta pesquisa, sem o qual não teria permitido conseguido concluir com êxito este trabalho.

Ao Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima por ter me incentivado em realizar este trabalho e pelo apoio irrestrito que me foi concedido, principalmente na parte dos laboratórios computacionais, neste e em outros momentos, não menos importantes, de minha carreira profissional, nesta universidade.

Ao Prof. Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho, pela paciência, com que sempre tirou minhas dúvidas nos momentos mais cruciais e pelo companheirismo que lhe é peculiar.

Ao Prof. Dr. Juscelino Maribondo, pelos valiosos conhecimentos passados em suas aulas e que me fizeram crescer muito no quesito elaboração de material para publicação científica, segundo as normas técnicas exigidas.

Ao grande amigo Dr. Fernando José da Silva, companheiro nos muitos ensaios realizados no LTG, pelo apoio e incentivo que fizeram manter acesa a chama de realizar este trabalho.

Não poderia deixar de agradecer ao meu grande amigo Francisco Cândido, do NERG, pelos inúmeros anos de amizade e de trabalhos realizados em parcerias nesta universidade e que me proporcionaram agregar conhecimento adicional em minha formação, para chegar neste estágio, e pelo imenso apoio prestado a esta minha pesquisa em particular.

A UAEM (Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica) e a UAEE (Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica) da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande – PB-Brasil), por colocar a minha disposição o LTG – Laboratório de Termo geração, bem como todos os seus equipamentos para a realização deste trabalho de pesquisa.

A CETENE (Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste) pelo fornecimento gratuito do biodiesel utilizado nos experimentos desta pesquisa.

Aos demais professores da UAEM da UFCG e a todos que direta ou indiretamente colaboraram para o êxito deste trabalho, o meu muito obrigado de coração por tudo.

“Apenas você é capaz de se curar de qualquer mal, de qualquer vício, de distúrbios de quaisquer naturezas que lhe aflija. Sua mente é a sua cura e também a sua doença, ou seja, você é involuntariamente o reflexo do estado de sua mente. Nela está seu domínio, sua força, seu poder e sua ira, queira você ou não, sendo assim, você também é simétrico por natureza e não percebe, somente quando enfrenta a falta de simetria de um de seus membros ou órgãos como um braço, uma perna, um olho, ou parte dele(s), é que perceberá a real necessidade de ser e estar simétrico funcional, ou seja, a simetria corporal apesar de nem sempre possível, porém desejável é condição necessária para que o corpo possa permanecer em perfeita sintonia com a mente, pulsando em uma frequência única e não em duas frequências distintas e conflitantes e que ainda podem ser agravadas consideravelmente como nos casos da orfandade de pais vivos verificada nos estados de paraplegia, onde ter ou não ter o(s) órgão(s) não fará a menor diferença funcional”.

Luiz Roberto Rocha de Lucena

Resumo

Este trabalho foi desenvolvido experimentalmente com o intuito de analisar o comportamento das emissões, da potência e do consumo do motor diesel, operando em “modo dual” com diesel/biodiesel e gás a uma taxa de substituição do diesel por gás natural da ordem de aproximadamente 85 %. Foram ensaiadas misturas de B20 a B80 com intervalos de 20%, além dos dois limites, inferior e superior (B5 e B100), do diesel comercial e do biodiesel puro respectivamente, onde foram realizados para cada condição de mistura, ensaios com rotação constante de 1800 RPM controlada eletronicamente e potências elétrica de 40, 60, 80, 100 e 120 kW, respectivamente. Todo o sistema foi monitorado por sensores de temperatura, pressão, vazão, velocidade e as emissões de NO_x, NO, CO₂, CO, O₂, Excesso de Ar etc. foram registradas em um analisador de gases de combustão. Os dados dos ensaios foram adquiridos por meio de um sistema de aquisição de dados instalado em um PC e armazenados em mídia própria, para posterior tratamento e análise através de Tabelas e gráficos e comparação com o ensaio B5, denominado neste trabalho de padrão diesel, bem como confrontado com outros trabalhos. Ao término deste estudo podemos concluir a viabilidade do uso do gás natural em motores diesel operando no modo dual com vantagens econômicas e ambientais.

Palavras chaves:

Motor diesel, grupo gerador, gás natural, biodiesel, eficiência, ciclo dual, energia, combustão.

Abstract

This work was developed experimentally in order to examine the performance of emissions, power and consumption of the diesel engine, operating in "dual mode" with diesel and natural gas at a fixed rate of replacement of diesel by natural gas of approximately 85%. Mixtures from B20 to B80 were tested with intervals of 20%, plus the two limits, upper and lower (B5 and B100) of commercial diesel and biodiesel respectively, which were performed for each mixture condition with constant test speed of 1,800 RPM, electronically controlled, and electric powers at 40, 60, 80, 100, and 120 kW respectively. The entire system was monitored by temperature and pressure sensors and test data were acquired by means of a data system installed on a PC and stored in adequate media, for further processing and analysis in tables and graphs and comparison with B5 test, which is called standard diesel and confronted with other studies. At the end of this research we can perceive the viability of the use of natural gas in diesel engines in dual mode with a range of economic and environmental advantages.

Keywords:

Diesel engine, generator group, biodiesel, natural gas, efficiency, energy, combustion, dual cycle.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Parâmetros característicos de um motor alternativo.	38
Figura 2.2 – Esquema do funcionamento do ciclo Otto para motores de quatro tempos.	30
Figura 2.3 – Diagrama real de pressão-volume do motor de combustão interna para o ciclo Otto.	39
Figura 2.4 – Esquemático de funcionamento do ciclo diesel para motores de quatro tempos alternativos – ICO.	40
Figura 2.5 – Diagrama real de pressão-volume para um mo2.3.2.3 Ciclo Dual	42
Figura 2.6 – Diagrama de pressão-volume do motor diesel operando em ciclo dual.....	43
Figura 2.7 – Redução das emissões ao longo das Fases do PROCONVE para veículos pesados.	56
Figura 3.1 – Vista lateral externa do LTG.	61
Figura 3.2 – Vista lateral externa do prédio de expansão do LTG.	62
Figura 3.3 – Vista geral do interior da sala de controle dos ensaios de geração do LTG.	62
Figura 3.4 – Sistema a ser ensaiado.	63
Figura 3.5 – Vista lateral do motor com foco nos sensores de temperatura do coletor de escapamento, da água de entrada e da água de saída do motor.	64
Figura 3.6 – Vista lateral do motor, com foco nos termopares e nos transdutores de pressão instalados nessa região bem como os sensores instalados de fábrica.	65
Figura 3.7 – Sensores para monitorar pressão e a temperatura do ar de entrada do motor.	66
Figura 3.8 – Medidor de vazão de gás.	66
Figura 3.9 – Posicionamento da sonda do analisador de gases de combustão.	67
Figura 3.10 – Analisador de gases de combustão.	67
Figura 3.11 – Medidor de vazão do ar de entrada do motor.	68
Figura 3.12 – Sistema de paralelismo digital.	69
Figura 3.13 – Kit gás instalado no motor.	70
Figura 3.14 – Conjunto Redutor de Pressão, Entrada max. 220bar/Saída max. 4 bar.....	71
Figura 3.15 – Reboque de transporte e acondicionamento dos dez cilindros de gás.	72

Figura 3.16 – Painel eletrônico da balança de precisão.....	73
Figura 4.1 – Consumo mássico do diesel em função da potência.	77
Figura 4.2 – Consumo mássico das misturas em função da potência.78	
Figura 4.3 – Consumo mássico do gás natural em função da potência do motor.....	78
Figura 4.4 – Consumo mássico dos combustíveis no modo dual em função da potência.	79
Figura 4.5 – Consumo mássico do ar no modo diesel em função da potência.	79
Figura 4.6 – Consumo mássico do ar no modo dual em função da potência.....	80
Figura 4.7 – Variação da taxa de substituição das misturas por gás natural em função da potência.	80
Figura 4.8 – Variação da rotação do motor operando com o diesel e no modo dual, em função potência.	81
Figura 4.9 – Temperatura da água na entrada do motor para o modo diesel e modo dual em função da potência.	82
Figura 4.10 – Temperatura da água na saída do motor no modo diesel e no modo dual em função da potência.	83
Figura 4.11 – Temperatura do óleo lubrificante no cárter do motor no modo diesel e no modo dual, em função da potência.	83
Figura 4.12 – Temperaturas do diesel e das misturas, em função da potência.....	84
Figura 4.13 – Temperatura do ar de admissão na entrada do filtro de ar em função da potência.	85
Figura 4.14 – Temperatura do ar ou mistura gasosa no coletor de admissão em função da potência.	86
Figura 4.15 – Temperatura dos gases de escape do motor na sonda de captação em função da potência.	86
Figura 4.16 – Temperatura média dos cilindros no coletor de escape em função da potência.	87
Figura 4.17 – Temperatura do gás natural antes do medidor de vazão de gás em função da potência.	88
Figura 4.18 – Temperatura ambiente da sala de ensaios em função da potência.	88
Figura 4.19 – Pressão no filtro de admissão de ar em função da potência.....	89
Figura 4.20 – Pressão no coletor de admissão em função da carga.	90
Figura 4.21 – Pressão do óleo lubrificante em função da potência.	91

Figura 4.22 – Eficiência de combustão no modo diesel e no modo dual em função da potência.	92
Figura 4.23 – Custos com combustíveis na geração de energia elétrica no modo diesel e no modo dual em função da potência, utilizando o gás natural pós comprimido comercializado para automóveis.	93
Figura 4.24 – Análise dos custos com combustíveis na geração de energia elétrica, no modo diesel e no modo dual em função da potência, utilizando o gás natural direto do gasoduto.....	94
Figura 4.25 – Emissão de NO _x em função da potência.	96
Figura 4.26 – Emissão de NO em função da potência.....	97
Figura 4.27 – Emissão de CO em função da potência.....	98
Figura 4.28 – Emissão de CO ₂ em função da potência.	99
Figura 4.29 – Emissão de O ₂ em função da potência.	100
Figura 4.30 – Excesso de ar em função da potência.....	101

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Posição da matriz energética do Brasil e do mundo em 2010 e projeção para 2030.	21
Tabela 2.1 – Posição da matriz de transportes, mundial em 2010 e projeção para 2030.	25
Tabela 2.2 – Composição típica do gás natural associado, não associado e processado no Brasil	26
Tabela 2.3 – Especificação do gás natural comercializado no Brasil.....	27
Tabela 2.4 – Características do gás natural brasileiro por regiões	28
Tabela 2.5 – Constante físicas dos hidrocarbonetos.....	29
Tabela 2.6 – Especificações do óleo diesel comercializado no Brasil.	33
Tabela 2.7 – Previsão evolutiva da implantação do PNPB	34
Tabela 2.8 – Especificações para Biodiesel ASTM D6751.....	35
Tabela 2.9 – Comparação dos resultados de emissões de poluentes entre combustíveis analisados em motor de combustão interna.	51
Tabela 2.10 – Limites das emissões ao longo das fases do PROCONVE para veículos pesados	55
Tabela 3.1 – Composição do gás distribuído pela PBGÁS (Valores Médios).	59
Tabela 3.2 – Propriedades do gás natural da PBGÁS (Valores Médios).	59
Tabela 3.3 – Resultado das análises do combustível diesel padrão (B5).	59
Tabela 3.4 – Resultado das análises do combustível biodiesel puro (B100) de algodão.	60

Lista de Abreviatura e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - Brasil
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials (internacional)
ARLA32	Agente redutor líquido de NOx
B2	Mistura 2% biodiesel e 98% diesel (diesel comercial)
B3	Mistura 3% biodiesel e 97% diesel (diesel comercial)
B4	Mistura 4% biodiesel e 98% diesel (diesel comercial)
B5	Mistura 5% biodiesel e 95% diesel (diesel comercial)
B6	Mistura 6% biodiesel e 94% diesel (diesel comercial)
B7	Mistura 7% biodiesel e 93% diesel (diesel comercial)
B20	Mistura 20% biodiesel e 80% diesel
B40	Mistura 40% biodiesel e 60% diesel
B60	Mistura 60% biodiesel e 40% diesel
B80	Mistura 80% biodiesel e 20% diesel
B100	100% biodiesel (biodiesel puro)
BEN	Balanco Energético Nacional
CH ₂ H ₅ OH	Etanol
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico
CO ₂ e	Dióxido de Carbono Equivalente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPD	Consumo Padrão Diesel
C _x H _y	Hidrocarboneto genérico (metano)
D10	Diesel com teor de enxofre 10 ppm
D50	Diesel com teor de enxofre 50 ppm
D500	Diesel com teor de enxofre 500 ppm
D1800	Diesel com teor de enxofre 1800 ppm
DNC	Departamento Nacional de Combustíveis
DPF	Filtro de Particulado de Ação Regenerativa

ECU	Unidade de Controle Eletrônico
EGR	Recirculação dos Gases de Exaustão
EPA	Agencia de Proteção ao Meio Ambiente – Estados Unidos
GASENE	Gasoduto Sudeste-Nordeste
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
GNV	Gás Natural Veicular
H ₂	Hidrogênio
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfídrico
HC	Hidrocarbonetos
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Cetano
ICE	Ignição por Centelha
ICO	Ignição por Compressão
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade industrial
LTG	Laboratório de Termo Geração
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério das Minas e Energia
MP	Material Particulado
NC	Número de Cetano
N	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
NERG	Núcleo de Energia
NO	Monóxido de Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
PBGÁS	Companhia Paraibana de Gás,
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior

PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PNPB	Programa Nacional de Produção e uso de Biodiesel
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
SCR	Sistema Catalítico de Redução
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SPD	Sistema de Paralelismo Digital
UAEE	Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

Lista de Símbolos

°C	Graus Célcius;
A	Amperes;
Atm	Atmosfera;
bar	Pressão;
gkWh	Gramas quilowatts hora;
HP	Potência
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma;
kg/h	Quilograma por hora;
kgf	Quilograma força;
kW	Quilowatts;
kWh	Quilowatts hora;
m/s	Velocidade;
m/s ²	Aceleração da gravidade;
m ²	Área;
m ³	Volume;
min	Minuto;
Pa	Pressão;
Psi	Pressão;
RPM	Rotação por minuto;
tCO _{2e}	Toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente
Tep	Tonelada de Equivalente de Petróleo
V	Volume;
Vb(%)	Volume de biodiesel desejado na nova mistura;
Vb°	Volume de biodiesel da atual mistura;
Vcc	Volt corrente contínua;
Vd°	Volume de diesel da atual mistura;
Vol	Volume;
W	Watts
ΔVb	Volume de biodiesel a ser adicionado ao diesel B5 para se obter a nova mistura

Sumário

CAPÍTULO 1	20
INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Objetivos.....	22
1.1.1 Objetivos específicos.....	22
1.2 Justificativa.....	22
CAPÍTULO 2	23
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 A combustão.....	23
2.2 Os combustíveis.....	24
2.2.1 Características gerais	24
2.2.2 O gás natural	26
2.2.2.1 Composição do gás natural	26
2.2.2.2 Características do gás natural comercializado no Brasil.....	28
2.2.2.3 Características da combustão do gás natural em motores.....	29
2.2.2.4 A importância do gás natural na matriz energética atual do Brasil	30
2.2.3 Óleo Diesel.....	31
2.2.3.1 A composição do óleo diesel	31
2.2.3.2 Características do Diesel.....	32
2.2.4 Biodiesel.....	34
2.2.4.1 Cronologia de adição do biodiesel B100 ao diesel comercial brasileiro	34
2.2.4.2 Especificações do Biodiesel.....	35
2.3 Motores de combustão interna.....	36
2.3.1 Classificações dos Motores de combustão.....	36
2.3.1.1 Quanto ao tempo	36
2.3.1.2 Quanto ao ciclo.....	37
2.3.1.3 Quanto ao tipo de alimentação de ar	37
2.3.1.4 Quanto ao movimento	37
2.3.2 Ciclo dos motores.....	38
2.3.2.1 Ciclo Otto nos motores de quatro tempos.....	38
2.3.2.2 Ciclo Diesel nos motores de quatro tempos	40
2.4 PROCONVE - Programa de controle das emissões dos veículos automotores	54
2.4.1 As fases do PRONCOVE.....	54

CAPÍTULO 3	58
MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
3.1 Combustíveis utilizados nos ensaios	58
3.2 Apresentação e forma de desenvolvimento da pesquisa	61
3.3 A Infraestrutura Física do LTG	61
3.4 Sistema, equipamentos e instrumentação	63
3.4.1 Descrição do sistema a ser ensaiado.....	63
3.4.2 Instrumentação e sensores de monitoramento.....	63
3.4.3 Sistema de aquisição e armazenamento de dados	68
3.4.4 Monitoramento e controle a distância do sistema de paralelismo digital.....	69
3.5 Procedimentos e metodologias utilizadas nos experimentos.....	73
3.5.1 Realização dos ensaios	73
3.5.2 Aquisição e armazenamento dos dados do motor	74
3.5.3 Realização de ensaios com outra mistura.....	74
3.5.4 Preparações das misturas.....	75
3.5.5 – Metodologia para definição do custo total dos combustíveis utilizado no modo de operação dual em função da carga.....	75
CAPÍTULO 4	77
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
4.1 – Análises de consumo mássico dos combustíveis em função da potência	77
4.3 – Variação da rotação do motor RPM, em função da potência.....	81
4.4 – Análises das temperaturas em função da potência	82
4.5 – Análises das pressões em função da potência	89
4.6 – Análise da eficiência de combustão em função da potência	91
4.7 – Análise da viabilidade econômica em função dos custos com os combustíveis para gerar energia elétrica no modo diesel e no modo dual em função da potência.....	93
4.8 – Análises das emissões em função da potência.....	95
CAPÍTULO 5	103
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
5.1 Considerações finais	103
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
REFERÊNCIAS CONSULTADAS	109

ANEXOS	113
Anexo 1 - Ficha Técnica do Motor segundo os dados de seu fabricante	114
Anexo 2 – Dados experimentais do motor nos ensaios com as misturas; B20 à B100 em modo dual com 85% de gás natural e em modo diesel, CPD ou	115
Anexo 3 – Memorial de cálculos utilizado na conversão de volume em massa, para os dados experimentais	116
Anexo 4 – Análise de gás e dados de temperatura medida com a pistola nas misturas de B20 a B100 em modo dual e diesel, CPD ou B5	117
Anexo 5 – Dados das emissões convertidos de ppm para g/kW.h	118

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o aumento crescente da demanda mundial por energia e sabendo-se que as principais fontes de energia são fósseis e que estas caminham rapidamente para a escassez, surgiu a necessidade urgente da utilização de novas fontes de energias preferencialmente limpas, de forma a suprir urgentemente tal demanda.

Atualmente, o Brasil é o País que possui a matriz energética com maior participação de fontes renováveis do mundo industrializado apresentando 45% de sua composição proveniente destas fontes, ou seja, recursos hídricos, biomassa e etanol, além das energias eólica e solar (luminosa e calorífica) que está começando a se instalar e em franca ascensão. Se comparado com a matriz energética de outros países industrializados, estas são compostas por apenas 13% de fontes renováveis e nos casos de países em desenvolvimento, este valor cai para 8%, publicado no Portal Brasil (2014), disponível em <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2011/11/matriz-es-brasileiras>

Os dados divulgados no Painel 2012 da Fundação Getúlio Vargas e Petrobras - FGV, demonstram a situação da matriz energética do Brasil e do mundo em 2010, bem como uma projeção para o ano de 2030. A presidente da Petrobrás, Maria das Graças Silva Foster, comparou a matriz energética brasileira com a mundial, a partir de números e projeções da Agência Internacional de Energia, ver Tabela 1.1, onde os dados do Brasil referentes a 2010 são consolidados, e concluiu que até 2030, a redução de consumo dos combustíveis fósseis não será significativa na participação das matrizes energéticas brasileira e mundial.

Tabela 1.1 - Posição da matriz energética do Brasil e do mundo em 2010 e projeção para 2030.

Dados do ano de 2010			Projeção para o ano de 2030	
Matriz energética			Matriz energética	
Composição	Brasil (%)	Mundo (%)	Brasil (%)	Mundo (%)
Renováveis	45,00	13,00	46,00	17,00
Fósseis	53,40	81,00	52,00	76,50
Nuclear	1,60	6,00	2,00	6,50

Fontes: Painel 2012 5ª edição da FGV - Fundação Getúlio Vargas e Petrobras. Disponibilizado em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2011/11/matrizes-brasileiras>

Uma das grandes vantagens de se ter uma matriz energética limpa, diz respeito exatamente à redução das emissões de CO₂ e de particulados no meio ambiente. No Brasil, as emissões de CO₂, chegam a 1,4 toneladas de dióxido de carbono (tCO₂), enquanto no mundo esse valor atinge 2,4 (t CO₂)/tep. Em alguns países onde o uso dos derivados de petróleo é mais intenso em óleo, gás e carvão mineral, esse valor chega a ser da ordem de 3,0 (tCO₂/tep). A tep é uma unidade comum utilizada para somar todas as formas de energia – cada fonte de energia tem um fator que converte quantidades de energia da unidade convencional para tep, Portal Brasil (20140, disponível em:

<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2011/11/matrizes-brasileiras>

A estrutura da Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil - OIEE, contempla em sua planta uma predominância de energia limpa e renovável, tendo sido estas, responsáveis pela geração de 76,90% em 2012, contra 70,70% em 2013, incluindo neste total a energia importada de Itaipu. Considerando-se apenas a oferta interna de energia elétrica nacional, a participação foi de 70,00% em 2012 e de 64,1% em 2013, publicado pelo Ministério das Minas e Energia – MME, na Resenha Energética Brasileira (2013).

Com a atual crise hídrica, o Brasil precisou recorrer as centrais termoelétricas para complementar a demanda de energia elétrica do país. Como até então o combustível utilizado pelas centrais termo elétricas era o óleo diesel derivado do petróleo e com grande poder de poluição ambiental, passou a se admitir a ideia de substituir parcialmente o diesel pelo gás natural nas centrais termoelétricas o que reduziria significativamente os níveis de poluição ambiental. Essa solução contribuiria para minimizar de imediato alguns problemas críticos como: redução do uso de diesel derivado do petróleo, redução da quantidade de poluentes lançados na atmosfera pelas centrais termoelétricas, aumento da produção de energia elétrica a custos menores, dentre vários outros benefícios.

Com a implementação do uso parcial do gás natural no acionamento de centrais elétricas, manteríamos o status de País possuidor da matriz energética mais limpa do mundo, além de resolver, em parte, o problema da crise energética.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente o comportamento de um motor diesel de 206 kW operando em modo dual com diesel/biodiesel e gás natural acionando um grupo gerador de 150 kW.

1.1.1 Objetivos específicos

- Analisar experimentalmente o comportamento dos parâmetros do motor e o consumo em função da potência, operando em modo dual com 85% de taxa de substituição do diesel por mistura de diesel/biodiesel e gás natural.
- Verificar a existência de viabilidade econômica deste sistema operando em modo dual.
- Analisar e quantificar os principais gases emitidos com relação a melhoria das condições ambientais.

1.2 Justificativa

A crescente demanda por insumos e em especial por energia elétrica é um fenômeno reconhecido a nível mundial. Sendo assim, no Brasil não poderia ser diferente, até por se tratar de um país de extensão territorial gigante, emergente e em ritmo de crescimento moderado. Com a escassez dos recursos naturais e, principalmente das reservas de petróleo por que passa o planeta, associado aos altíssimos níveis de poluição e com o crescente aumento da população mundial, aumenta a cada dia a demanda por mais e mais recursos, para satisfazer as necessidades básicas da população e da indústria. Como alternativa para suprir as necessidades de energia e proteger o meio ambiente, novas combinações de combustíveis estão sendo utilizadas em grupos geradores para produção de energia elétrica, como é o caso do biodiesel e gás natural, objeto de estudo deste trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A combustão

A combustão é um processo destinado a obtenção de energia a partir da queima de um combustível com o ar atmosférico, o qual possui em sua composição cerca de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. A combustão é uma reação química do tipo exotérmica, ou seja, com desprendimento de calor.

Durante a reação de combustão diversos produtos surgem como resultantes da combinação dos átomos dos reagentes envolvidos no processo e são formados centenas de compostos, do tipo CO_2 , CO , H_2O , H_2 , CH_4 , NO_x , SO_x , fumaça negra e fuligem, que contribuem para poluição do meio ambiente.

Admitindo-se uma reação estequiométrica ideal de um hidrocarboneto com o ar, são formados apenas CO_2 e H_2O , visto que o N_2 é um gás inerte e, portanto, não participa da reação da combustão.

Cerca de 81 % da energia do mundo utilizada nos meios de transportes (carros, aviões, trens, navios, etc.), nas centrais termelétricas, nos processos industriais, nos sistemas de aquecimento doméstico, nos geradores estacionários, nos cozimentos de alimentos, no acionamento das caldeiras a vapor dentre outros, são obtidas por processos de combustão interna ou externa, segundo a Fundação Getúlio Vargas e Petrobras – FGV, Painel 2012.

2.2 Os combustíveis

2.2.1 Características gerais

Por definição, combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, são materiais ou substâncias capazes de liberar energia sempre que houver uma mudança em suas estruturas químicas. Além disso, possuem energia acumulada e podem queimar com certa facilidade. São usados, principalmente, para gerar energia mecânica e movimentar automóveis, aviões, navios, trens, máquinas industriais, centrais termoelétricas etc.

Quando se fala em combustível logo nos vem à mente os tipos mais conhecidos como fósseis, renováveis, não renováveis, alternativos, nucleares, enfim, cada um deles com suas peculiaridades, vantagens e também suas desvantagens, conforme ver-se-á a seguir.

Os combustíveis fósseis são substâncias de origem mineral, formados pelos compostos de carbono, originados pela decomposição de resíduos orgânicos ao longo de milhões de anos. São considerados do tipo “recursos naturais não renováveis”. Normalmente são encontrados em áreas profundas do solo ou no fundo do mar e mais recentemente em águas profundas nos oceanos em uma zona denominada de Pré-sal, com promessa de grandes reservas ainda não e/ou pouquíssimo exploradas.

Dentre os combustíveis fósseis mais conhecidos podem-se destacar: gasolina, diesel, querosene, outros óleos combustíveis mais pesados, gás natural e carvão mineral. A queima destes combustíveis “gera altos índices de poluição atmosférica”.

Excetuando-se o gás natural que polui em menor quantidade, os demais são os grandes responsáveis pelo efeito estufa, aquecimento global e pelas chuvas ácidas. Além disso, os gases poluentes, substâncias tóxicas e partículas sólidas resultantes da queima destes combustíveis são altamente prejudiciais à saúde dos seres humanos, (Pope et al. 1995).

Os combustíveis renováveis, atualmente bastante em voga e sob o foco dos ambientalistas em geral, são obtidos a partir de biomassa (daí a denominação de renovável). Os mais conhecidos são o biodiesel e o álcool, utilizados como combustível nos automóveis brasileiros com absoluto sucesso há mais de 20 anos. O álcool é pouco poluente e tem como fonte primária para sua obtenção aqui no Brasil, a cana-de-açúcar. Já o biodiesel é processado a partir de vários tipos de oleaginosas como o milho, a mamona, o caroço de algodão, soja,

dentre outras oleaginosas, (ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2014).

Seguindo o exemplo do Brasil, alguns países já estão há algum tempo adicionando a gasolina, o etanol em pequena escala e o metanol em maior escala, em substituição ao componente tetraetila de chumbo, muito utilizado nas gasolinas até bem pouco tempo como antidetonante e que, além de corrosivo e cancerígeno, é altamente tóxico, poluente e possui efeito cumulativo nos seres humanos.

O etanol anidro adicionado na gasolina brasileira foi também utilizado como forma de controlar os preços dos combustíveis nas sazonalidades das safras e principalmente, diminuir as emissões de poluentes. Hoje em dia com o advento dos motores flex, o próprio consumidor é quem define qual combustível utilizar, exercendo desta forma a pressão sobre os preços dos combustíveis praticados pelo governo. A utilização do álcool é também uma medida importante para combater o processo de aquecimento global, e a redução da poluição causada pelas emissões dos motores movidos a derivados de petróleo.

Dados do Painel 2012 - 5ª edição, da FGV - Fundação Getúlio Vargas e Petrobras, apresentados na Tabela 2.1, apontam que, no ano de 2010, na matriz mundial de transportes, apontava a participação de 93% de derivados de petróleo na movimentação dos transportes, complementados com 4% movidos a gás natural, 2% movidos a biocombustíveis e 1% movidos a eletricidade. A previsão de redução do uso de combustíveis derivados de petróleo é bastante sombria para o ano de 2030, existindo previsão de queda de apenas 5%, ou seja, 88% dos transportes no mundo ainda continuarão a depender do petróleo e de seus derivados, apenas 5% movidos a gás natural, seguidos pelos biocombustíveis com 5,5%, e finalmente, os movidos a eletricidade com 1,6%.

Tabela 2.1 - Posição da matriz de transportes, mundial em 2010 e projeção para 2030.

Matriz de Transportes Mundial (%)		
Dados do Ano de 2010		Projeção para 2030
Derivados Petróleo	93,0	88,0
Gás Natural	4,0	5,0
Biocombustíveis	2,0	5,5
Eletricidade	1,0	1,6

Fontes: Painel 2012 5ª edição da FGV - Fundação Getúlio Vargas e Petrobras. Disponibilizado em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2011/11/matrices-brasileiras>

É possível observar que, a partir de 2010, projeta-se um aumento na taxa de substituição dos fósseis por renováveis ainda muito pequeno com relação ao que se espera ser possível. Após a constatação da necessidade do aumento urgente da oferta de energia associado a redução nas emissões, e utilizando combustível derivado de petróleo em menor quantidade, espera-se por uma maior participação dos renováveis neste processo.

2.2.2 O gás natural

O gás natural é um gás composto predominantemente de metano e pode ser encontrado na natureza em poços subterrâneos on shore e off shore. É o primeiro componente a ser liberado na abertura de poços de petróleo, podendo ainda ser encontrado de forma associada ou não associada.

2.2.2.1 Composição do gás natural

A composição do gás natural bruto, vista na Tabela 2.2, varia de acordo com a região e a bacia de onde ele é extraído sendo função de uma série de fatores naturais que determinaram o seu processo de formação e as condições de acumulação do seu reservatório de origem, (Castro, 2009). Em uma composição típica, o gás natural é formado por cerca de 88% de metano, 9% de etano, 1% de propano e 2% de frações mais pesadas de gases inertes. Possui poder calorífico Superior da ordem de 9.500 kcal/m³ e densidade média relativa ao ar de aproximadamente 0,623, (Guilherme et al, 2007).

Tabela 2.2 - Composição típica do gás natural associado, não associado e processado no Brasil

Elementos	Gás natural associado	Gás natural não associado	Gás processado
Metano	81,57	85,48	88,56
Etano	9,17	8,26	9,17
Propano	5,13	3,06	0,42
I-Butano	0,94	0,47	-
N-Butano	1,45	0,85	-
I-Pentano	0,26	0,20	-
N-Pentano	0,30	0,24	-
Hexano	0,15	0,21	-
Heptano e superiores	0,12	0,06	-
Nitrogênio	0,52	0,53	1,20
Dióxido de carbono	0,39	0,64	0,65
Total	100 %	100 %	100 %

Fonte: ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biodiesel (2002)

Após extraído, o gás natural é processado para atender os padrões definidos para comercialização. Somente após o processamento de adequação é que pode ser distribuído para as revendas autorizadas.

Para adquirir as características comerciais desejadas, o gás natural bruto, livre da fase líquida, é enviado a uma Unidade de Processamento de Gás Natural UPGN – onde é promovida a separação das frações leves (metano e etano que constituem o gás residual) das pesadas, que apresentam um maior valor comercial. O gás natural antes de ser processado é denominado de “gás úmido”, por conter líquido de gás natural (LGN), enquanto o gás residual é o “gás seco”, pois não possui hidrocarbonetos condensáveis, (THOMAS et al., 2001; Castro, 2009).

A ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biodiesel, através da portaria N.º 41, de 15 de abril de 1998, institui que o gás natural deverá atender às especificações apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Especificação do gás natural comercializado no Brasil

Características ⁽¹⁾	Unidades	GRUPOS			Métodos de Ensaio
		B (baixo)	M (médio)	A (alto)	
Poder Calorífico Superior (PCS)	Kcal/m ³	8.000 a 9.000	8.800 a 10.200	10.000 a 12.500	ASTM D 3588
Densidade Relativa ao Ar		0,54 a 0,60	0,55 a 0,69	0,66 a 0,82	ASTM D 3589
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) ⁽²⁾	% volume	2,0	2,0	2,0	ASTM D 1945 OU ISO 6974
Teor Máximo de Inertes ⁽³⁾	% volume	4,0	4,0	4,0	ASTM D 1945 OU ISO 6975
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 ⁽⁴⁾	°C	-45	-45	-45	ASTM 5454

Fonte: ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biodiesel, Regulamento Técnico ANP N.º 001/98

Obs.: (1) - Limites especificados são valores referidos a 20°C a 101,33 kPa (1 atm), exceto onde indicado.

(2) - Para as Regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de 3,5.

(3) - Para as Regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de 6,0.

(4) - Para as Regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de - 39.

2.2.2.2 Características do gás natural comercializado no Brasil

O gás natural comercializável no Brasil, é quase completamente metano. Em função da predominância do metano na composição do gás natural todas as análises físicas e termodinâmicas podem ser realizadas como se este fosse o único gás presente na mistura, sem comprometimento dos resultados, como tem verificado e mostrado na prática, (THOMAS et al. 2001; Castro 2009; PBGÁS 2012).

O gás natural no Brasil varia suas características de região para região conforme podemos observar na Tabela 2.4 a seguir.

Tabela 2.4 – Características do gás natural brasileiro por regiões

Características	Unidade	Limites por região			Métodos de Ensaio
		Norte	Nordeste	Sul, Sudeste e Centro Oeste	
Poder calorífico superior	kJ/ m ³	34000 a	35000 a	35000 a	D 3588
		38400	42500	42500	
Índice de Wobbe	kJ/m ³	40500 a	40500 a	40500 a	ASTM
		45000	52500	52500	D 3588
Metano, mínimo	% vol.	68,0	86,0	86,0	D 1945
Etano, máx.	% vol.	12,0	10,0	10,0	
Propano, máx.	% vol	3,0	3,0	3,0	
Butano e mais pesados, máx.	% vol	1,5	1,5	15	
Oxigênio, máx.	% vol	0,8	0,5	0,5	
Inertes (N ₂ + CO ₂), máx.	% vol.	18,0	5,0	4,0	
Nitrogênio	% vol.	Anotar	2,0	2,0	
Enxofre Total, máx.	mg/m ³	70	70	70	D 5504
Gás Sulfídrico (HS), máx.	mg/m ³	10,0	15,0	10,0	D 5504
Ponto de orvalho da água a 1atm, máx.	°C	-39	-39	-39	D 5454

Fonte: ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biodiesel (2002)

Para facilitar a identificação das características do gás natural, a Tabela 2.5 – Constantes físicas dos hidrocarbonetos apresenta os principais valores de interesse.

Tabela 2.5 – Constante físicas dos hidrocarbonetos

Composto	Fórmula	Ponto de Vaporização (°C) à 1 atm	Ponto de Solidificação (°C) à 1 atm	Temperatura Crítica (°C)	Densidade do Gás à 16 °C e 1 atm		Calor Específico à 16 °C e 1 atm [kJ/kg°C]		Poder Calorífico [MJ/Nm³]		Ar Requerido para Combustão [m³ ar/m³ combustível]	Limites de Inflamabilidade em Mistura com o Ar [% Vol.]	
					Densidade Relativa (Ar=1)	[kg/m³]	C _p	C _v	Superior	Inferior		Inferior	Superior
Metano	CH ₄	-162	-183	-82,2	0,555*	0,679	2,20	1,67	40	36	9,53	5,00	15,00
Etano	C ₂ H ₆	-89	-184	32,3	1,046*	1,286	1,71	1,45	71	64	16,7	3,22	12,45
Propano	C ₃ H ₈	-43	-188	96,8	1,547*	1,916	1,62	1,44	102	93	23,8	2,37	9,50
n-Butano	C ₄ H ₁₀	-11	-139	152,2	2,071*	2,534	1,66	1,51	135	124	31	1,86	8,41
Isobutano	C ₄ H ₁₀	-12	-160	135,0	2,067*	2,534	(1,62)	1,46	134	123	31	1,80	8,44
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	35	-130	196,9	2,491	3,050	1,66	1,55	170	157	38,1	1,40	7,80
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	68	-96	235,0	2,975	3,643	1,67	1,57	211	195	45,3	1,25	6,90
n-Octano	C ₈ H ₁₈	125	-57	296,1	3,943	-	1,67	1,60	233	216	59,6	0,84	3,20
n-Decano	C ₁₀ H ₂₂	173	-30	-	4,912	-	-	(1,62)	289	268	73,9	0,67	2,60

Fonte: Adaptada de Gas Engineers Handbook.Obs.: Os números em parêntesis são estimados.

* Volumes reais de gás corrigidos para desvio.

2.2.2.3 Características da combustão do gás natural em motores

Em função de sua maior relação Hidrogênio/Carbono, o gás natural apresenta uma queima mais limpa, com menor formação de depósitos e conseqüentemente um menor desgaste do motor, o que resulta em menor número de manutenções e uma vida útil bem maior, se comparado ao uso com outros combustíveis. No seu estado gasoso e em condições normais, “injetado ou aspirado”, o gás natural é de carburação bastante simples, uma vez que a distribuição para os cilindros se dá de uma maneira homogênea, além de permitir uma fácil partida a frio, diferentemente de outros tipos de combustíveis. Possui ainda uma característica importante no que diz respeito a combustão, é antidetonante, o que permite operar a taxas de compressão bastante elevadas como é o caso dos motores a diesel.

De acordo com (Guilherme et al. 2007), comparando-se com relação aos **aspectos de segurança**, as principais características do gás natural com outros gases combustíveis como butano e propano são:

O gás natural apresenta limite de inflamabilidade da mistura ar + gás da ordem de 6,5 a 17% de gás natural veicular no ar, enquanto que para o propano esse índice é de cerca de 2,1 a 9,5% e para o do butano chega a 1,9 a 8,5%. Sendo assim, pode-se afirmar que será necessária uma concentração bem maior de gás no ar para que possa ocorrer uma explosão, o que não acontece para os outros gases, propano e butano, que permitem explosão em concentração bastante inferiores, o que torna o funcionamento de motores e outras aplicações com gás natural muito mais seguros do que com o propano e/ou butano, Grifo nosso.

Com relação à temperatura de autoignição é da ordem de 650, enquanto que o propano vai a 466 °C e o butano apenas a 405 °C.

Quanto à densidade, o gás natural apresenta excelentes vantagens pela baixa densidade, cerca de 0,60 a 0,81 a 20 °C, sendo, portanto, bem mais leve do que o ar atmosférico, o que, em caso de vazamento, permite sua rápida dispersão no ambiente. O propano apresenta uma densidade da ordem de 1,60 e o butano de 2,05, sendo este mais pesados que o ar, em caso de vazamentos, estes dois tipos de gases se acumulam nos ambientes em ralos e interior de objetos como móveis e utensílios, o que pode resultar em explosão e até mesmo incêndios.

Com base nessas características, projetos de instalações prediais e comerciais hoje em dia estão preferindo utilizar o gás natural encanado a partir de pequenas centrais em substituição ao propano e/ou butano por serem estes bem menos seguros no que diz respeito a explosões causadas por vazamentos.

2.2.2.4 A importância do gás natural na matriz energética atual do Brasil

A partir da decretação oficial da crise do petróleo por volta de 1970, aos poucos o gás natural foi ganhando espaço em substituição a outras fontes de energia como lenha, óleo BPF (combustível derivado de petróleo, de baixo ponto de fulgor, também chamado óleo combustível pesado), gás liquefeito do petróleo (GLP), álcool, gasolina e diesel, dentre outros, tanto na matriz energética brasileira como mundial.

A substituição dos combustíveis líquidos derivados do petróleo por gás natural continua em ritmo acelerado pela indústria, a ponto de já não se dispor de infraestrutura em todos os estados da federação para atender a demanda instalada, bem como da disponibilidade do próprio gás em determinadas regiões do país.

Ainda existe um certo desequilíbrio de oferta e procura do gás natural que termina por gerar problemas operacionais.

Enfim, em uma grande gama de aplicações, o gás natural já está sendo utilizado e com isso reduzindo consideravelmente as emissões de gases poluentes, fumaças negras e particulados pesados, contribuindo significativamente com a preservação do meio ambiente, da camada de ozônio e evitando o aquecimento global, mesmo que de uma forma indireta.

2.2.3 Óleo Diesel

O óleo diesel é derivado de uma das frações do refinamento do petróleo, portanto, é um combustível fóssil, desta forma, é uma fonte não renovável, limitada e finita, constituído basicamente por hidrocarbonetos, hidrogênio, e em baixas concentrações, por enxofre, nitrogênio e oxigênio. Assim como todo combustível, trata-se de um produto inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico.

O óleo diesel é utilizado em motores diesel empregados nas mais diversas aplicações, tais como: tratores e máquinas pesadas, caminhões, ônibus, automóveis e etc. O uso do óleo diesel como combustível nos motores libera uma alta carga de poluentes para o meio ambiente com grandes quantidades dos gases (monóxido de carbono e gás carbônico), óxido nítrico e dióxido de enxofre (SO₂) que reagem com a água formando a chuva ácida.

2.2.3.1 A composição do óleo diesel

Este combustível é basicamente constituído por hidrocarbonetos com cadeia variando de 15 a 18 átomos de carbono.

No Brasil, desde de janeiro de 2014, em razão da diminuição do teor máximo de enxofre, somente o óleo diesel dos tipos S10 e S500 podem ser comercializados, sendo proibida a venda do diesel do tipo S50 e S1800 para uso automotivo, conforme resolução N° 50 de 23.12.2013 da ANP.

2.2.3.2 Características do Diesel

Algumas das principais características do diesel que influenciam diretamente o funcionamento dos motores diesel, segundo a ANP e Petrobrás:

Número de Cetano – (NC): através desta característica pode-se medir a qualidade da ignição do diesel, que também pode ser calculada pelo Índice de Cetano – (IC), disponível em:

<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/portal+de+conteudo/produtos/automotivos/oleo+diesel/caracteristica+do+oleo>,

A qualidade de ignição do diesel pode ser medida pelo seu número de cetano (NC) ou calculado pelo índice de cetano (IC). O número de cetano é obtido através de um ensaio padronizado do combustível em um motor monocilíndrico, onde compara-se o seu atraso de ignição em relação a um combustível padrão com número de cetano conhecido. O índice de cetano é calculado através das correlações baseadas em propriedades físicas do combustível, rotineiramente determinadas. Esse índice é função do ponto de destilação médio (T 50%) e da densidade, apresentando boa correlação com o número de cetano (PORTAL PETROBRAS - ANP, 2014).

Densidade: indica a quantidade de massa por unidade de volume do combustível que é injetado no motor. É uma característica muito importante uma vez que a bomba injetora alimenta o motor com volumes constantes em cada regime de operação. Se a densidade variar, automaticamente varia-se a massa de combustível injetada. O aumento da massa de combustível injetado, provoca aumento das emissões de particulados, monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos e outros componentes.

Viscosidade: é o tempo de escoamento do combustível em capilar padronizado

Resíduos de carbono: tendência de formação de depósitos de carvão no interior dos cilindros e, conseqüentemente, desgaste prematuro dos mesmos.

Ponto de fulgor: é ponto de menor temperatura cuja vaporização seja suficiente para se formar uma mistura explosiva com o ar.

Água e sedimentos: a contaminação do diesel por água e outras impurezas, causa entupimento de filtro, desgaste de bombas e bicos, favorece o aparecimento de borras no tanque, corrosão e pode afetar a combustão. Portal Petrobrás disponível em:

<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/portal+de+conteudo/produtos/automotivos/oleo+diesel/caracteristica+do+oleo>.

De acordo com normas da ANP, as especificações para o diesel produzido no Brasil encontram-se na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Especificações do óleo diesel comercializado no Brasil.

Características	Uso automotivo a partir de 2012			
	Obrigatório		Não Permitido	
	S10	S50	S500	S1800
Água e sedimentação, % vol. máx.	0,05	0,05	0,05	0,05
Cinzas, % massa, máx.	0,10	0,10	0,10	0,10
Cor ASTM, máx.	3	3,0	3,0	3,0
Corrosividade ao cobre (3h a 50 °C)máx.	1	1	1	1
Destilação, 50% recuperados, °C mín./máx.	245	245	245/310	245/310
85% evaporados, °C máx.	295	310	360	370
Enxofre, % massa máx.	10	50	500	1800
Índice de cetanos calculado, min.	48	46	42	42
Teor de biodiesel, % volume	7	7	7	7
Massa específica a 20°C, kg/m ³	820 a 850	820 a 850	820 a 865	820 a 880
Resíduo de carbono Ramsbottom, Determinado nos 10% finais da destilação, % massa máx.	0,25	0,25	0,25	0,25
Viscosidade a 40 °C, mm ² /s	2,5 a 4,5	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0

Fonte: Adaptado da ANP - Agência Nacional do Petróleo (2014), resolução ANP nº 65, de 9.12.2011.

2.2.4 Biodiesel

O biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis como óleos vegetais e gorduras animais. Estimulados por um catalisador, eles reagem quimicamente. Existem diferentes espécies de oleaginosas no Brasil que podem ser usadas para produzir o biodiesel. Entre elas estão a mamona, dendê, canola, girassol, amendoim, soja e algodão. Matérias-primas de origem animal, como o sebo bovino e gordura suína, também podem ser utilizadas na fabricação do biodiesel (PNPB – Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel, http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/biodiesel/o_biodiesel.html).

Esse biocombustível substitui total ou parcialmente o diesel de petróleo, em motores de caminhões, tratores, camionetas, automóveis e também motores de máquinas que geram energia, conforme definido no PNPB, criado em dezembro de 2004, pelo Governo Federal, disponibilizado em:

http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/biodiesel/o_biodiesel.html

2.2.4.1 Cronologia de adição do biodiesel B100 ao diesel comercial brasileiro

O governo fez uma previsão inicial da implementação PNPB conforme Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Previsão evolutiva da implantação do PNPB

ANP – Evolução da Mistura Diesel/Biodiesel					
					
2005 a 2007	2008	2009	2010	2013	2014 em diante
					
2%	2%	2%	5%	5%	7%
Autorizativo	Obrigatório	Obrigatório	Obrigatório	Obrigatório	Obrigatório
2005	Evolução	Evolução	Evolução	Evolução	Evolução
	2% Jan/Jun	3% Jan/Jun	5% Jan 2010	Meta original	Nova meta
	3% Jul/Dez	4% Jul	Antecipação		

Fonte: Adaptado da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (2015)

2.2.4.2 Especificações do Biodiesel

As especificações para o Biodiesel brasileiro, são apresentadas na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Especificações para Biodiesel ASTM D6751

Propriedade	Método ASTM	Limites	Unidades
Cálcio e magnésio, Combinado	EN 14538	5 máximo	ppm (ug/g)
Ponto de Fulgor (vaso fechado)	D 93	93 mínimo	Graus °C
Conteúdo de metanol	EN14110	0,2 máximo	% volume
Ponto de fulgor	D 93	130 mínimo	Graus °C
Água e sedimentos	D 2709	0,05 máximo	% volume
Viscosidade cinemática, 40 °C	D 445	1,9 – 6,0	mm ² /segundo
Cinzas sulfatadas	D 874	0,02 máximo	% massa
Enxofre, Categoria 15	D 5453	0,0015 máx.(15)	% massa (ppm)
Enxofre, Categoria 500	D 5453	0,05 máx. (500)	% massa (ppm)
Faixa de corrosão de cobre	D 130	No. 3 máximo	-
Índice de cetano	D 613	47 mínimo	-
Ponto de névoa	D 2500	Informar	Graus C
Amostra de carbono de resíduo 100%	D 4530*	0,05 máximo	% massa
Número de ácido	D 664	0,50 máximo	mg KOH/g
Glicerina livre	D 6584	0,020 máximo	% massa
Glicerina total	D 6584	0.240 máximo	% massa
Conteúdo de fósforo	D 4951	0.001 máximo	% massa
Destilação, T90 AET	D 1160	360 máximo.	Graus C
Sódio/Potássio, combinado	EN 14538	5 máximo	ppm
Estabilidade à oxidação	EN 14112	3 minutos	Horas

* O resíduo de carbono deve ser executado em 100% da amostra. **Fonte:** ASTM (2007).

2.3 Motores de combustão interna

Inicialmente apresenta-se um flash da história de concepção e desenvolvimento dos motores de combustão interna em ordem cronológica dos acontecimentos, segundo Queiroz (2014).

Os quatro princípios pelos quais os motores de combustão interna deveriam trabalhar foram enunciados por Beau de Rochas em 1862 e seriam eles;

- a) A relação entre área superficial e volume do cilindro deveria ser a menor possível.
- b) O processo de expansão deveria ser o mais rápido possível.
- c) A expansão deveria ser a máxima possível.
- d) A pressão no início do processo de expansão deveria ser a máxima possível.

Nikolaus Otto patenteou, em 1876, o motor de ciclo Otto e, em 1878, construiu com sucesso um motor de combustão interna, utilizando os quatro princípios de Beau de Rochas. Foi, portanto, o primeiro a usar o conceito de quatro tempos enunciado por Beau de Rochas. Apenas a partir do ano de 1890, com a expiração da patente de Nikolaus Otto, foi possível a comercialização em larga escala do motor por ele concebido.

Dr. Rudolph Diesel, em 1892, patenteou o motor de ignição por compressão, atualmente conhecido como motor Diesel, em sua homenagem.

2.3.1 Classificações dos Motores de combustão

Os motores de combustão podem ser classificados inicialmente sob diversos aspectos dos quais listam-se apenas os principais deles:

2.3.1.1 Quanto ao tempo

Quanto ao tempo, os motores de combustão interna podem ser classificados em;

a) Motores de quatro tempos – são motores cujo ciclo é executado em duas voltas ou giros da árvore de manivelas do motor ou quatro cursos do êmbolo.

b) Motores de dois tempos – são motores cujo ciclo é executado em uma volta ou giro da árvore de manivelas do motor ou dois cursos do êmbolo.

2.3.1.2 Quanto ao ciclo

Quanto ao ciclo dos motores de combustão interna os principais são;

a) Motores de ciclo Diesel – a ignição se processa por compressão, (ICO).

b) Motores de ciclo Otto – a ignição se processa por centelha, (ICE).

Quando um motor diesel opera com mais de um combustível (diesel/gás natural) sob os ciclos Diesel e Otto simultaneamente, e a ignição inicialmente se processa sob o ciclo Diesel e continua sob o ciclo Otto, dizemos que este motor está operando em Ciclo Dual.

2.3.1.3 Quanto ao tipo de alimentação de ar

Quanto ao tipo de alimentação de ar, os motores de combustão interna podem ser classificados como;

a) Motores aspirados – onde o suprimento de ar para o motor é feito pelo deslocamento do pistão do ponto morto superior ao inferior, a pressão atmosférica.

b) Motores turbinados – onde o suprimento de ar para o motor é feito a partir de um compressor de ar acionado por uma turbina instalada no coletor de escapamento ou pelo acionamento de um turbo mecânico pelo próprio eixo do motor, promovendo uma superalimentação, o que proporciona uma pressão superior a atmosférica.

2.3.1.4 Quanto ao movimento

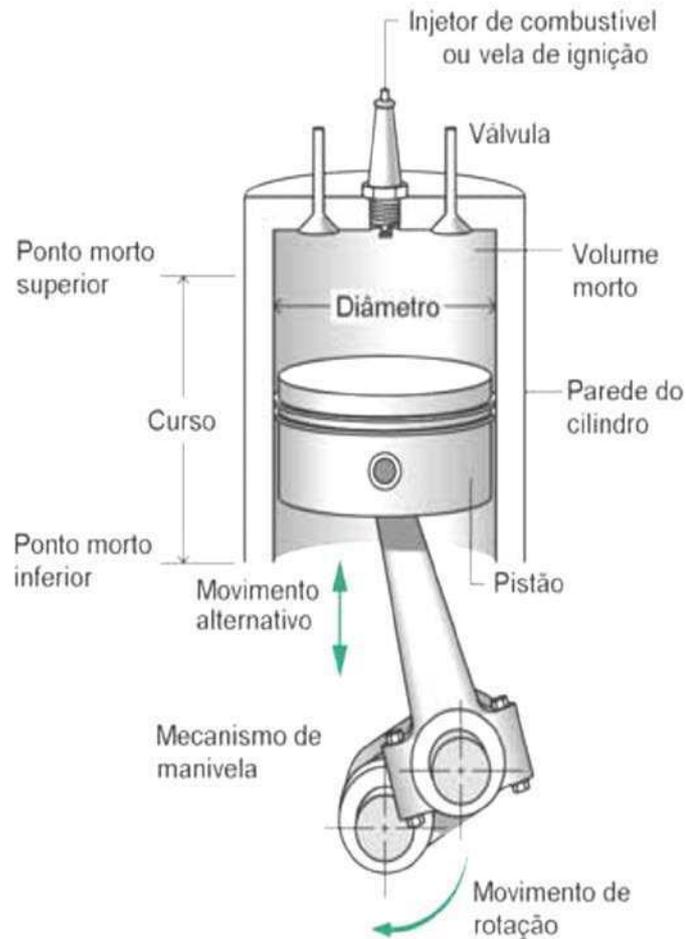
Quanto ao movimento, os motores de combustão interna são:

a) Motores alternativos – são motores cujo acionamento da árvore de manivela se dá pelo movimento alternativo do pistão.

b) Motores rotativos – são motores que utilizam rotores girantes, como o Wankel, o quase turbine dentre outros.

As principais dimensões características de um motor de combustão interna alternativo, são apresentadas a seguir na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Parâmetros característicos de um motor alternativo.



Fonte: Moran e Shapiro (2011).

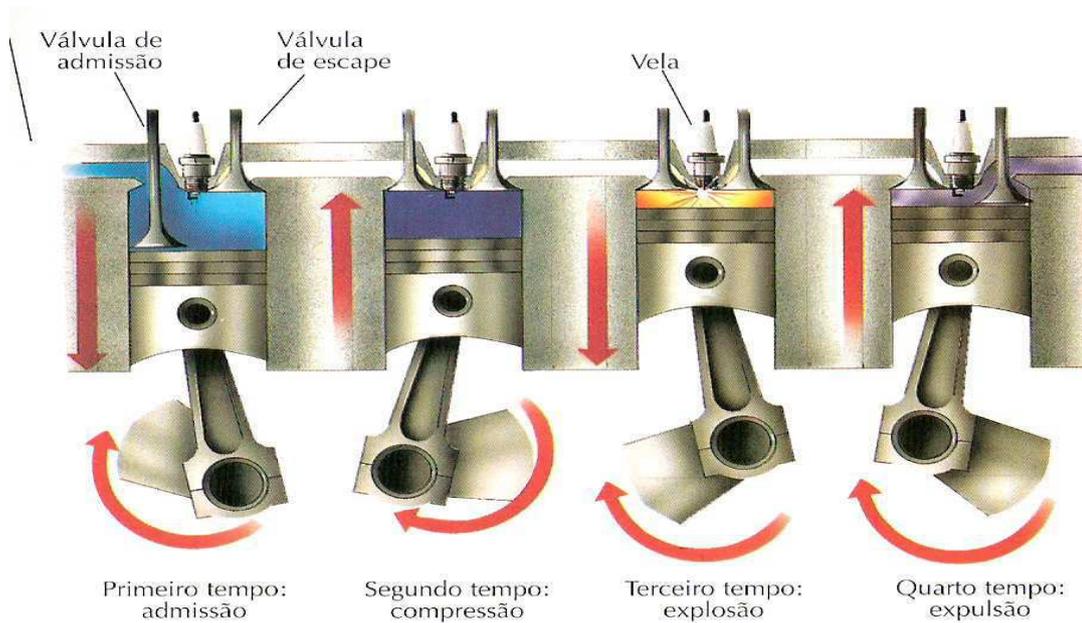
Apresenta-se em seguida, cada um destes ciclos separadamente com seu funcionamento através do gráfico PV, sobre a qual são marcados para análise descritiva os pontos de adição e liberação de calor ao longo desta curva, bem como suas particularidades inerentes a cada um deles através da análise do ciclo de ar padrão correspondente.

2.3.2 Ciclo dos motores

2.3.2.1 Ciclo Otto nos motores de quatro tempos

Inicia-se a discussão apresentando na Figura 2.2, o esquema funcional do ciclo Otto de quatro tempos, o qual é realizado em duas voltas da árvore de manivelas.

Figura 2.2 – Esquema do funcionamento do ciclo Otto para motores de quatro tempos.



Fonte: <http://abastecendoa vida.blogspot.com.br/2010/10/diferencas-entre-motores-alcool.html>

A Figura 2.3, apresenta o diagrama real de pressão-volume do motor de combustão interna alternativo do ciclo Otto.

Figura 2.3 – Diagrama real de pressão-volume do motor de combustão interna para o ciclo Otto.



Fonte: Queiroz (2014)

As quatro fases desenvolvidas pelo ciclo Otto de quatro tempos e apresentadas na Figura 2.2 são descritas a seguir:

1 - A fase de admissão nos motores aspirados, acontece com a entrada de mistura de ar/combustível em quantidade pré-estabelecida sob o efeito da pressão atmosférica, para o interior dos cilindros cuja pressão está menor.

2 - A fase de compressão se inicia teoricamente no PMI indo até o PMS onde a pressão e temperatura do sistema atingem seu valor máximo.

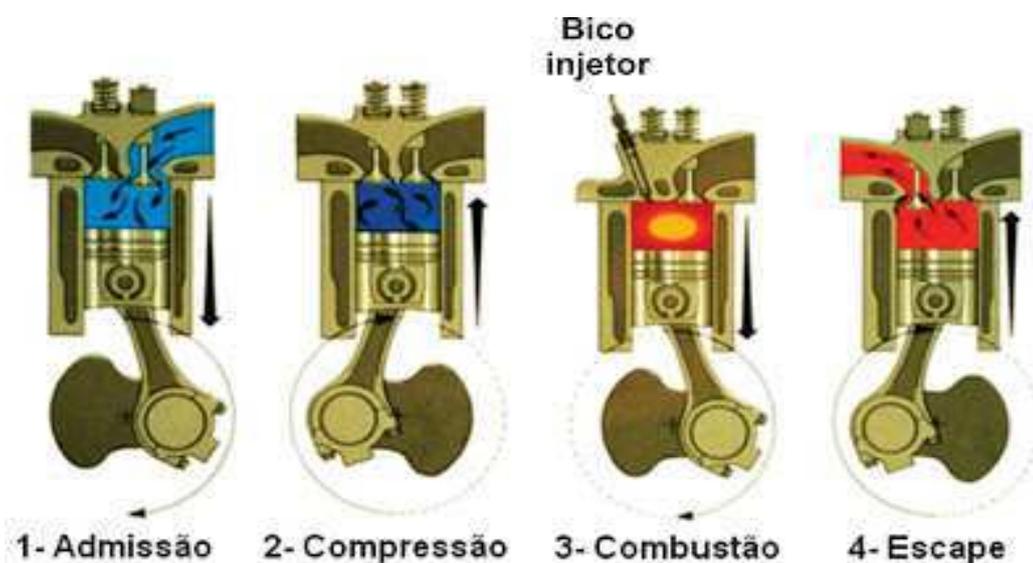
3 - A fase de explosão e expansão dos gases tem início com uma centelha, que inicia a ignição da mistura ar/combustível aquecida e comprimida, ao final do PMS, com a liberação da energia na forma de calor e uma violenta expansão dos gases da combustão.

4 - A fase de exaustão dos gases queimados acontece também do PMI até o PMS, onde termina o ciclo.

2.3.2.2 Ciclo Diesel nos motores de quatro tempos

Apresenta-se na Figura 2.4, o esquemático funcional do ciclo Diesel e seus quatro tempos distintos, realizados em duas voltas do eixo de manivelas.

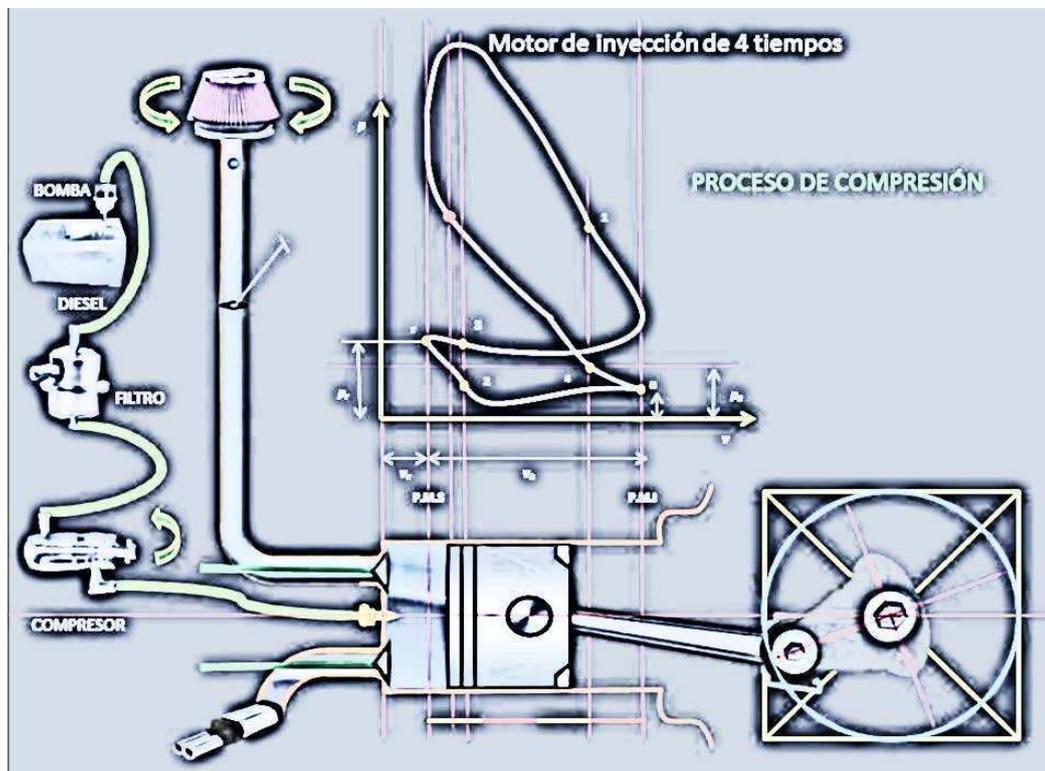
Figura 2.4 – Esquemático de funcionamento do ciclo diesel para motores de quatro tempos alternativos – ICO.



Fonte: <http://maquinasemotoresnapescavso.blogspot.com.br/p/motor-do-ciclo-diesel.html>

A Figura 2.5, apresenta o diagrama real de pressão-volume para um motor do Diesel.

Figura 2.5 – Diagrama real de pressão-volume para um motor do ciclo Diesel.



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=Ft-3Fm2xRmU&feature=youtu.be>
<<https://youtu.be/Ft-3Fm2xRmU>>.

As fases de um motor de quatro tempos Diesel, e apresentadas na Figura 2.4, são descritas a seguir:

- 1 - A fase de admissão nos motores diesel, acontece com a entrada de ar para o motor sob o efeito da pressão atmosférica, para o interior dos cilindros cuja pressão está menor pelo efeito da depressão causada pelo deslocamento do pistão do PMS até o PMI, onde termina a fase de admissão.
- 2 - A fase de compressão se inicia teoricamente no PMI indo até o PMS, onde a pressão e temperatura do ar atingem seu valor máximo.
- 3 - A fase de explosão ocorre através da injeção em alta pressão do óleo diesel, que explode em contato com o ar superaquecido iniciando a combustão com a liberação da energia na forma de calor e uma violenta expansão dos gases da combustão.
- 4 - A fase de exaustão dos gases queimados acontece também do PMI até o PMS, onde termina o ciclo, que se repete continuamente em determinada frequência.

2.3.2.3 Ciclo Dual

O ciclo dual surge quando se utiliza dois ou mais combustíveis, operando simultaneamente sob uma combinação do *Ciclo Otto* com o **Ciclo Diesel**, segundo (Queiroz 2014), esta combinação “É sem dúvidas o melhor modelo termodinâmico para representar os motores diesel modernos”.

O ciclo dual é o melhor modelo termodinâmico para representar os motores diesel modernos. Esse ciclo mostra as variações que ocorrem na pressão e volume durante a combustão. O ciclo dual é uma combinação do ciclo Otto com o ciclo Diesel, Daniel Marçal de Queiroz - Potência dos motores do ciclo Diesel (QUEIROZ, 2014, sld. 05.)

Os motores diesel modernos não seguem o ciclo Diesel teórico, o ciclo dual no qual o calor é gerado parte a volume constante e, parte a pressão constante, representa melhor os motores diesel atuais, (QUEIROZ, 2014, cap. 04).

Ainda segundo, Moran e Shapiro (2011):

Os diagramas de pressão-volume de motores de combustão interna reais não são bem descritos pelos ciclos Otto e Diesel. Um ciclo de ar padrão que pode ser elaborado para melhor aproximar as variações de pressão é o ciclo o ciclo de ar padrão dual conforme (MORAN; SHAPIRO, 2011)

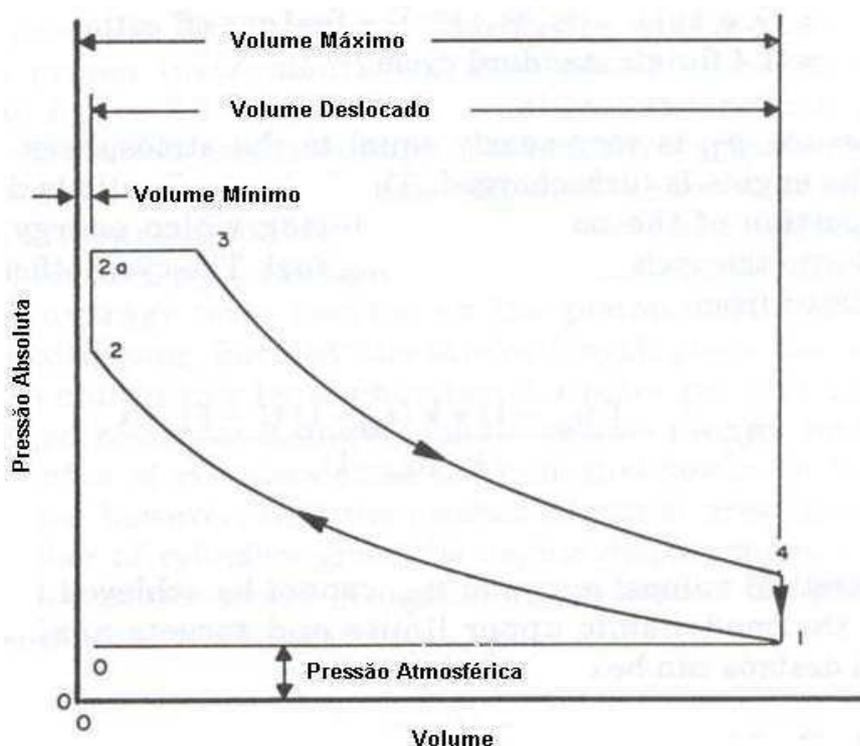
Sabe-se, com relação aos ciclos ar padrão Otto e Diesel, que:

- a) **No ciclo de ar padrão Otto ou ciclo ideal Otto**, os processos de compressão e expansão acontecem de forma isentrópica e, o processo de adição e rejeição de calor ocorrem a volume constante.
- b) **No ciclo de ar padrão diesel ou ciclo ideal diesel**, os processos de compressão e expansão acontecem de forma isentrópica e, os processos de adição e rejeição de calor ocorrem a pressão constante;

Portanto, no ciclo de ar padrão diesel operando em modo dual, parte do ciclo ocorre conforme descrito no item (a) e a outra parte ocorre conforme descrito no item (b).

Pode-se observar o diagrama teórico de pressão-volume do ciclo diesel operando em modo dual na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Diagrama de pressão-volume do motor diesel operando em ciclo dual.



Fonte: Adaptado de Daniel Maçal de Queiroz - Potência dos motores do ciclo diesel, disponibilizado em: ftp://www.ufv.br/Dea/Disciplinas/Daniel/Eng336/quarta_semana/slide_05.htm.

Analisando os processos do diagrama de pressão-volume do motor diesel operando em modo dual (diesel/gás natural), ver Figura 2.8, observa-se que da mesma forma como acontece para o ciclo Otto, o processo de compressão $1 \rightarrow 2$, ocorre de forma isentrópica. A partir do ponto 2, os processos precisam levar em consideração o efeito da adição de calor sob o aspecto dos dois ciclos que compõem o ciclo dual separadamente, quais sejam: processo $2 \Rightarrow 2a$, onde calor é fornecido a **volume constante** e, processo de $2a \rightarrow 3$, onde calor é fornecido a **pressão constante**. Ainda no Processo de $2a \rightarrow 3$, tem-se a primeira parte do curso de potência. No Processo de $3 \rightarrow 4$ tem-se a segunda parte do curso de potência onde ocorre a expansão isentrópica e, por fim, o ciclo se completa com o processo de $4 \rightarrow 1$, onde ocorre a rejeição do calor a volume constante exatamente como ocorre no ciclo Otto.

Com relação ao desenvolvimento de novas tecnologias e novos processos utilizados com o objetivo de otimizar a combustão nos motores, melhorando a sua eficiência, os fabricantes de veículos leves e pesados, assim como os centros de pesquisas, desenvolveram novas tecnologias e processos, que já foram implementadas nas linhas de produção no Brasil a partir de 2012. A seguir, apresenta-se algumas dessas tecnologias ou processos.

Cohen et al. (2003) avaliaram a relação custo-benefício de duas destas novas alternativas para o uso do diesel convencional como combustível em ônibus no trânsito urbano nos EUA, quais sejam:

a) EDC - Emissão de diesel controlado, que reduz as emissões usando combustível de baixo enxofre e FPD - Filtro de partículas diesel.

b) Uso do GNC - Gás natural veicular comprimido.

As preocupações com as emissões são focadas, principalmente em material particulado (MP) e nos subprodutos secundários da combustão como: óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2), que têm sido associadas as doenças respiratórias e cardiovasculares e até óbitos, (Pope et al. (2000)).

Cohen et al. (2003) comparam o custo-efetividade do uso das tecnologias de EDC - emissões de diesel controlado e de gás natural comprimido, em ônibus de trânsito para outras aplicações como forma de reduzir a exposição da população a poluentes atmosféricos. O objetivo era encontrar aquela cujas vantagens e custos destas tecnologias fossem viáveis, embora fossem um pouco maiores se comparados com outras medidas de controle da poluição do ar. Ele percebeu que os custos associados com o uso dessas tecnologias em ônibus escolares tornam-se maiores, uma vez que estes rodam menos se comparados com outras categorias de veículos. Concluiu em seu relatório final que das duas tecnologias analisadas, o uso do gás natural reduz muito mais os danos causados à saúde dos humanos do que o uso das emissões controladas de diesel.

Ainda com relação a essas duas tecnologias, estudos realizados por Cohen (2005), afirmam que o efeito das tecnologias é muito menor do que se anuncia. Levando em conta as incertezas dos benefícios proporcionados a saúde dos humanos por estas duas tecnologias EDC, e GNC, são essencialmente indistinguíveis.

Particularmente significativa são as conclusões dos estudos com ônibus escolar para este caso, a tecnologia EDC melhora as emissões de NO_x em comparação com diesel comum; essa é uma das vantagens, segundo Cohen et al. (2003), que não se encontra no caso da tecnologia EDC nos ônibus urbanos.

Injeção direta do gás natural no coletor de admissão de um motor diesel foi testado por Carlucci et al. (2008), em seu trabalho experimental com um motor diesel operando em modo dual, diesel/gás natural. A finalidade foi estudar o desenvolvimento da combustão e suas implicações no desempenho do motor, em termos de níveis de emissão de poluentes e de consumo de combustíveis. O motor foi ensaiado em várias condições de funcionamento com diferentes valores de carga e de velocidades. Em todas as condições testadas, o efeito de gás natural e da pressão de injeção de combustível diesel, em conjunto com a quantidade de combustível injetado durante a injeção piloto, foram analisados no desenvolvimento da combustão e, conseqüentemente, sobre o desempenho do motor, em termos de níveis de emissões e consumo específicos de combustível. Durante os ensaios, o motor foi operado em duas condições diferentes (quantidade de diesel) e, para cada uma delas, os combustíveis gás natural e diesel foram injetados em conjunto e sob pressão e variando a quantidade de combustível piloto injetada.

Observações de Carlucci et al. (2008) revelaram que as análises dos ensaios realizados não foram suficientes para explicar o efeito de cada um dos parâmetros de injeção sobre as emissões de poluentes isoladamente, porém, no caso do NO_x , a penetração do jato tem a mesma importância que a quantidade de combustível piloto injetada. Quanto mais o jato penetra na câmara de combustão, mais sua combustão vai se espalhar na câmara e, em seguida, as temperaturas no interior dos cilindros atingem valores mais próximos da temperatura máxima. Conclusões similares podem ser concebidas para o CO e os níveis de emissões de HC, embora as emissões de HC não parecem ser alteradas pelos parâmetros da injeção. Já com relação aos níveis de emissões de material particulado (MP), estes não mostram uma dependência bem definido nas variáveis testadas, porém, quando o motor funciona no modo dual, as emissões de MP são notavelmente inferiores as observadas com o combustível diesel.

A partir dos dados de seu trabalho experimental, Papagiannakis et al. (2003), observaram que os resultados da operação de um motor diesel de injeção direta modificado para operar em modo dual de combustível com um maior atraso de ignição em comparação com a operação diesel normal, o uso de combustível gasoso leva a uma diminuição da pressão de pico do cilindro em relação à operação diesel normal. Observaram também que às emissões de poluentes com a utilização de combustível gasoso tem um efeito positivo sobre as emissões de NO e que o nível de concentração de NO com o motor operando em modo dual é menor, se comparado com o motor operando com diesel normal. Com relação as emissões de CO e HC

na operação em modo dual, estas são, em geral, superior se comparadas com o motor operando em modo diesel normal. Os valores aumentam proporcionalmente com o aumento da massa de combustível gasoso e apenas quando o motor opera em altas cargas é que se observada uma diminuição em razão de maior massa de gás natural. Os autores Constaram nos ensaios, que existe uma grande diminuição das emissões de fuligem quando o motor é operado no modo dual (bicomcombustível). O efeito é maior com o aumento da carga do motor e da massa de gás natural. Somente a plena carga e pequenas taxas de substituição do diesel pelo gás natural, é que pode ser observado um pequeno aumento na emissão de fuligem. A partir do que foi constatado nos ensaios realizados, percebeu-se que a combustão em modo dual, usando o gás natural como um suplemento para o combustível líquido, é uma técnica promissora para controlar as emissões de NO e de fuligem em motores diesel de injeção direta existentes, exigindo modificações mínimas que não representa perigo para a estrutura do motor, muito pelo contrário. Os melhores resultados são obtidos com maior massa de gás natural e maiores cargas no motor dentro de limites pré-estabelecidos.

Um novo estudo realizado por Papagiannakis et al.(2004), praticamente revalidou o seu trabalho de 2003, quando constaram que o funcionamento do motor em modo dual resulta em menor pressão no interior do cilindro quando comparado com o motor operando com o diesel normal.

Essa conclusão é bastante interessante, uma vez que o motor operando com menor pressão nos cilindros em modo dual, não oferecerá nenhum risco a estrutura física do motor, além do que, sua vida útil tende a aumentar significativamente.

Ainda, com relação ao consumo específico em cargas mais baixas, verificaram que este foi inferior quando operando em modo dual se comparado com o motor funcionando com o diesel normal nas mesmas condições de velocidade e potência. Já por outro lado, se comparado com cargas mais elevadas, os valores de consumo específico de combustível em modo dual tendem a convergir para os valores do motor operando com o diesel normal.

Com relação às emissões de poluentes, perceberam claramente que a utilização de gás natural em operação no modo dual (bicomcombustível), tem um efeito positivo sobre as emissões do NO_x, sendo assim, a concentração do NO_x em operação bicomcombustível é muito menor em relação à operação do motor com diesel normal e ao mesmo tempo, há uma diminuição drástica

nas emissões de fuligem e fumaça negra em operação no modo dual, (bicomustível), independentemente das condições de funcionamento do motor, constituindo-se assim um fator muito importante para a redução das emissões nocivas ao meio ambiente. Este estudo experimental, também constatou que os níveis de emissões de CO e HC quando o motor está operando em modo dual, são consideravelmente mais elevados se comparação aos níveis emitidos com o motor funcionando em modo diesel normal.

Papagiannakis et al. (2010), em trabalho teórico, apresentaram algumas sugestões para minimizar o aumento de CO nos motores operando em dual modo com diesel e gás natural. Utilizando um modelo para duas zonas fenomenológica existente examinou o efeito do aumento da quantidade de combustível piloto acompanhado do aumento da temperatura de entrada de ar, no desempenho das emissões de um motor diesel com injeção direta, operando em modo dual de combustível, diesel e gás natural. A comparação entre a operação do motor no modo dual e no modo diesel normal mostrou que o uso simultâneo de diesel e gás natural leva a valores mais altos de consumo específico de combustível. Quanto às emissões, o motor operando em modo dual, foi observada uma redução de óxido nítrico e das emissões de fuligem, ao mesmo tempo que provocou um aumento considerável nas emissões de monóxido de carbono em comparação com as observadas nas condições de operação com diesel normal.

De acordo com os resultados deste novo trabalho, os autores concluíram que: o aumento simultâneo de ambos os parâmetros, “combustível piloto e temperatura do ar de entrada”, conduz a uma diminuição do consumo específico de combustível e ainda que o efeito torna-se mais sensível com uso de potências maiores, onde o consumo específico de combustível tende a convergir com o respectivo consumo específico do motor funcionando com diesel normal. Sendo assim, o aumento simultâneo de ambos os parâmetros operacionais do motor, “combustível piloto e temperatura do ar de entrada”, resultou em uma melhoria significativa da eficiência do motor, que se tornou maior com uma maior elevação da temperatura do ar de entrada. Neste novo trabalho, os autores chegaram a concluir que os impactos negativos sobre as emissões de CO pela operação do motor em modo dual, poderia ser reduzido significativamente por intermédio de pré-aquecimento do ar de admissão e aumentando a quantidade do combustível piloto simultaneamente.

Já do ponto de vista das emissões poluentes, o aumento da quantidade de combustível piloto tem de ser acompanhado por um aumento limitado da temperatura do ar de admissão

para que não haja danos ao motor pelo aumento da pressão no interior dos cilindros que poderá superar os limites de operação do motor. Em geral, o aumento da quantidade de combustível piloto, acompanhada com aumento da temperatura do ar de entrada, pode ser uma solução promissora para melhorar a eficiência do motor e a redução das emissões de CO.

Segundo os autores, o aumento simultâneo de ambos os parâmetros examinados em cargas baixas e intermediárias, não trazem nenhum problema grave ao tempo de vida de motor. No entanto, o motor operando em carga alta, o aumento simultâneo de ambos os parâmetros para além de um certo limite, pode causar problemas sérios a estrutura de motor, uma vez que a pressão máxima no interior do cilindro pode atingir níveis maiores do que os níveis suportados com o motor funcionando com diesel normal. Desta forma, operar nessas condições adversas de excesso de pressão no interior dos cilindros, poderá ser prejudicial para a resistência mecânica do motor e até mesmo danificar o motor.

De acordo com Sahoo a; Sahoo b; Saha b (2009), recursos petrolíferos são finitos e, portanto, procurar por combustíveis alternativos não derivados do petróleo para motores de combustão interna continua sendo prioridade em todo o mundo.

Além disso, gases emitidos pelos veículos movidos por combustível derivados de petróleo tem um efeito nocivo sobre o meio ambiente e a saúde humana. Existe um consenso universal da necessidade de redução dessas emissões. Para isto, os cientistas ao redor do mundo já propuseram várias soluções para os motores a diesel, uma das quais é a utilização de combustíveis gasosos, como um suplemento ao combustível diesel. Estes motores, que usam combustível diesel convencional e combustível gasoso, são referidos como "motores bicomcombustíveis". Gás natural e gases derivados de biocombustíveis apresentam-se como alternativas muito atraentes para os motores bicomcombustíveis por conta do menor poder de agressão ao meio ambiente.

Nos motores que operam em modo dual, diesel e gás natural por exemplo (duplo combustível), o combustível primário é misturado no exterior do cilindro, antes de ser introduzido dentro do cilindro. Uma quantidade piloto de combustível líquido é injetado no final do curso de compressão para iniciar a combustão. Ao considerar um combustível gasoso para uso em motores diesel já existentes, é importante lembrar que vários problemas podem

surgir como os efeitos nos parâmetros de funcionamento e design do motor em função do tipo de combustível gasoso com relação ao desempenho de motores de duplo combustível.

Este trabalho revisa a pesquisa realizada por vários cientistas sobre estas questões em diferentes configurações de motores a diesel. Este aborda as características de desempenho, de combustão e de emissões de motores bicomcombustíveis, que utilizam gás natural, biogás, metano, gás liquefeito de petróleo, propano, etc., como combustível gasoso. Ele revela que o conceito de operação em modo dual é uma técnica promissora para o controle de emissões de NO_x e de fuligem, mesmo nos motores diesel existentes, porém, os hidrocarbonetos - HC, e as emissões de CO, são mais elevados nas operações de motores diesel em modo dual com carga parcial.

A eficiência térmica dos motores bicomcombustíveis melhora muito com o aumento da velocidade do motor, ou com intervalos de injeção avançados, ou com o aumento da quantidade de combustível piloto.

Quanto as características de ignição dos combustíveis gasosos são necessárias mais pesquisas para uma utilização a longo prazo dos motores bicomcombustíveis. Verificou-se que, a seleção de parâmetros de concepção de funcionamento dos motores desempenham um papel fundamental para minimizar as diferenças de desempenho entre os motores diesel existentes e os motores bicomcombustível (diesel e gás).

O trabalho de Uma et al. (2004) sobre geração de eletricidade por grupos geradores operando no modo diesel e no modo dual, mostrou que, além dos benefícios sobre os aspectos ambientais, o motor diesel é capaz de operar em modo dual na faixa de 67-86% de substituição de diesel por gás natural sem nenhum problema. Além disso os seguintes aspectos foram observados em seu estudo:

- a) O desempenho do motor diminui com o aumento das emissões devido em parte as condições de carga, tanto em diesel como no modo dual.
- b) Na carga máxima (80% da capacidade nominal), as emissões de monóxido de carbono foram geralmente abaixo das indicações das normas, com exceção, das emissões obtidas nas operações em modo dual, o que excedeu os valores do padrão das normas.

- c) As emissões de monóxido de carbono com o motor operando em modo dual foram maiores do que em modo diesel em todas as condições de carga analisadas.
- d) Para o motor operando em modo dual verifica-se uma redução significativa nas emissões de NOX e SO2, bem como na emissão de particulados.

Fernandes (2012), em seu trabalho, concluiu que:

os ganhos relacionados à redução de emissões de gases tóxicos resultantes de processos de combustão do biodiesel com o diesel, foram relevantes, considerando a grande redução de emissões de CO, CO₂ e, de certa forma, os estudos apontam para uma possibilidade de redução também dos NO_x, desde que seja melhorada a densidade, aditivação e balanço estequiométrico do biodiesel. A grande viabilidade técnica do uso do biodiesel, considerando os aspectos físico químicos, foi apresentada de forma positiva, interpretada mediante testes de torque e potência realizados, com pouca variabilidade em função do aumento do incremento do biodiesel ao diesel. O consumo específico do biodiesel em relação ao diesel apresentou um aumento relativamente baixo, mas com possibilidades de melhora através da aditivação, melhor controle da densidade e estabilidade do processo de transesterificação, (FERNANDES, 2012).

Coronado et al. (2009) avaliaram e quantificaram o impacto ambiental do uso de alguns combustíveis renováveis e combustíveis fósseis em motores de combustão interna. Os seguintes combustíveis foram avaliados: gasolina misturada com álcool etílico anidro (etanol anidro), combustível diesel convencional, biodiesel B100, na forma pura e misturado com combustível para motores diesel e gás natural. Para o caso do biodiesel, foram considerados o seu ciclo de vida completo e o fechado. Foram considerados também ciclo de carbono (fotossíntese). Os gases de escape a partir de motores de combustão interna, no caso da gasolina (misturado com álcool 20%), biodiesel e biodiesel misturado com o diesel convencional, são menos poluentes enquanto que os mais poluentes são aqueles relacionados ao diesel convencional e podem causar graves problemas para o ambiente, para a vida humana e os animais devido aos seus componentes. Os níveis de poluição resultantes das emissões de cada um dos combustíveis mencionados, foram analisadas, considerando separadamente CO₂, SO₂, NO_x e material particulado (MP). Com a conclusão dos estudos, foi possível calcular um Fator Ambiental que representa, de forma qualitativa e quantitativa, as emissões em motores de combustão interna que são usados principalmente nos meios de transporte de áreas urbanas. O Biodiesel na forma pura (B100) misturado com o diesel convencional é utilizado como combustível para motores diesel com a finalidade de poluir menos o meio ambiente do que o combustível diesel.

Foram determinadas as seguintes eficiências ecológica para diversos tipos de combustíveis: para o biodiesel puro (B100) foi encontrado que o valor é cerca de 86,75%; para o biodiesel misturado com combustível de diesel convencional (B20, 20% de biodiesel e 80% de diesel), determinou-se que é de aproximadamente 78,79%, já, a eficiência ecológica para o diesel convencional, quando utilizado em motores, ficou determinado ser de cerca de 77,34%, enquanto que para gasolina ficou determinado o valor de cerca de 82,52% e, finalmente, para o gás natural foi determinado ser de aproximadamente 91,95%. Na determinação de todos estes valores foram considerados uma eficiência térmica de 30% para o motor de combustão interna.

Este trabalho mostrou claramente que é possível avaliar o impacto ambiental por motores de combustão interna que utilizam parâmetros ecológica de eficiência e mais:

- O uso de biodiesel puro (B100) ou sua mistura com diesel (B20), em motores de combustão interna, sobretudo em motor com ignição por compressão, representa uma excelente opção no plano ecológico;
- O combustível que libera menos emissões de CO₂ para a atmosfera é o gás natural e o que libera as maiores emissões é o combustível diesel.

O biodiesel apresenta uma situação semelhante no que diz respeito ao diesel. Por outro lado, o biodiesel tem mais moléculas de oxigênio em comparação com o óleo diesel; por conseguinte, o processo de combustão é mais completo e, como consequência, uma redução das emissões de CO é possível. A Tabela 2.9 apresenta a comparação dos resultados de emissões.

Tabela 2.9 - Comparação dos resultados de emissões de poluentes entre combustíveis analisados em motor de combustão interna

Emissão de Poluentes (kg/kg de combustível)	Gás Natural	Diesel	Gasolina	Biodiesel B20	Biodiesel B100	Diesel/ Bio-diesel
CO ₂ e	2,7270	8,5290	5,8910	7,5020	3,4230	2,5
PM	1.71x10 ⁻⁵	15.27x10 ⁻³	1.920x10 ⁻³	14.21x10 ⁻³	9.931x10 ⁻³	1,5
NO _x	4.412x10 ⁻⁴	4x10 ⁻²	5.5x10 ⁻²	4.04x10 ⁻²	4.2x10 ⁻²	0,9
SO ₂	1.213x10 ⁻⁶	3x10 ⁻²	0.2x10 ⁻²	2.4x10 ⁻²	-	-
CO ₂	2,7040	3,1060	2,8530	2,6100	0,6580	4,7
Total (kg/kg de combustível)	2,7042	3,1610	2,9120	2,6890	0,7100	4,4
Eficiência Ecológica (%)	91,95	77,34	82,52	78,94	87,58	-

Fonte: Coronado (2009).

* Gasoline with 20% of alcohol.

Sahoo a; Sahoo b; Saha b; (2009), após analisar em inúmeros trabalhos realizados por diversos pesquisadores de todas as partes do mundo com motores diesel operando em modo dual (diesel/gás natural), elencaram os pontos mais importantes destes trabalhos, onde existe uma convergência para um consenso quanto aos resultados conforme segue:

a) - Com relação aos efeitos da carga do motor

- O desempenho do motor diminui nas potências menores e apresenta uma pequena recuperação nas potências mais elevada.
- A baixa pressão no interior do cilindro no momento de pico, em determinada condição de potência, é uma grande vantagem, uma vez que reduz o comprometimento da estrutura do motor.
- A taxa de aumento de pressão com o aumento da potência é sempre maior do que no modo diesel.
- A duração da combustão é maior quando comparada com o modo diesel em baixa potência.
- As baixas emissões de NO_x é acompanhada da redução das emissões de fuligem para todos os combustíveis gasosos.
- As emissões de CO e HC do motor operando em todas as condições de potências são inferiores as do modo diesel.

b) - Com relação aos efeitos da rotação do motor

- A eficiência térmica do motor aumenta com o aumento da velocidade angular.
- Existe uma relação de equivalência um pouco maior em determinadas condições de velocidade nos motores bicombustíveis.
- A pressão máxima de combustão é ligeiramente maior no modo dual de operação do que com combustível diesel normal quando o motor opera a velocidade constante.
- A taxa de aumento de pressão diminui com o aumento da velocidade do motor e é mais elevada do que para o caso do diesel.

c) - Quanto aos efeitos do tempo de injeção da chama piloto de combustível

- Uma melhoria na eficiência térmica foi conseguida.
- A pressão máxima e a taxa de aumento de pressão aumentam com o avanço no tempo de injeção, se comparado com o modo diesel.
- Um aumento maior no avanço do tempo de injeção ocasiona o início de detonação em cargas médias e altas.
- Uma redução no avanço do tempo de injeção promove um aumento nas emissões de NO_x , e uma redução nas emissões de CO e HC.

d) - Em relação aos efeitos do aumento da massa de diesel

- Melhora a eficiência térmica e o torque do motor
- Aumenta a pressão máxima de combustão, porém reduz a taxa de aumento de pressão máxima.
- Nas cargas elevadas favorece o aparecimento da detonação precoce, porém, reduzindo simultaneamente o combustível principal, reduz-se os fenômenos de detonação.
- Aumenta-se as emissões de NO_x e reduz-se as emissões de CO.

e) - Com relação aos efeitos da razão de compressão do motor

- O ruído começa mais cedo em altas taxas de compressão.
- Aumenta o ruído de combustão.

f) - Quanto aos efeitos das condições de coletor de admissão do motor

- EGR com aquecimento melhora a eficiência térmica.
- EGR com aquecimento reduz a ingestão de NO_x .
- Relação EGR excessiva ($> 50\%$) provoca a deterioração das características de combustão.

g) - Com relação aos efeitos do tipo de combustível gasoso

- O desempenho do motor não muda muito com 40% de CO_2 no biogás, se comparado com o motor com GNV (96% de metano). Porém, 30% de CO_2 no biogás melhora o desempenho do motor se comparado com um funcionamento em GNV.

- 60% de substituição do diesel é possível através da mistura de gases, sem que haja detonação.
- A eficiência geral diesel diminui pela substituição com mistura de gases, e a adição de CO₂ afeta mais nas velocidades maiores.
- O aumento de massa GNV produz uma diminuição brusca na concentração de fuligem, reduz as emissões de NO, e aumenta as emissões de HC e CO.
- O aumento da massa de combustível gasoso aumenta o ruído de combustão e pressão máxima para o metano, GNV e GLP. Parece que a combustão em modo dual utilizando combustíveis gasosos é uma das técnicas promissora para controlar os parâmetros de fuligem e eventuais emissões de NO nos motores diesel existentes com ligeira modificação em sua estrutura.
- As desvantagens observadas na condição de baixa carga do motor, relativas à CO pode ser reduzida mediante a aplicação de modificações na afinação do motor, ou seja, mudando o tempo de injeção do combustível piloto. Mais uma vez, no motor diesel operando em modo dual as características de ignição dos combustíveis gasosos ainda são pouco compreendidas e precisa de mais investigação sobre elas. Sendo assim, em geral, os parâmetros de concepção e de funcionamento destes motores, e a seleção do tipo de combustível gasoso tem de ser escolhido de conformidade para um motor diesel existente para ser operado no conceito de modo dual. Isso pode minimizar as características de performance, combustão e emissões divergentes entre o motor operando em modo diesel e em modo dual.

2.4 PROCONVE - Programa de controle das emissões dos veículos automotores

2.4.1 As fases do PRONCOVE

Atualmente, em relação aos veículos pesados, o Brasil está na fase P7, que entrou em vigor em janeiro de 2012, lembrando que a fase P6 não entrou em vigor na data prevista. Na fase P7, as emissões dos veículos brasileiros são equivalentes às emissões dos veículos de países europeus (fase euro 5), em vigor para todos os veículos pesados desde outubro de 2009.

Para cumprir os limites estabelecidos pelas sucessivas fases do PROCONVE, a indústria automobilística lança mão de novas tecnologias de redução das emissões de poluentes nos

veículos. Como exemplos, tem-se os catalisadores, responsáveis por parte do pós-tratamento dos gases, e os sistemas de injeção eletrônica, que ao melhorarem o processo de queima do combustível e reduzem as emissões.

A Tabela 2.10 e a Figura 2.7 a seguir, demonstram a evolução dos limites de emissão ao longo das fases do PROCONVE para veículos pesados. Observam-se reduções bastante expressivas nos limites de emissão tolerados para veículos novos, principalmente quando comparados com a nova fase P7 para veículos pesados que entrou em vigor em 2012.

Tabela 2.10 - Limites das emissões ao longo das fases do PROCONVE para veículos pesados

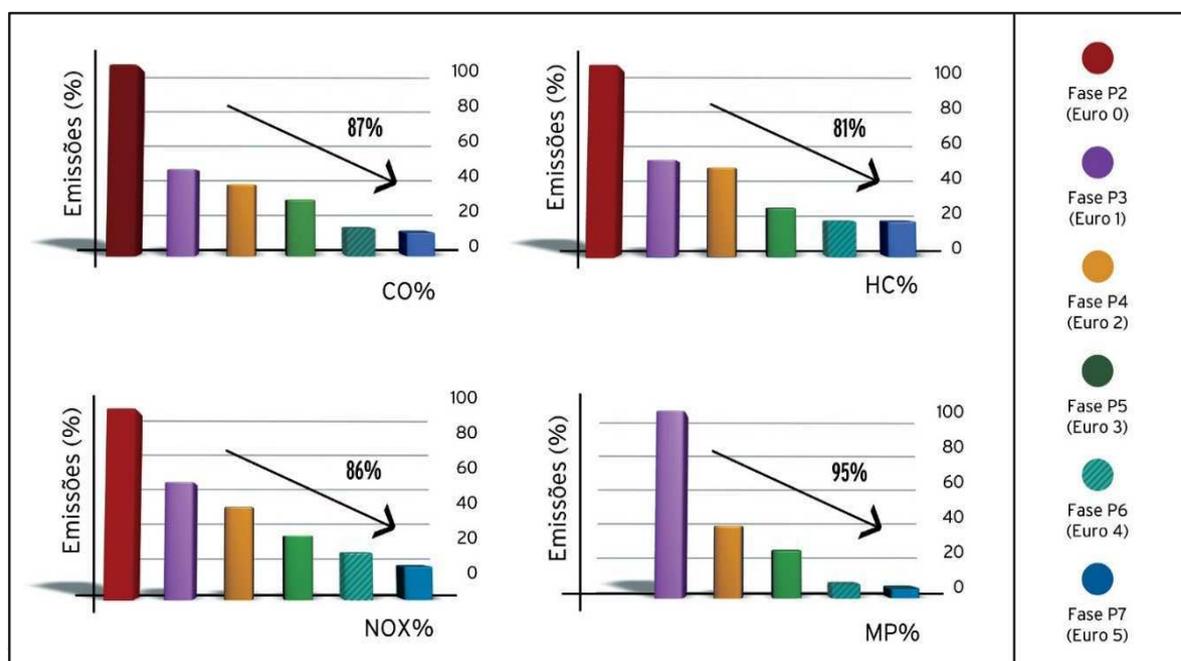
LIMITES DAS EMISSÕES PARA VEÍCULOS PESADOS A DIESEL								
PROCONVE	EURO	CO (g/kW.h)	HC (g/kW.h)	NOx (g/kW.h)	MP (g/kW.h)	Norma (CONAMA)	Vigência	Teor_de Enxofre (S)
Fase P1	-	14,00 ¹	3,50 ¹	18,00 ¹	-	Res. 18/85	1989 a 1993	-
Fase P2	Euro 0	11,20	2,45	14,40	0,60 ¹	Res. 08/93	1994 a 1995	3.000 a 10.000 ppm
Fase P3	Euro 1	4,90	1,23	9,00	0,40 ou 0,70 ²	Res. 08/93	1996 a 1999	3.000 a 10.000 ppm
Fase P4	Euro 2	4,00	1,10	7,00	0,15	Res. 08/93	2000 a 2005	3.000 a 10.000 ppm
Fase P5	Euro 3	2,10	0,66	5,00	0,10 ou 0,13 ³	Res. 315/02	2006 a 2008	500 a 2.000 ppm
Fase P6 ⁴	Euro 4	1,50	0,46	3,50	0,02	Res. 315/02	2009 a 2012	50 ppm
Fase P7	Euro 5	1,50	0,46	2,00	0,02	Res. 403/08	2012=>	10 ppm

CO	monóxido de carbono	HC	hidrocarbonetos	NOX	óxidos de nitrogênio	MP	material particulado	S	enxofre
----	---------------------	----	-----------------	-----	----------------------	----	----------------------	---	---------

Fonte: A fase P7 do PROCONVE e o impacto no setor de transporte - 2.ed – Brasília: CNT Sest/Senat 2012

1. Não foram exigidos legalmente
2. 0,70 para motores até 85 kW e 0,40 para motores com mais de 85 kW.
3. Motores com cilindrada unitária inferior a 0,75 dm³ e rotação à potência nominal superior a 3.000 RPM.
4. Não entrou em vigor na data prevista.

Figura 2.7 - Redução das emissões ao longo das Fases do PROCONVE para veículos pesados.



Fonte: A fase P7 do PROCONVE e o impacto no setor de transporte - 2.ed – Brasília: CNT Sest/Senat 2012.

Um dos principais problemas da utilização do óleo diesel como combustível com relação ao meio ambiente é o teor de enxofre nele contido. O diesel é constituído pela mistura de gasóleos, querosene e nafta, entre outros elementos químicos. Por isso, contém hidrocarbonetos, nitrogênio e enxofre.

O enxofre é um elemento químico indesejável para o meio ambiente e também para os motores diesel, pois, durante a combustão, o trióxido de enxofre, ao se juntar à água, forma o ácido sulfúrico, que corrói partes metálicas do motor, como mancais, guias de válvulas, camisas de cilindros, etc. Se a concentração desse elemento for elevada, as emissões de material particulado também serão elevadas, assim como as emissões de poluentes primários como SO_2 e SO_3 , acarretando grandes prejuízos à saúde humana.

Nos países desenvolvidos, os teores de enxofre encontrados no diesel possuem níveis muito baixos. No Japão, o teor máximo é de 10 ppm (partes por milhão) de enxofre. Em países europeus, desde 1996 já havia diesel comercializado com aproximadamente 50 ppm de enxofre. Já no ano de 2005, todo o diesel comercializado na União Europeia passou a ter concentração máxima de enxofre de 50 ppm. Nos EUA, tais valores de concentração já haviam sido atingidos no ano de 1993. Atualmente, os padrões americanos são da ordem de 15 ppm de enxofre.

No Brasil, até 1994, o diesel possuía 13.000 ppm de enxofre (S). A partir de 1994, passaram a existir no país duas qualidades distintas de óleo diesel previstas em lei: o diesel interior (comercializado no interior) e o diesel metropolitano (comercializado num raio de até 40 Km dos grandes centros). O diesel comercializado no interior possui 1.800 ppm de enxofre cuja denominação era (S-1800) e o diesel com 50 ppm de enxofre, cuja denominação era (S-50), disponível à população ou, em alguns casos, apenas às frotas cativas de ônibus urbanos.

Em virtude da fase P7, a partir de janeiro de 2012, conforme determinado nas Resoluções nº 65 de 9/12/2011 e nº 62 de 1/12/2011, a comercialização do diesel S-50 foi ampliada em todo o território nacional. Com isto, o S-50 ficou disponível em todos os estados brasileiros, sendo comercializado em aproximadamente 4.200 postos do país, que foram escolhidos supondo uma autonomia mínima de 100 km para os veículos diesel.

A partir de 2013, o óleo diesel S50 foi substituído integralmente pelo S10 e, em 2014, para uso rodoviário, o S500 substituiu definitivamente o óleo diesel S1800 que deixou de ser comercializado. Desta forma, a partir de 2014, o Brasil passou a utilizar apenas o diesel dos tipos S10 e S500 para uso rodoviário.

A única vantagem existente na presença de enxofre no diesel é a lubricidade do combustível, característica importante para auxiliar na diminuição do atrito entre as partes móveis do motor. No Brasil, a perda da lubricidade observada com a diminuição do teor de enxofre no combustível de origem fóssil é plenamente compensada pela adição obrigatória de 7%, em volume, de biodiesel B100, ao diesel, formando a mistura diesel de denominação (B7).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e a metodologia utilizada nesta pesquisa, fornecendo uma descrição dos equipamentos utilizados, suas características técnicas, normas empregadas nos ensaios, bem como a forma como os ensaios experimentais foram conduzidos no laboratório.

3.1 Combustíveis utilizados nos ensaios

Neste trabalho experimental foram utilizados três tipos de combustíveis: gás natural, diesel e biodiesel.

O gás natural foi obtido em postos locais, os quais recebem o gás natural distribuído pela PBGÁS, oriundo dos campos de produção de gás/óleo do Rio Grande do Norte, Bahia, Sergipe, Alagoas, e agora também da região sudeste, com a conclusão das obras de interligação do gasoduto sudeste-nordeste (GASENE), PBGÁS – Companhia paraibana de gás, publicado em: http://pbgás.com.br/?page_id=195.

As Tabelas 3.1 e 3.2, a seguir, apresentam, respectivamente, valores médios da composição e características do gás distribuído pela PBGÁS.

Tabela 3.1 – Composição do gás distribuído pela PBGÁS (Valores Médios)

Componentes	% Vol
Metano	90,09
Etano	6,84
Dióxido de Carbono	1,56
Nitrogênio	1,35
Propano	0,16

Fonte: PBGÁS – Companhia paraibana de gás, publicado em: http://pbgás.com.br/?page_id=195

Tabela 3.2 – Propriedades do gás natural da PBGÁS (Valores Médios).

Propriedades	Valor
Poder Calorífico Superior (kcal/m ³)	9.100
Densidade relativa do Ar	0,614
Massa específica (kg/m ³)	0,737

Fonte: PBGÁS – Companhia paraibana de gás, publicado em: http://pbgás.com.br/?page_id=195

O diesel utilizado para formar as misturas a serem ensaiadas, foi adquirido em postos de distribuição de combustível em Campina Grande-Pb, localizados no entorno da UFCG. Foi do tipo comum e classificação S50-B5, ou seja, com 50 ppm de enxofre e 5% em volume de biodiesel.

A análise físico-química do diesel realizada pelo laboratório QUALITEX – Engenharia e serviços Ltda, Maceió-AL, credenciado pela ANP, encontrou os resultados disponibilizados na Tabela 3.3

Tabela 3.3 - Resultado das análises do combustível diesel padrão (B5).

Ensaio	Unidade	Resultado	Especificação	Limite de quantificação	Método
Massa Específica (T. Ambiente, 30°C)	kg/m ³	833,5	--	800	NBR7148
Massa Específica a 20°C	kg/m ³	840,2	820 - 880	807	NBR7148
50% Destilado	°C	284	245 - 310	35	NBR9619
85% Destilado	°C	343	Máx. 370	35	NBR9619
Destilação ponto final	°C	367	--	35	NBR9619
Ponto de fulgor	°C	49	Mín. 38,0	28	ASTM65/ NBR7974
Enxofre total	mg/kg	560	Max. 2000	25	ASTM4294
Cinzas	%massa/ massa	0,05	Max. 0,010	0,02	NBR9842

Fonte: QUALITEX – Engenharia e serviços Ltda.

Os resultados das análises do diesel determinadas pelo laboratório QUALITEX – Engenharia e serviços Ltda. encontram-se dentro dos padrões exigidos pela ANP.

O **biodiesel** utilizado foi fornecido pela CETENE – Centro de Tecnologia Estratégica do Nordeste, empresa sediada em Recife-PE, cuja fábrica de biodiesel fica localizada na cidade de Caetés-PE. O biodiesel foi fabricado a partir do caroço de algodão por meio do processo de transesterificação pela rota metanol.

Análise físico-química do biodiesel realizada pelo laboratório QUALITEX – Engenharia e serviços Ltda. Maceió-AL, credenciado pela ANP, encontrou os resultados disponibilizados na Tabela 3.4

Tabela 3.4 - Resultado das análises do combustível biodiesel puro (B100) de algodão.

Biodiesel puro (B100)					
Ensaio	Unidade	Resultado	Especificação	Limite de quantificação	Método
Massa Específica (T Ambiente, 30°C)	kg/m ³	875	--	800	NBR7148
Massa Específica a 20°C	kg/m ³	881,4	850 - 900	807	NBR7148
50% Destilado	°C	301	--	35	NBR9619
85% Destilado	°C	320	--	35	NBR9619
Destilação ponto final	°C	327	--	35	NBR9619
Ponto de fulgor	°C	>110	Mín. 100,0	28	NBR14598
Enxofre total	mg/kg	< 25	Max. 50	25	NBR6577
Cinzas	% massa/ massa	< 0,02	0,020	0,02	NBR6294

Fonte: QUALITEX – Engenharia e serviços Ltda.

Verifica-se que os resultados das análises do biodiesel determinadas pelo laboratório QUALITEX – Engenharia e serviços Ltda., encontram-se dentro dos padrões exigidos pela ANP.

As misturas de diesel com biodiesel utilizadas nos ensaios foram: B20, B40, B60, B80 e B90. Essas misturas foram preparadas de acordo com a equação 01 (cálculo da quantidade de biodiesel a ser adicionada no diesel para formação das misturas). Foi feito um ensaio com o biodiesel puro ou B100 e outro com o diesel B5, denominado de CPD - Consumo Padrão Diesel, o qual servirá como ensaio testemunha para comparar com os ensaios das demais misturas.

3.2 Apresentação e forma de desenvolvimento da pesquisa

O desenvolvimento experimental foi realizado no LTG/UFCG (Laboratório de Termo Geração da Universidade Federal de Campina Grande-PB).

3.3 A Infraestrutura Física do LTG

O Laboratório de Termo Geração conta com um amplo espaço físico em uma área coberta de aproximadamente 150 m², dividido em 6 módulos assim distribuídos: uma sala destinada a instalação do grupo gerador e seus acessórios operacionais, uma sala de manuseio dos combustíveis e preparação das misturas, manutenção dos equipamentos e pequenos reparos, uma sala de controle do sistema, uma sala de estudos dos alunos de pós graduação, uma área para copa, uma garagem para guardar o reboque com os cilindros de gás, os tonéis de armazenamento do diesel e biodiesel, dentre outros materiais utilizados na pesquisa.

A Figura 3.1 apresenta uma vista lateral externa do LTG da UAEM/UAEE/UFCG.

Figura 3.1 – Vista lateral externa do LTG.



Fonte: Fotografada pelo autor.

Recentemente foi acrescida ao LTG, uma área construída com aproximadamente 300 m². A Figura 3.2 ilustra a vista lateral externa do prédio de expansão do LTG.

Figura 3.2 – Vista lateral externa do prédio de expansão do LTG.



Fonte: Fotografada pelo autor.

Apresenta-se na Figura 3.3 uma vista panorâmica do interior da sala de controle do sistema, onde é feita toda a monitoração, durante os ensaios. Nessa Figura, tem-se indicado em 1 – Fonte de alimentação, 2 - Sistema de aquisição de dados, 3 - Computadores de controle e armazenamento dos dados, 4 - Analisador de gases e 5 - Computador de controle do Sistema de Paralelismo Digital.

Figura 3.3 – Vista geral do interior da sala de controle dos ensaios de geração do LTG.



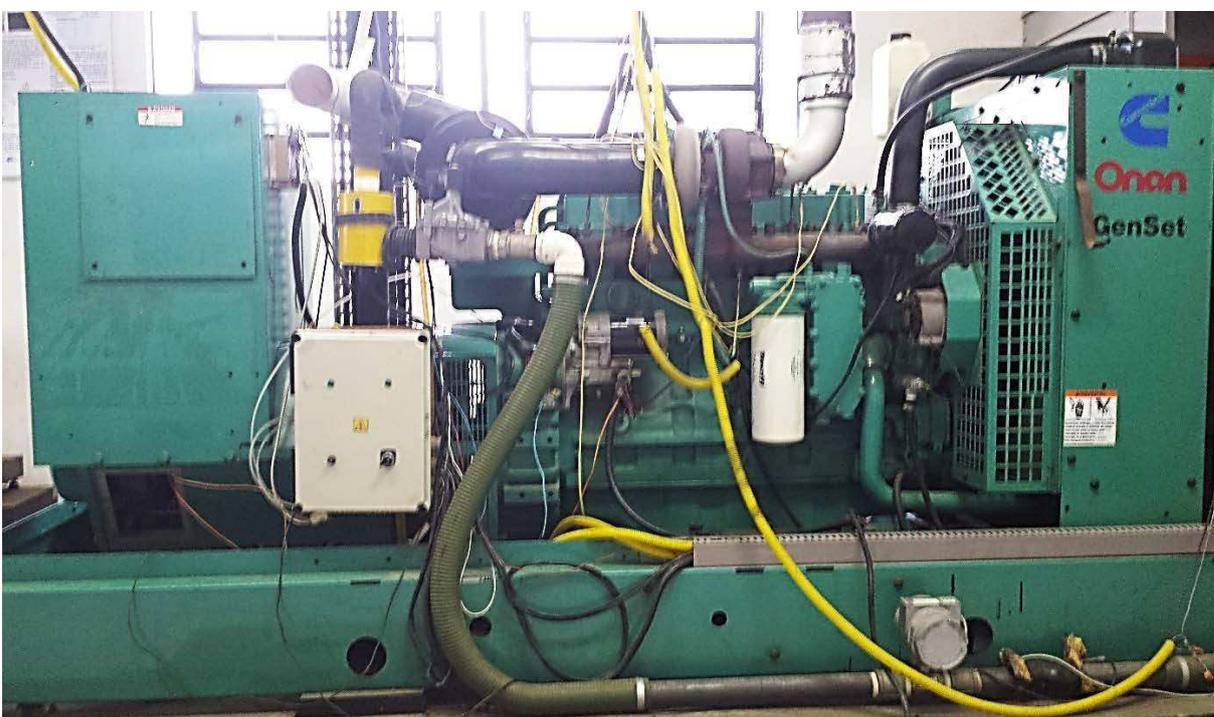
Fonte: Fotografada pelo autor.

3.4 Sistema, equipamentos e instrumentação

3.4.1 Descrição do sistema a ser ensaiado

O sistema ensaiado é constituído de um grupo gerador estacionário, com alternador da marca Gen Set e potência de 150 kW, que é acionado por motor Cummins de 6 cilindros em linha, Modelo 140 DGFK 1463, série C01T213734, turbinado e interculado, com cilindrada de 8,3 litros e potência Nominal de 206 kW a 1800 rpm. Este sistema pode ser visto na Figura 3.4

Figura 3.4 – Sistema a ser ensaiado.



Fonte: Fotografada pelo autor.

3.4.2 Instrumentação e sensores de monitoramento

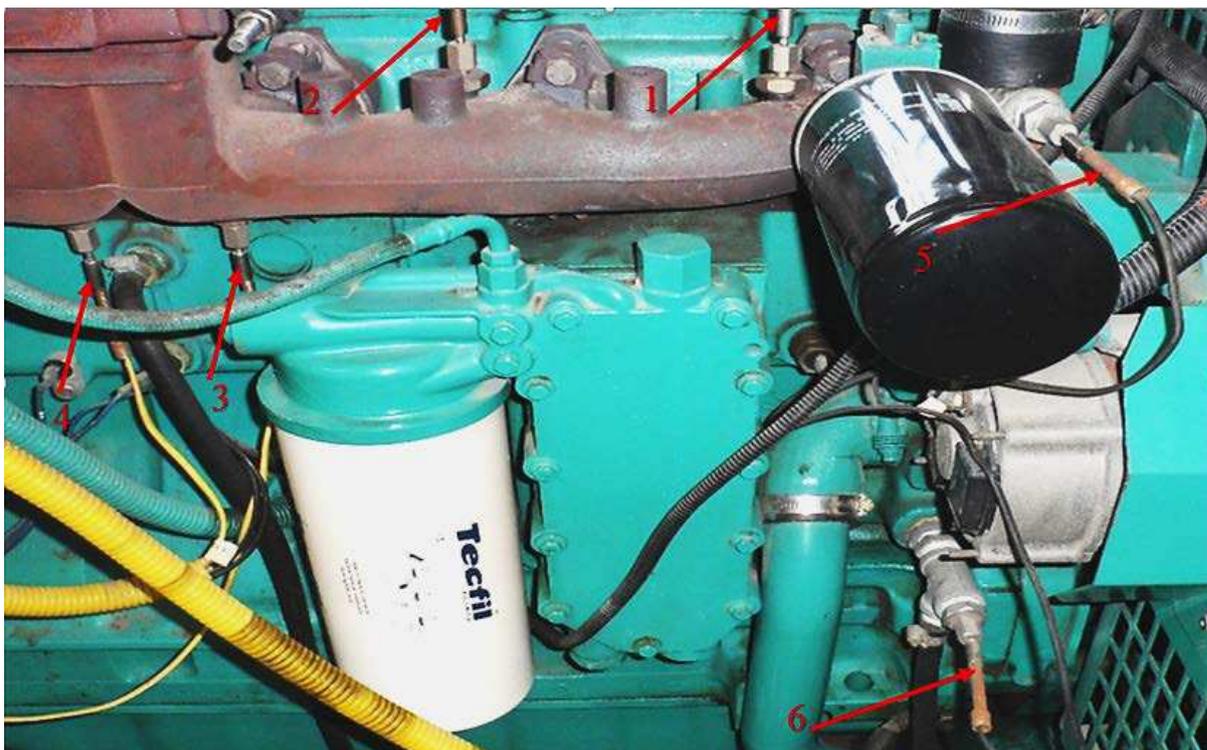
A monitoração e armazenamento dos dados do motor foram feitas através de um sistema de aquisição de dados desenvolvido no próprio Laboratório de Termo Geração, pelas equipes das Unidades Acadêmicas de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, respectivamente.

As temperaturas são medidas utilizando-se termopares do tipo K e J, a depender da faixa a ser medida. Estes termopares são conectados ao banco de aquisição de dados por meio de placas condicionadoras de sinais que fazem a interface para cada um dos sensores.

Existem seis sensores de temperatura do tipo K instalados no coletor de escapamento do motor em pontos estratégicos para coletar a temperatura em cada uma das saídas dos cilindros, dos quais 4 deles estão ilustrado na Figura 3.5.

Para monitorar o sistema de arrefecimento foram instalados dois termopares tipo J, os quais captam as temperaturas da água de entrada e saída do motor, (Figura 3.5). As setas numeradas de 1, 2, 3 e 4 indicam termopares do tipo “K” instalados no coletor de escapamento para medir a temperatura dos cilindros 1, 2, 3 e 4 respectivamente e as setas numeradas por 5 e 6, correspondem aos termopares do tipo “J”, instalados para medir a temperatura da água de entrada e de saída do motor respectivamente.

Figura 3.5 – Vista lateral do motor com foco nos sensores de temperatura do coletor de escapamento, da água de entrada e da água de saída do motor.



Fonte: Fotografada pelo autor.

Pode-se observar na Figura 3.6 que: a temperatura do óleo lubrificante foi monitorada por um termopar do tipo J, instalado no cárter do motor e indicado pela seta 5. Existe instalado no coletor de ar de alimentação dos cilindros, um termopar do tipo J indicado pela seta 2 para monitorar a temperatura da mistura de ar/gás que está sendo admitido pelos cilindros. A monitoração da temperatura do óleo combustível é realizada por um termopar do tipo J indicado pela seta 4 instalado dentro da mangueira de transporte do óleo combustível.

O sensor de temperatura da água do motor é indicado pela seta 6, o sensor de pressão de óleo lubrificante indicado pela seta 7, e o sensor de temperatura do óleo lubrificante do motor indicado pela seta 8 instalados originalmente pelo fabricante do motor, bem como o sensor de rotação do motor indicado pela seta 9.

Figura 3.6 – Vista lateral do motor, com foco nos termopares e nos transdutores de pressão instalados nessa região bem como os sensores instalados de fábrica.



Fonte: Fotografada pelo autor.

A temperatura do ar de entrada do motor foi monitorada por um termopar do tipo J indicado pela seta 1 e a pressão por um transdutor de pressão indicado pela seta 2, respectivamente instalados no duto de entrada do filtro de ar do motor, conforme pode ser visto na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Sensores para monitorar pressão e a temperatura do ar de entrada do motor.



Fonte: Fotografada pelo autor.

Um medidor de vazão foi instalado no duto de alimentação do gás para verificar a quantidade disponibilizada para o motor. A Figura 3.8 apresenta o medidor de vazão volumétrica de gás.

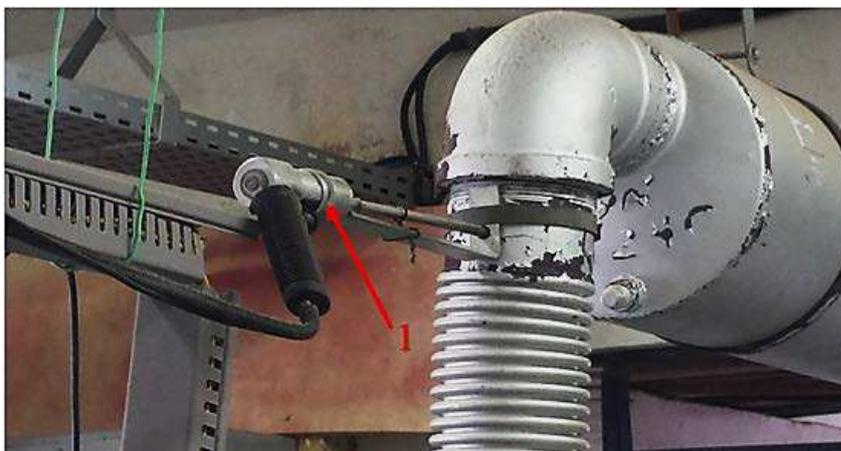
Figura 3.8 – Medidor de vazão de gás.



Fonte: Fotografada pelo autor.

As temperaturas das amostras de gases do escapamento foram monitoradas utilizando um sensor do tipo K da sonda do analisador de gases indicada pela seta 1, conforme apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Posicionamento da sonda do analisador de gases de combustão.



Fonte: Fotografada pelo autor.

Os gases da combustão, captados pela sonda, seguem para o analisador de gases onde são registrados as temperaturas e os percentuais de cada um dos gases componentes para análises posteriores. O analisador de gás utilizado foi o Kane 940, ilustrado na Figura 3.10.

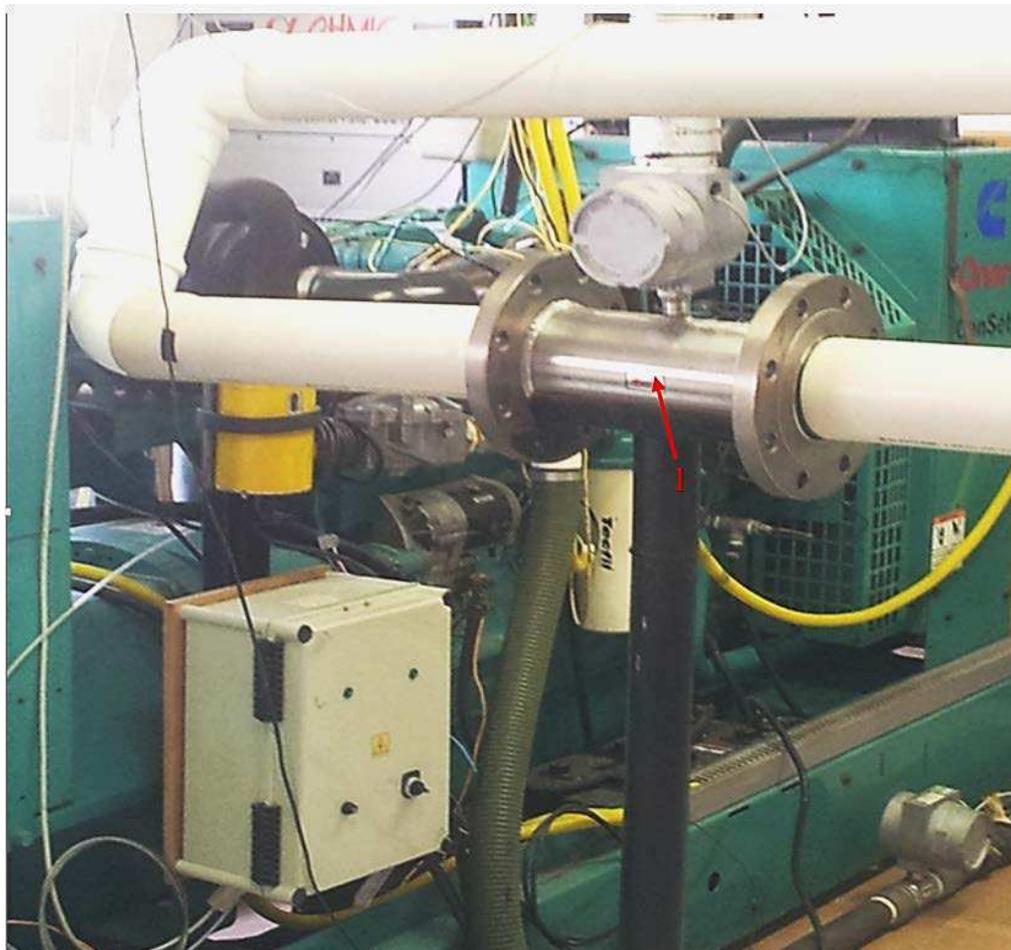
Figura 3.10 – Analisador de gases de combustão.



Fonte: Kane, Catálogo do medidor Kane 940

A vazão do ar de entrada do motor foi realizada por medidor de vazão volumétrica, instalado antes do filtro de ar do motor indicado pela seta 1, conforme Figura 3.11.

Figura 3.11 – Medidor de vazão do ar de entrada do motor.



Fonte: Fotografada pelo autor.

3.4.3 Sistema de aquisição e armazenamento de dados

Os sinais vindos dos sensores entram no sistema de aquisição de dados indicado na Figura 3.3 pela seta de número 2, e são captados em tempo real no formato de Tabela pelo software Matlab V_10, instalado no computador destinado ao controle do sistema onde são armazenados como arquivo .txt. Posteriormente são exportados para o Excel ou outro programa semelhante e analisados conforme o foco desejado. O Computador utilizado na monitoração do sistema e controle de aquisição de dados, pode ser visto na Figura 3.3, indicado pela seta de número 3.

Nesse mesmo computador, ficam também instalados vários outros programas de controle como: o programa de controle do banco de carga e o programa de controle da alimentação de gás para o motor.

3.4.4 Monitoramento e controle a distância do sistema de paralelismo digital

Um computador é utilizado para monitorar e comandar, via porta serial RS232 ou via internet RJ45 ou WI-FI, o sistema de paralelismo digital, que faz a interface entre o sistema de geração e o sistema elétrico da concessionária na rede local. Este sistema, além das funções de monitoração, proteção, comando e regulação de tensão, fornece também funções de controle de paralelismo, incluindo sincronização, divisão de carga e controle de paralelismo. Este computador pode ser visto na Figura 3.3, indicado pela seta de número 5.

A Figura 3.12 a seguir apresenta o SPD – (sistema de paralelismo digital), que possibilita a interligação do grupo gerador com a rede elétrica interna da Universidade.

Figura 3.12 – Sistema de paralelismo digital.



Fonte: Fotografada pelo autor.

O kit de gás instalado no motor é um BI-FUEL SYSTEM tensão 12/24 Vcc, comunicação com o PC por RS 232, placa controladora micro processada, fabricado por Eco-D Products – Argentina. A Figura 3.13 mostra este kit gás instalado no motor, onde seta 1 - Controle eletrônico, seta 2 - Motor de passo/controlador eletrônico de vazão, seta 3 – Eletroválvula 12Volts e seta 4 - Registro limitador de caudal

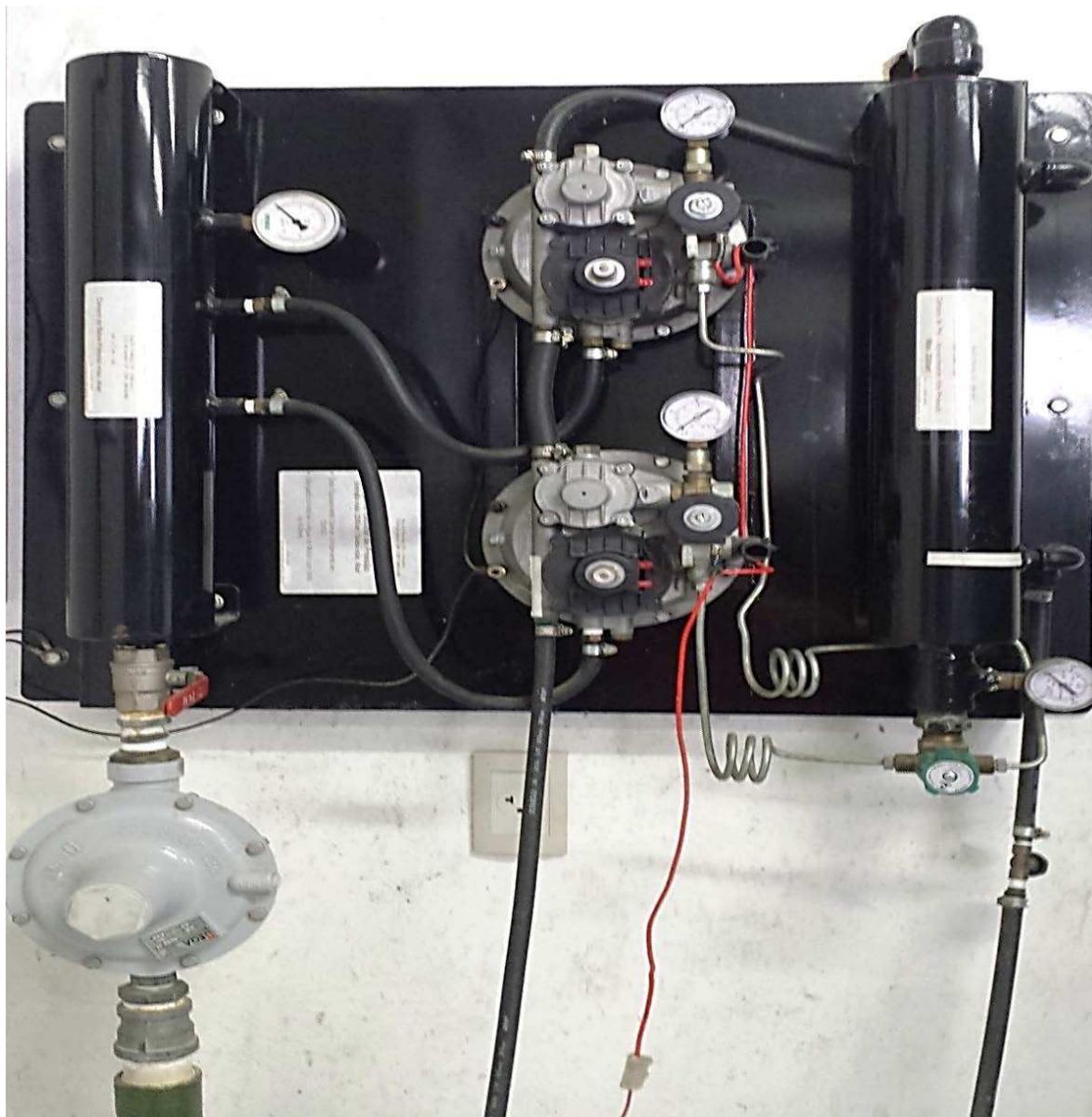
Figura 3.13 – Kit gás instalado no motor.



Fonte: Fotografada pelo autor.

O conjunto redutor de pressão de gás instalado no LTG, promove o abaixamento da pressão dos cilindros de 220 bar para 4 bar. Após atingir essa pressão, o gás entra em uma válvula redutora de pressão e sai a uma pressão constante de 0,02 bar para qualquer vazão de gás solicitada pelo motor. A montagem deste sistema pode ser observada na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Conjunto Redutor de Pressão, Entrada max. 220bar/Saída max. 4 bar.



Fonte: Fotografada pelo autor.

A interligação do sistema de abaixamento de pressão do gás com o sistema de armazenamento, composto por dez cilindros de 26 m³ cada, totalizando 260m³, se dá por intermédio de uma mangueira flexível especial com capacidade de pressão máxima de 4.800 psi. A saída para o kit gás se dá por uma mangueira spiroflex de 2" na qual é intercalado o medidor de vazão de gás.

Os dez cilindros estão devidamente acomodados sobre um reboque de dois eixos, projetado especialmente para esta finalidade, e confeccionado no NERG – Núcleo de energia. O reboque com os dez cilindros fixados em seu lastro pode ser observado na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Reboque de transporte e acondicionamento dos dez cilindros de gás.



Fonte: Fotografada pelo autor.

A medição de consumo da mistura diesel/biodiesel foi feita pesando essa mistura e encontrando a massa consumida por unidade de tempo. Para isto utilizou-se uma balança eletrônica aferida e com a menor divisão possível para a faixa de utilização. O LTG dispõe de uma balança com capacidade de 100 kg e precisão de 20g. A seguir, na Figura 3.16, pode ser visto o painel eletrônico da balança de precisão utilizada nos ensaios para medição da massa de mistura.

Figura 3.16 – Painel eletrônico da balança de precisão.



Fonte: Fotografada pelo autor.

3.5 Procedimentos e metodologias utilizadas nos experimentos

3.5.1 Realização dos ensaios

Inicialmente, a cada ensaio, é feito um check-in do sistema, quanto aos níveis dos fluidos do sistema de arrefecimento, do óleo lubrificante, da quantidade de diesel e biodiesel preparada para o ensaio, e da quantidade de gás disponibilizada.

Iniciado o ensaio aguarda-se até que o motor atinja a temperatura de regime, que ocorre quando a água de entrada do motor se encontra entre 70 a 75°C, ocasionando a abertura da válvula termostática. A partir deste ponto o motor está pronto para ser ensaiado com cargas.

Após o motor atingir o regime de trabalho, inicia-se a aplicação da potência correspondente ao ensaio que será realizado e espera-se um tempo de 5 a 10 minutos para que o mesmo entre em equilíbrio de operação.

Após a estabilização completa do sistema, inicia-se os ajustes do percentual de taxa de substituição de 85% de diesel por gás natural, para a carga de 40 kW. Obtidos os ajustes desejados, espera-se um tempo mínimo de 5 minutos até que o motor entre em equilíbrio com a nova condição de carga, assim como os equipamentos de medição. Após esses procedimentos são iniciadas as medições pré-definidas. Concluídos todos procedimentos para essa condição, sobe-se a carga para 60 kW, 80 kW, 100 kW e 120 kW, respectivamente, e em cada uma delas, são realizados os mesmos procedimentos pré-definidos. Após a realização do último ensaio, com 120 kW, a carga é reduzida gradativamente até o valor 0 (zero) e espera-se até que o motor abaixe sua temperatura.

3.5.2 Aquisição e armazenamento dos dados do motor

O sistema de aquisição de dados envia os sinais de todos os sensores para o programa Matlab V.10 e este gera um arquivo de banco de dados que é gravado continuamente. Este arquivo deve ser recuperado do sistema e armazenado em meio seguro imediatamente ao término do ensaio e antes mesmo que se desliguem os equipamentos, pois o mesmo é sobrescrito sempre que o sistema de aquisição de dados for inicializado. É a partir dos dados gravados nesse arquivo que faz-se as análises dos ensaios do motor.

3.5.3 Realização de ensaios com outra mistura

A realização de um próximo ensaio com outro percentual de biodiesel na mistura requer uma lavagem do sistema de alimentação do motor. Este procedimento é feito partindo-se o motor com o restante da mistura do teste anterior e aquecendo o motor até que seja atingido o regime de trabalho como forma de aproveitamento da sobra da mistura anterior. Após esse procedimento, alimenta-se o motor com a nova mistura a ser ensaiada e o deixa funcionando por um determinado período coletando-se o óleo de retorno da bomba em outro reservatório rotulado de ‘armazenamento das sobras de misturas’ para completar a limpeza do sistema até que não haja mais vestígio da mistura anterior. Completada esta etapa do processo, a mangueira do retorno é colocada de volta no reservatório de alimentação para que se possa iniciar a pesagem do combustível.

3.5.4 Preparações das misturas

Foram utilizados cinco tipos de misturas distintas nos ensaios e nomeadas em função do percentual de biodiesel contido nelas, quais sejam: B20, B40, B60, B80 e B100, onde a letra B significa (biodiesel) e o número após a letra representa o percentual de biodiesel na mistura.

A equação proposta para quantificar o biodiesel nas misturas e obter a mistura desejada foi a seguinte:

$$\Delta Vb = \frac{\frac{Vb(\%)}{100} (Vb^\circ + Vd^\circ) - Vb^\circ}{1 - \frac{Vb(\%)}{100}} \quad (3.1)$$

onde ΔVb é o volume de biodiesel a ser adicionado na atual mistura, para se obter a nova mistura; $Vb(\%)$ é o volume de biodiesel desejado na nova mistura; Vb° é o volume de biodiesel da atual mistura e Vd° é o volume de diesel da atual mistura, (Silva 2014).

3.5.5 – Metodologia para definição do custo total dos combustíveis utilizado no modo de operação dual em função da carga

A equação para calcular o preço total do combustível utilizado para os ensaios no modo dual (diesel, biodiesel e gás), foi desenvolvida levando-se em conta o preço em kg, praticado pelo mercado em 09 de junho de 2015.

Em função das peculiaridades da composição do diesel brasileiro que, por força da legislação, está sempre mudando, o percentual obrigatório do biodiesel adicionado ao diesel e o preço do biodiesel que varia entre a safra e a entressafra. O cálculo do custo mássico total foi calculado em reais (R\$).

Os preços em reais para os combustíveis pesquisados em Campina Grande, no dia 09 de junho de 2015 foram:

Diesel: R\$ 2,790/litro, considerando $\rho_{\text{diesel}} = 0,840$ kg/litro temos que o preço do kg de diesel é: R\$ 2,790/0,849 = R\$ 3,320/kg).

Biodiesel: R\$ 2,449/litro, considerando $\rho_{\text{bio}} = 0,881$ kg/litro temos que o preço do kg de biodiesel é: R\$ 2,449/0,881 = R\$ 2,780/kg).

Gás Natural: $2,400/\text{m}^3$, considerando $\rho_{\text{gás}} = 0,737 \text{ kg}/\text{m}^3$ temos que o preço do kg de gás natural é: $\text{R\$ } 2,400/0,737 = \text{R\$}3,260/\text{kg}$.

Considerando que o diesel utilizado, com relação a quantidade de biodiesel adicionada na BR distribuidora foi do tipo B5 (95% de diesel + 5% de biodiesel em volume), a seguinte equação é proposta para efetuar o cálculo do custo total dos combustíveis utilizados nos ensaios em modo de operação dual:

$$\text{Custo}_{\text{total}} = \text{CH}_{\text{BXX_YYkW}} \cdot [\text{Perc}_{\text{diesel}} \cdot \text{Preço}_{\text{diesel}} + \text{Perc}_{\text{bio}} \cdot \text{Preço}_{\text{bio}}] + \text{CH}_{\text{gás}} \cdot \text{Preço}_{\text{gás}}$$

Onde:

$\text{CH}_{\text{BXX_YYkW}}$ – Consumo em kg/h de biodiesel Bxx na Potência yykW;

$\text{CH}_{\text{gás}}$ – Consumo em kg/h de gás;

$\text{Perc}_{\text{diesel}}$ – Percentagem de óleo diesel;

Perc_{bio} – Percentagem de biodiesel;

$\text{Preço}_{\text{diesel}}$ – Preço do kg de óleo diesel;

$\text{Preço}_{\text{bio}}$ – Preço do kg de biodiesel;

$\text{Preço}_{\text{gás}}$ – Preço do kg de gás;

$\text{Custo}_{\text{total}}$ – Custo total do combustível utilizado em reais/hora;

Exemplificando a equação com a mistura B20 na potência de 40 kW (ver tabela do anexo 4), substituindo os valores por dados do ensaio realizado com essa condição, temos;

$$\begin{aligned} \text{Custo}_{\text{total}} &= \text{CH}_{\text{BXX_YYkW}} \cdot [\text{Perc}_{\text{diesel}} \cdot \text{Preço}_{\text{diesel}} + \text{Perc}_{\text{bio}} \cdot \text{Preço}_{\text{bio}}] + \text{CH}_{\text{gás}} \cdot \text{Preço}_{\text{gás}} \\ &= \text{CH}_{\text{B20_40kW}} \cdot [\text{Perc}_{\text{diesel}} \cdot \text{Preço}_{\text{diesel}} + \text{Perc}_{\text{bio}} \cdot \text{Preço}_{\text{bio}}] + \text{CH}_{\text{gás}} \cdot \text{Preço}_{\text{gás}} \\ &= 1,90 \cdot [0,85 \cdot 3,321 + 0,15 \cdot 2,780] + 13,31 \cdot 3,260 = 49,55 \text{ reais/hora} \end{aligned}$$

Desta forma o Custo total horário para gerar 40 kWh com o combustível B20 foi de R\$49,55/h, portanto a R\$1,2387 para cada kWh gerado nesta potência.

CAPÍTULO 4

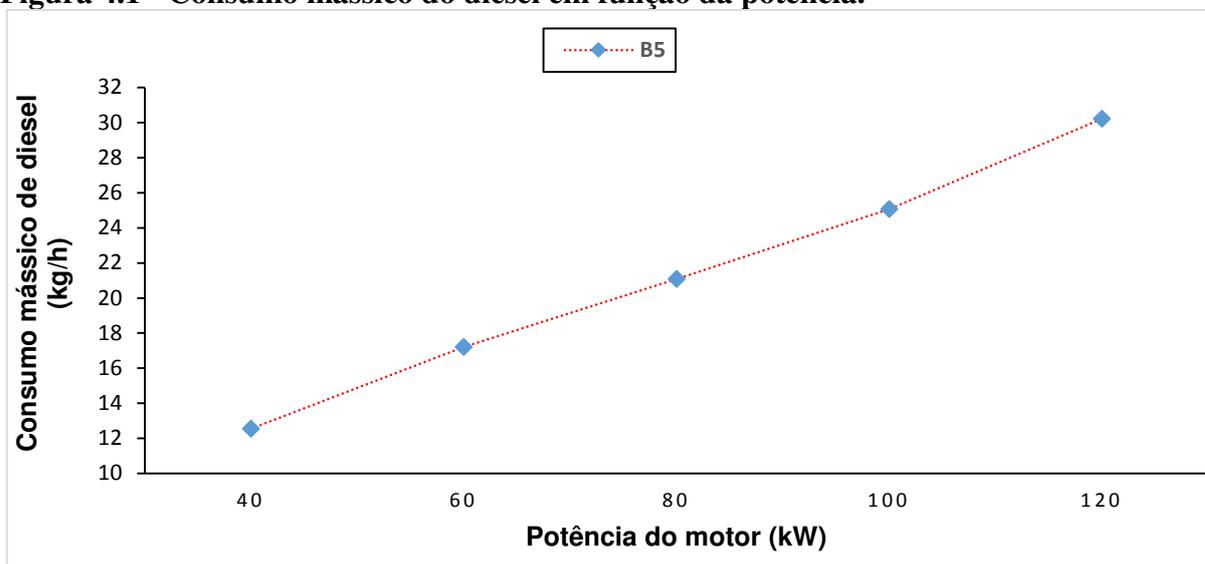
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão discutidos os resultados experimentais nos ensaios desta pesquisa, através de questionamentos e confrontos com as teorias apresentadas nas literaturas consultadas.

4.1 - Análises de consumo mássico dos combustíveis em função da potência

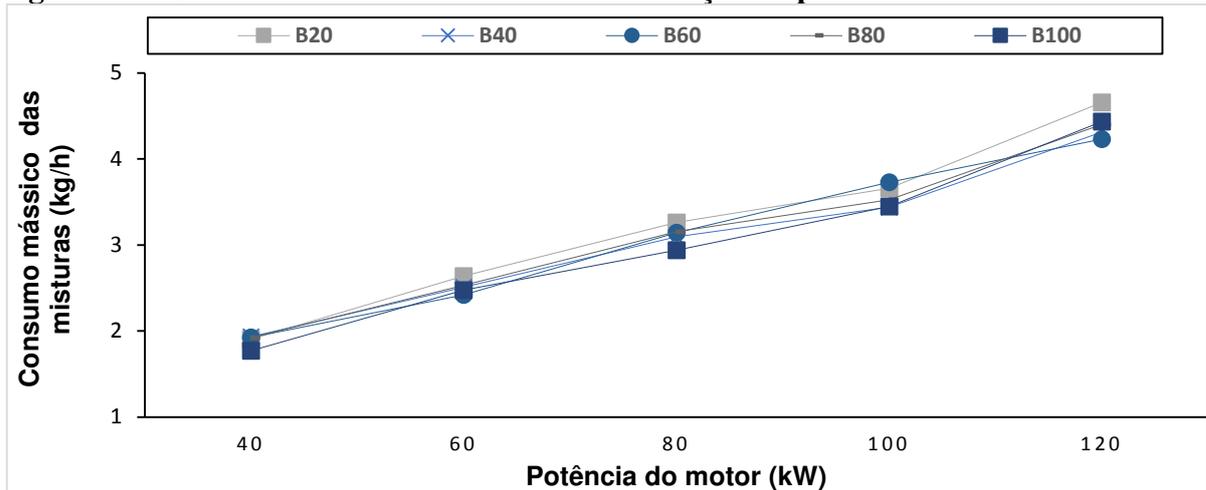
a) **Consumo mássico do diesel** - O consumo mássico do diesel em função da potência apresentado na Figura 4.1, cresceu quase que linearmente para todas as potências ensaiadas, de 40 kW até 120 kW. O aumento do consumo com a potência é esperado devido ao fato de maior liberação de energia no processo de combustão.

Figura 4.1 - Consumo mássico do diesel em função da potência.



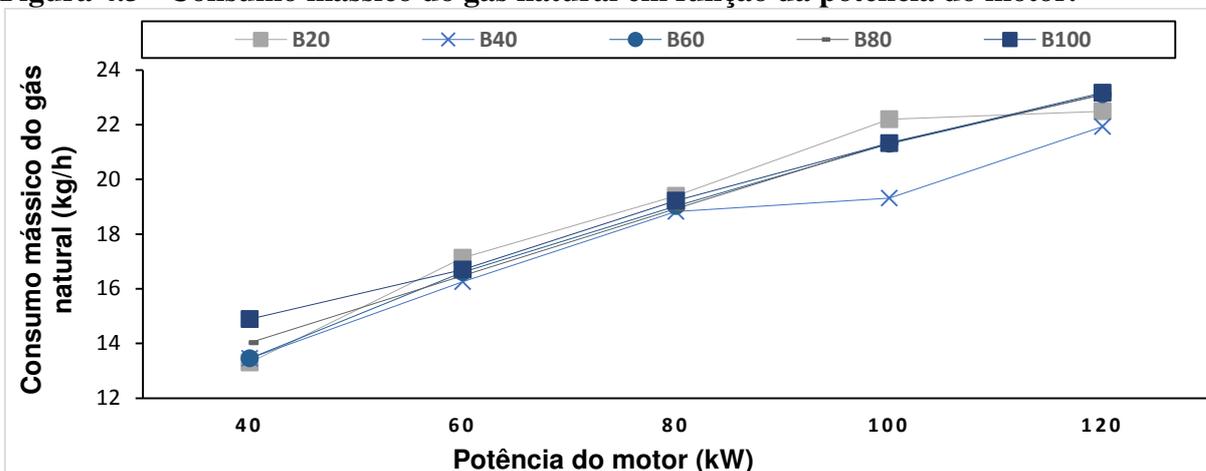
b) Consumo mássico das misturas - O consumo mássico das misturas, apresentado na Figura 4.2, cresceu quase que linearmente para as potências ensaiadas, de 40 kW até 120 kW, mantendo a mesma tendência verificada na Figura 4.1, apenas com valores menores, por participar apenas com 15% do combustível total utilizado.

Figura 4.2 - Consumo mássico das misturas em função da potência.



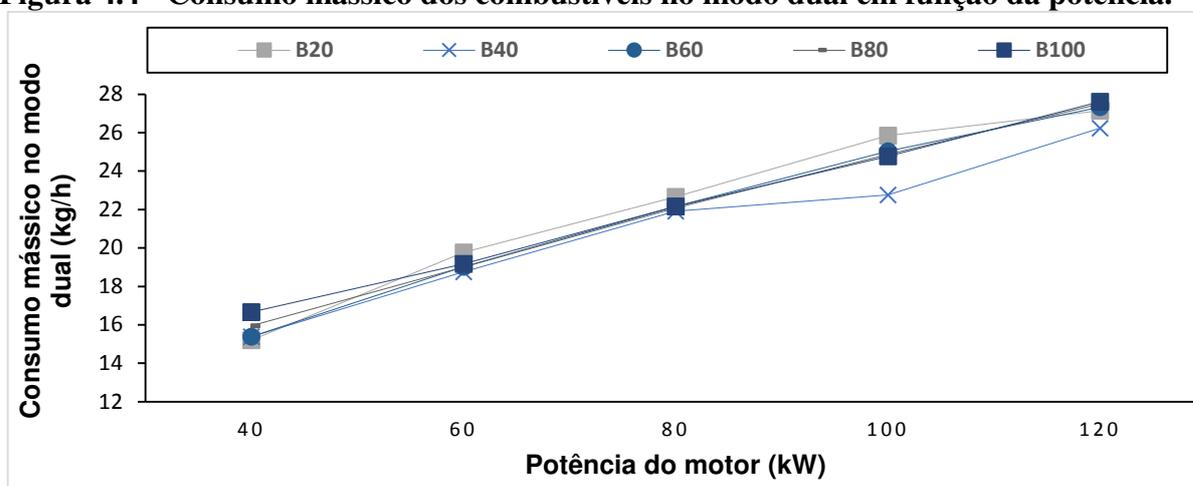
c) Consumo mássico de gás natural - O consumo mássico de gás natural nas misturas, apresentado na Figura 4.3, mostram que esta grandeza aumentou proporcionalmente com o aumento da potência, de maneira análoga ao que aconteceu com o consumo do diesel padrão na Figura 4.1, porém, por valores bem maiores, já que este foi fixado em aproximadamente 85% do consumo de diesel. Na potência de 100 kW, verificou-se que as misturas B20 e B40, apresentaram valores de consumo de gás natural um pouco diferentes dos valores registrados para as outras misturas.

Figura 4.3 - Consumo mássico do gás natural em função da potência do motor.



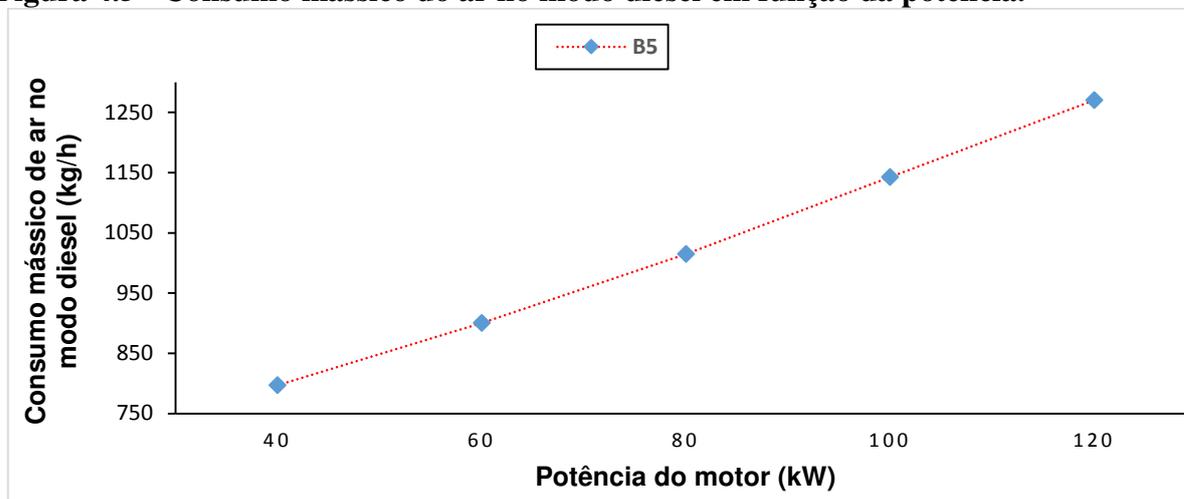
d) Consumo mássico dos combustíveis no modo dual - O comportamento das curvas do consumo mássico dos combustíveis no modo dual, (diesel, biodiesel e gás), apresentados na Figura 4.4, mostram que o consumo aumenta proporcionalmente com o aumento da potência, de maneira análoga ao que aconteceu com o consumo do gás natural e das misturas individualmente. No modo dual, o consumo mássico do gás representa, aproximadamente 85% do consumo total, e as misturas representam os outros 15%. Assim, como na Figura 4.3, na potência de 100 kW, verificou-se que as misturas B20 e B40, apresentaram valores de consumo um pouco diferentes dos valores registrados pelas outras misturas.

Figura 4.4 - Consumo mássico dos combustíveis no modo dual em função da potência.



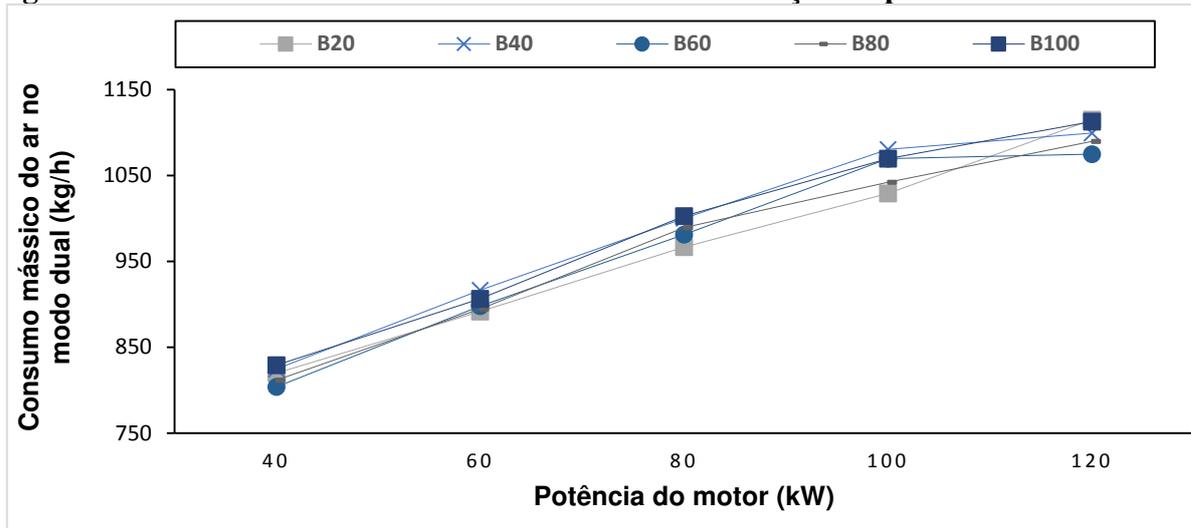
e) Consumo mássico do ar no modo diesel – A vazão mássica de ar para o interior do motor no modo diesel, cresce proporcionalmente com o aumento da potência, conforme pode observado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Consumo mássico do ar no modo diesel em função da potência.



f) **Consumo mássico do ar no modo dual** - A vazão mássica de ar para o interior do motor no modo dual, cresceu proporcionalmente com o aumento da potência até 100 kW, conforme pode observado na Figura 4.6. Para a potência de 120 kW, houve um crescimento muito pequeno se comparado com a potência de 100 kW.

Figura 4.6 - Consumo mássico do ar no modo dual em função da potência.

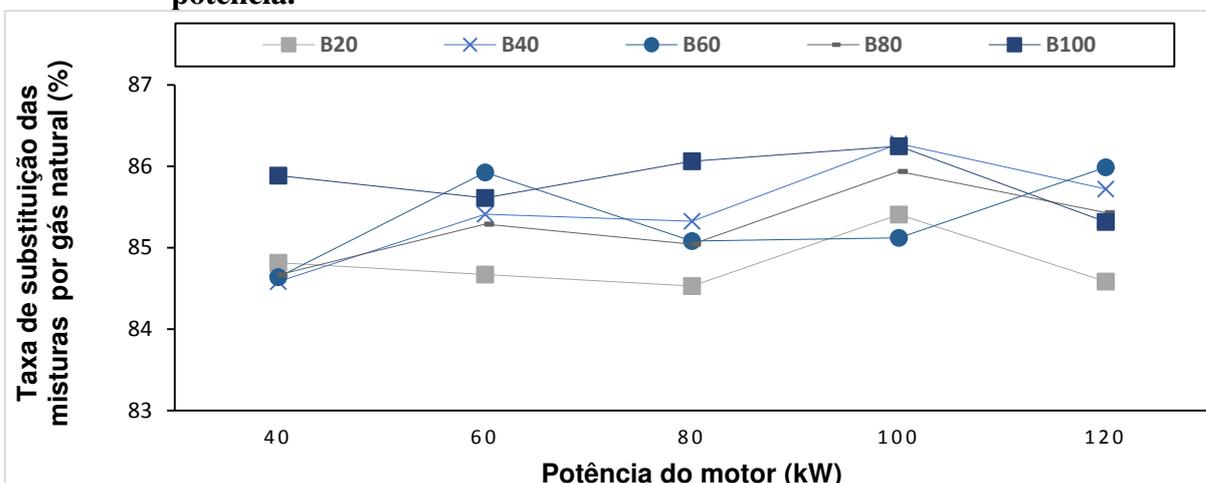


4.2 – Taxa de substituição das misturas por gás natural em função da potência (85%)

a) **Variação da taxa de substituição das misturas por gás natural em função da potência** -

A partir dos dados dos ensaios verificou-se uma variação na taxa de substituição entre a maior e a menor de 1,41%, o que se encontra em acordo com os percentuais de variação encontrados na pesquisa, $\pm 1\%$.

Figura 4.7 – Variação da taxa de substituição das misturas por gás natural em função da potência.



4.3 – Variação da rotação do motor RPM, em função da potência

a) **Variação da rotação do motor em função da potência** – O percentual de rotação do motor ficou em $\pm 1,0\%$ da rotação de trabalho (1800 rpm), ou seja, 36 rotações, sendo, 18 rotações para mais ou para menos. A Figura 4.8 apresenta os dados da rotação do motor nos ensaios correspondentes, onde observa-se uma variação mínima ao longo das potências considerando todas as misturas de 22 rotações. O valor aceito para essa variação é definido como DROOP que é a variação percentual entre as velocidades nominal em vazio e a final, com aplicação de 100% de carga e calculado da seguinte forma (Pereira, 2012).

$$\text{DROOP} = (\text{RPM}_{\text{nom}} - \text{RPM}_{\text{fin}}) / \text{RPM}_{\text{nom}}$$

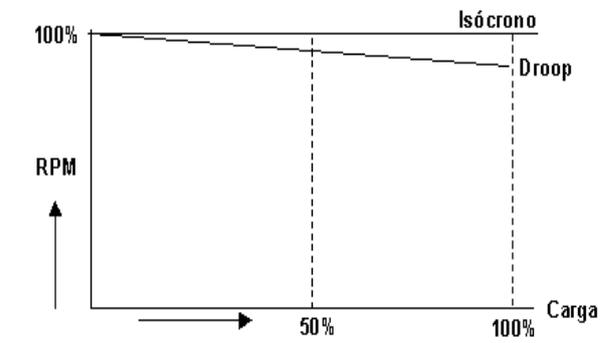
$$\text{Droop} = (1800 - 1740) / 1800 = 0,0333$$

Ou

3,3%

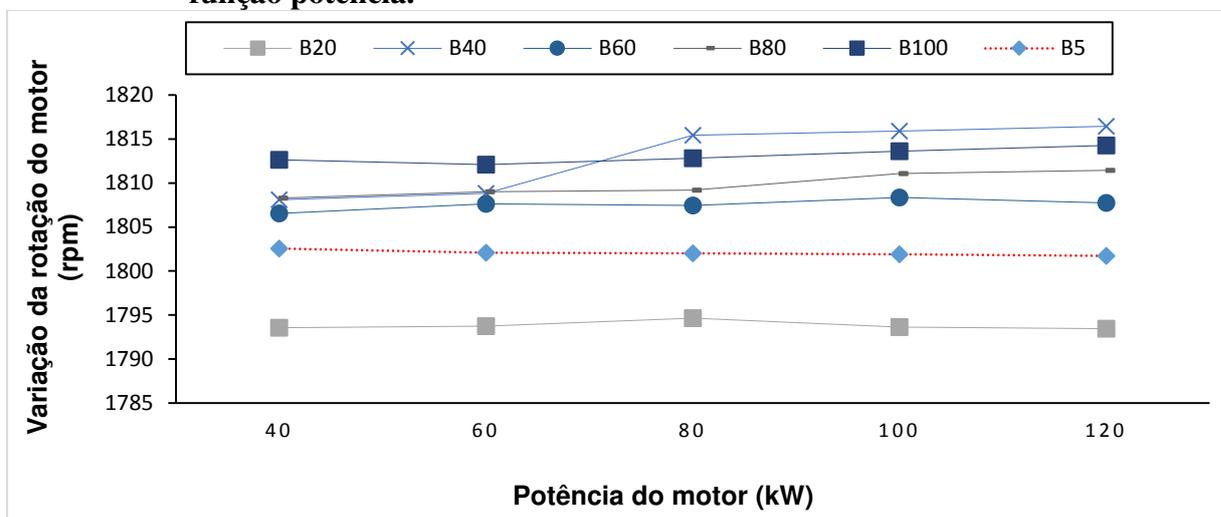
Rotação nominal em vazio: 1800 RPM

Com 100% de carga: 1740 RPM



Para os motores eletrônicos, não serão mais necessários governadores de rotações, uma vez que bastará programar a ECU do sistema de injeção eletrônica para operar em rotação constante sob qualquer condição de carga ou com o droop desejado.

Figura 4.8 – Variação da rotação do motor operando com o diesel e no modo dual, em função potência.

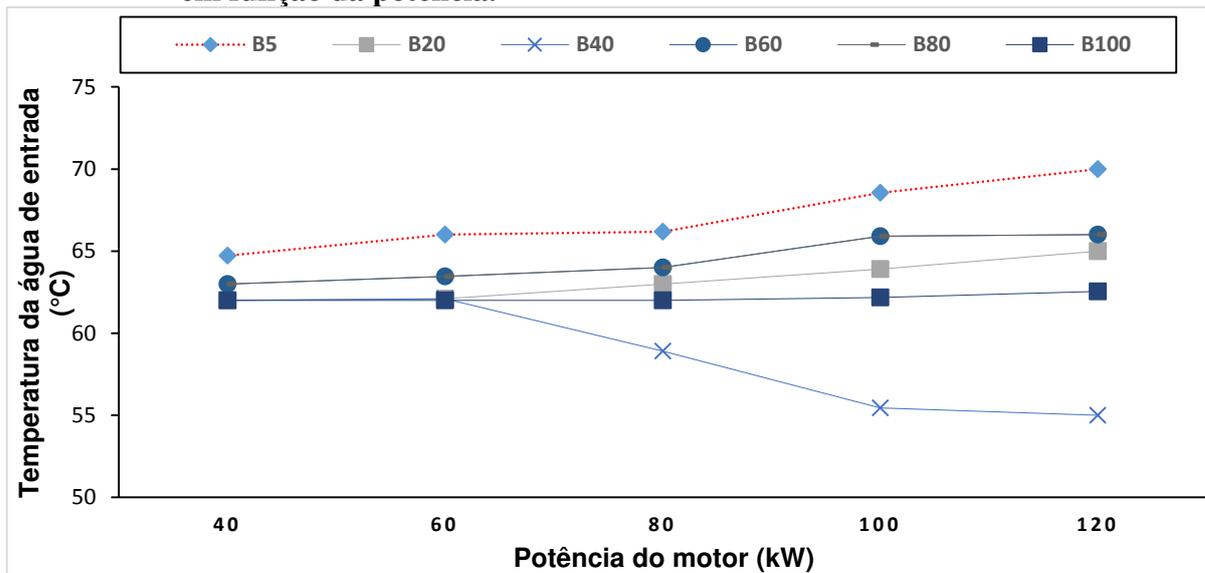


4.4 - Análises das temperaturas em função da potência

a) Temperatura da água na entrada do motor

A temperatura da água de entrada com o motor operando com diesel, mostrou uma leve tendência de aumento com o crescimento da potência, o que é um comportamento normal. Com o motor operando no modo dual, a temperatura da água de entrada, manteve-se praticamente constante e valores mais baixos do que no modo diesel, a exceção da mistura B40 que apresentou uma tendência de baixa a partir da potência de 60 kW, conforme pode ser observado na Figura 4.9 a seguir. A variação máxima operando com diesel foi de 5°C, já no modo dual foi de 4°C, com exceção da mistura B40 que variou em 11°C.

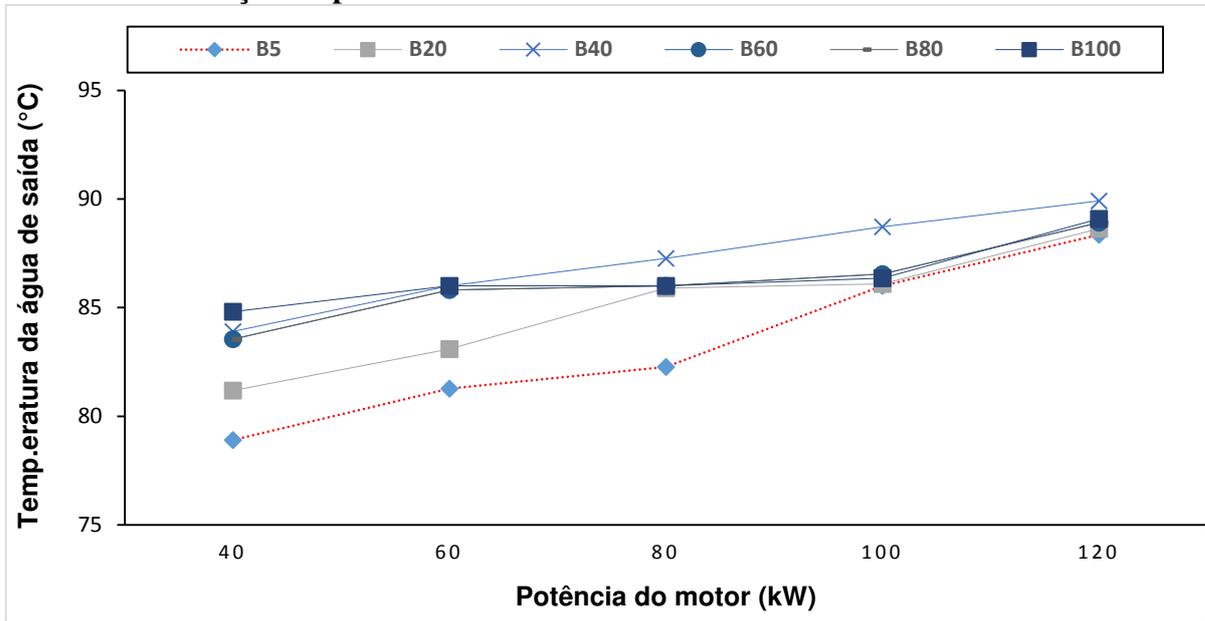
Figura 4.9 – Temperatura da água na entrada do motor para o modo diesel e modo dual em função da potência.



b) Temperatura da água na saída do motor

A temperatura da água de saída mostrou uma tendência de aumento com o aumento da potência, em ambos os modos de operação, diesel e dual, o que é um comportamento normal, porém, no modo de operação diesel, as temperaturas são sempre inferiores nas potências de 20 kW, 40 kW e 60 kW, enquanto que nas potências de 100 kW e 120 kW tendem a se igualar, conforme pode ser observado na Figura 4.10, a seguir. A variação máxima da temperatura para o motor operando com diesel foi de 9°C, e no modo dual foi de 9°C.

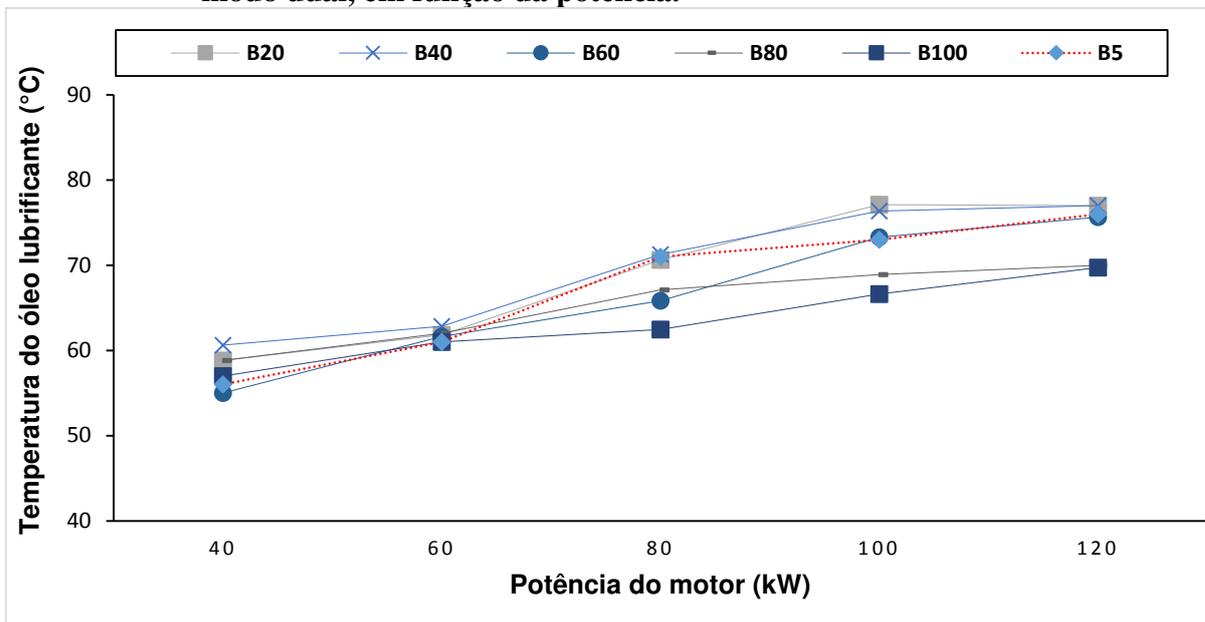
Figura 4.10 – Temperatura da água na saída do motor no modo diesel e no modo dual em função da potência.



c) Temperatura do óleo lubrificante no cárter do motor

A temperatura do óleo do motor cresce com o tempo de funcionamento e com o aumento da potência. A Figura 4.11 apresenta o comportamento desta grandeza em função da potência, onde se pode observar uma variação pequena entre os dois modos, chegando a 22°C, entre a maior e a menor potência.

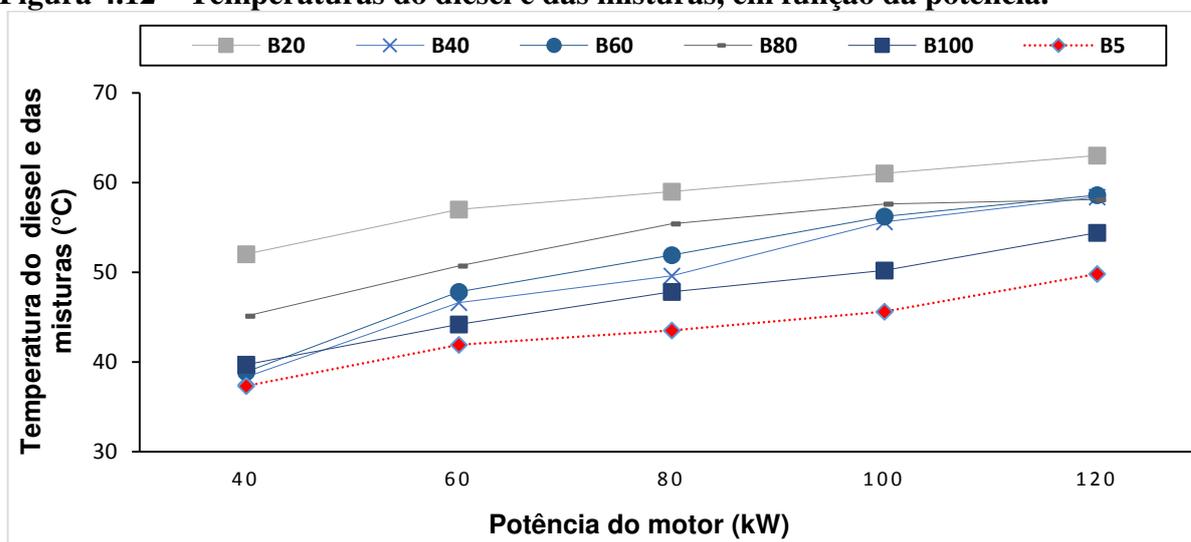
Figura 4.11 – Temperatura do óleo lubrificante no cárter do motor no modo diesel e no modo dual, em função da potência.



d) Temperatura das misturas

A temperatura do diesel e das misturas vista na Figura 4.12, aumentaram proporcionalmente com o crescimento da potência. Todas as misturas apresentaram valores superiores em todas as faixas de potência, da menor para a maior. Esse fato se deve em parte a metodologia utilizada nos ensaios, ou seja o reservatório do diesel continha um volume maior de combustível do que o reservatório das misturas que eram bem menores, por isso aquecia menos, já que recebia incremento de temperatura equivalente ao das misturas que eram preparadas em quantidade suficiente apenas para aquele ensaio. É um dado importante da monitoração, pois, segundo a literatura, a partir de um certo valor, cada grau a mais na temperatura do combustível, promove um delta de queda na potência. Assim, nunca deve-se permitir que o combustível fique muito quente. Combustível com temperatura acima de 52°C afetará a potência de saída do motor. Nunca permita que a temperatura exceda de 75°C com combustível destilado puro. Temperaturas altas de combustível também afetam sua viscosidade. Quando a viscosidade do combustível cai abaixo de 1,4 cSt, pode ocorrer avaria da bomba e bicos (CLEANDIESEL, 2013).

Figura 4.12 – Temperaturas do diesel e das misturas, em função da potência.

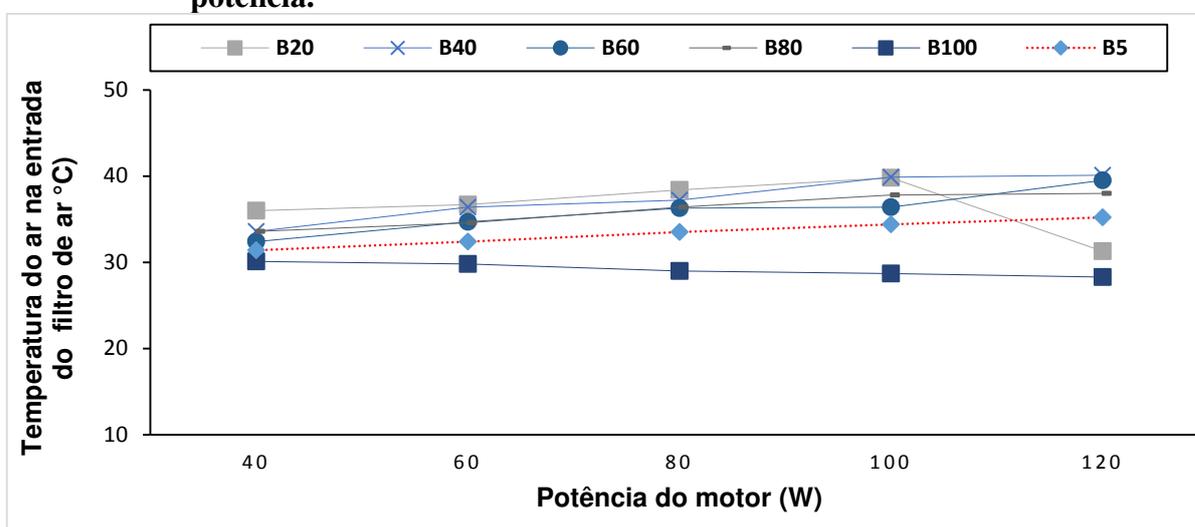


e) Temperatura do ar no filtro de admissão do motor

A temperatura de ar na entrada do filtro é uma variável que não se tem controle. Depende das condições climáticas do momento do teste e do tempo que o motor se encontra em funcionamento, já que a temperatura da sala varia também em função desses parâmetros.

Um outro fato a destacar, é que os ensaios foram realizados em dias e turnos diferentes, por isso não há como compará-los entre si. Outro fator que precisa ser levado em consideração, é o fato que o analisador de gases utiliza esses dados para cálculo de alguns parâmetros. Sabe-se também que se a temperatura do ar de entrada atingir valores elevados a quantidade de massa que entra no motor será menor e com isso poderá afetar um pouco a potência de saída no eixo. O ensaio com a mistura B20, apresentou valores de temperatura de entrada do ar menores que os outros testes em todas as potências (Figura 4,13). A máxima variação registrada entre a menor e maior potência foi de 10°C.

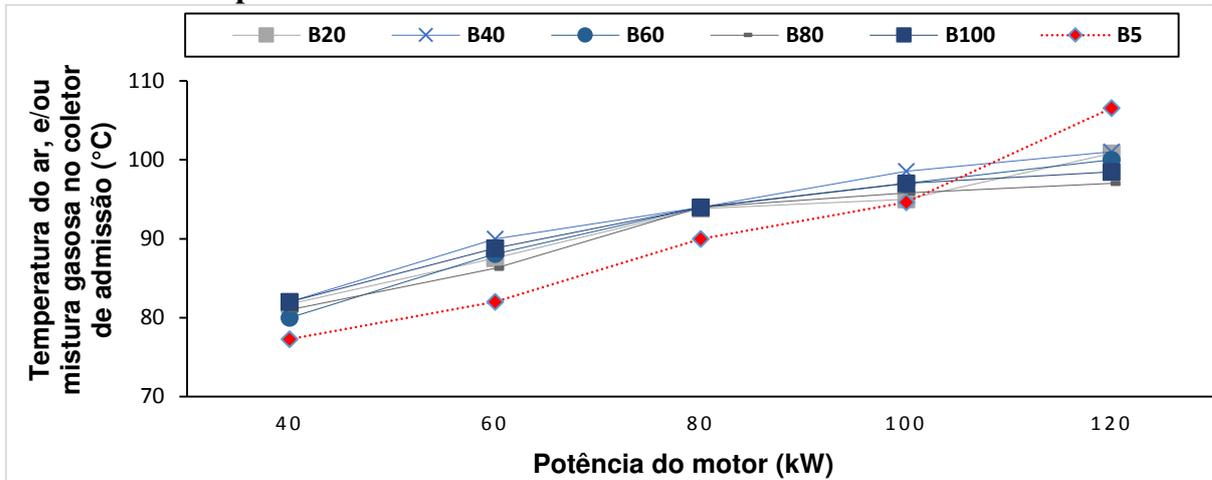
Figura 4.13 – Temperatura do ar de admissão na entrada do filtro de ar em função da potência.



f) Temperatura do ar no coletor de admissão do motor

A temperatura do ar ou mistura gasosa no coletor de admissão do motor é sempre elevada, uma vez que receberam calor quando passaram pela turbina de alimentação do motor, que trabalha em temperaturas bastante elevadas, por ser acionada pelos gases de exaustão em um de seus lados e pelo outro lado passa os gases de alimentação. O fato mais interessante mostrado na Figura 4.14 é que na potência de 100 kW, a temperatura no modo diesel, intercepta as temperaturas das misturas em modo dual e continua em tendência de crescimento, chegando na potência de 120 kW com valores relativamente mais altos, enquanto que nesta mesma potência a temperatura das misturas mostram valores relativamente menores e já apresentam tendência de queda, conforme pode ser visto na Figura 4.14. A máxima variação registrada para o modo diesel foi de 30°C e para o modo dual foi de 21°C.

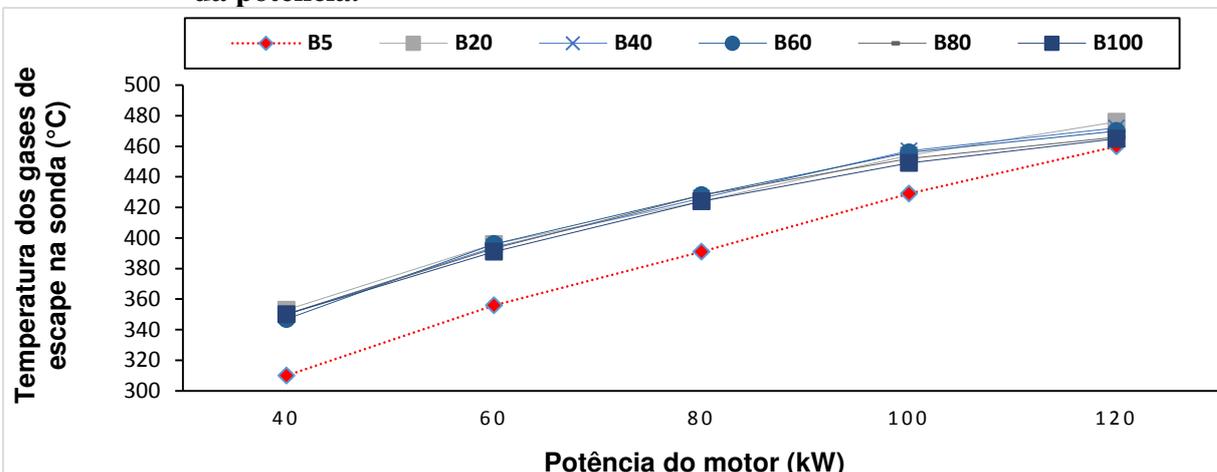
Figura 4.14 – Temperatura do ar ou mistura gasosa no coletor de admissão em função da potência.



g) Temperatura dos gases de escape na sonda de captação

A temperatura dos gases de escape é um parâmetro muito importante dos ensaios, uma vez que são utilizadas internamente pelo analisador de gases para calcular outros parâmetros. Pode-se verificar que ela aumenta tanto no modo diesel como no modo dual com o aumento da potência, o que é perfeitamente normal pelo aumento da quantidade de combustível queimado. Com o motor operando em modo dual, a temperatura é sempre maior do que no modo diesel normal em todas as faixas de potências, sendo que nas potências menores se encontram as maiores diferenças e nas potências maiores se encontram as menores diferenças. Assim a temperatura dos gases de escape diminui de amplitude (que é a diferença de temperatura entre os modos de operação) com o aumento da potência em todas as faixas, até assumirem valores muito próximos na potência de 120 kW, conforme pode ser observado na Figura 4.15.

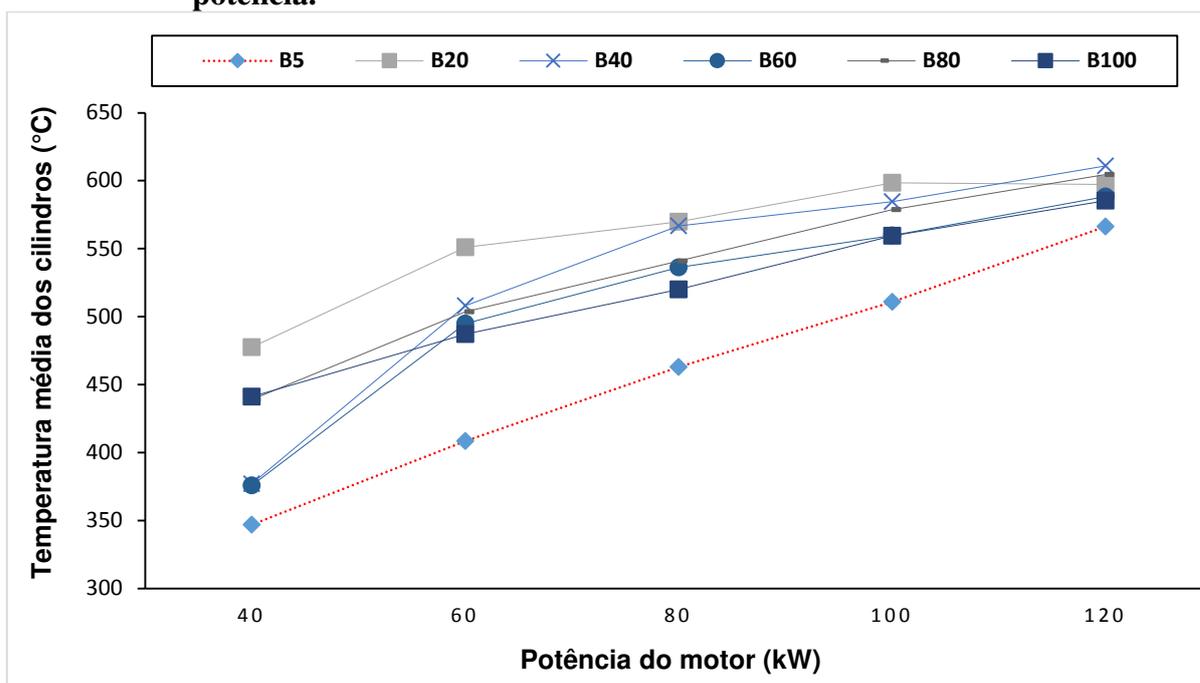
Figura 4.15 – Temperatura dos gases de escape do motor na sonda de captação em função da potência.



h) Temperatura média dos cilindros no coletor de escape

A temperatura dos cilindros foi medida no coletor de escape onde foram instalados os seis sensores de temperaturas do tipo K, alinhados com a saída das câmaras de combustão e o mais próximo possível para que os gases da combustão incidissem diretamente nos sensores. Foi utilizado a média dos seis sensores e apresentadas na Figura 4.16. Pode-se observar que o funcionamento no modo diesel apresenta temperaturas mais baixa em todas as potências analisadas, além de serem mais constante, ou seja, com menos variação. De maneira análoga, o funcionamento em modo dual apresenta uma maior temperatura na saída dos gases de combustão, em todas as faixas de potências analisadas. A maior variação no modo diesel foi de 144°C, no modo dual foi de 264°C.

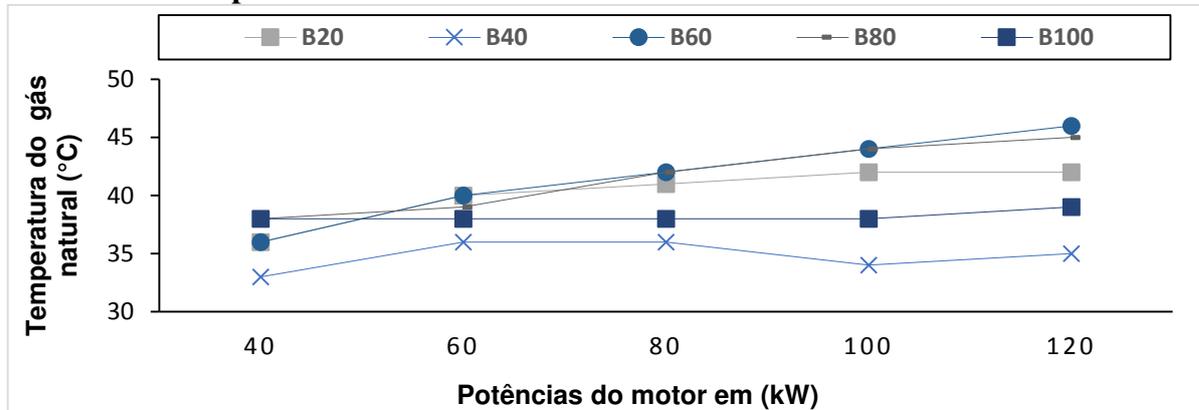
Figura 4.16 – Temperatura média dos cilindros no coletor de escape em função da potência.



i) Temperatura do gás natural antes do medidor de vazão

Essa temperatura é bastante importante, uma vez que será um dos parâmetros utilizados na transformação dos valores de vazão obtidos pelo medidor em m³/h para o cálculo dos valores mássicos em kg/h. Seu comportamento depende de uma série de fatores como, condições ambientes, vazão solicitada pelo motor, da quantidade de gás existente nos cilindros e da vazão de água quente para o trocador de calor do Sistema Redutor de Pressão, conforme Figura 4.17.

Figura 4.17 – Temperatura do gás natural antes do medidor de vazão de gás em função da potência.

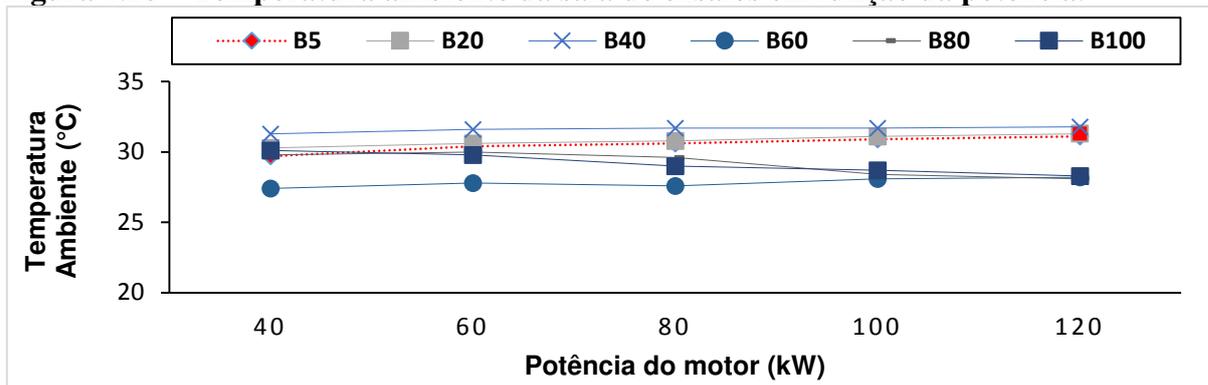


j) Temperatura ambiente na sala de ensaios

A temperatura do ar na sala do motor é uma variável que não se tem controle absoluto sobre ela; depende das condições climáticas do momento do teste e do tempo que o motor se encontra em funcionamento, já que a temperatura da sala varia. Um outro fato a destacar, é a influência das condições climáticas diárias como chuvas, umidade relativa, altas temperaturas, etc, já que os ensaios são realizados em dias e turnos diferentes; geralmente uma batelada de determinada mistura por dia. Em função disso não há como compará-las.

A Figura 4.18 apresenta um comportamento crescente da temperatura em ambos os modos com o aumento da potência, o que está absolutamente de acordo com o esperado, uma vez que o calor do motor irradiado para a sala não é totalmente retirado e com isso acontece uma elevação gradual da temperatura da sala com o aumento da carga do motor e com o tempo de funcionamento. A máxima variação registrada entre a menor e maior potência foi de 1,4°C para o modo diesel e 4,4°C para o modo dual.

Figura 4.18 – Temperatura ambiente da sala de ensaios em função da potência.

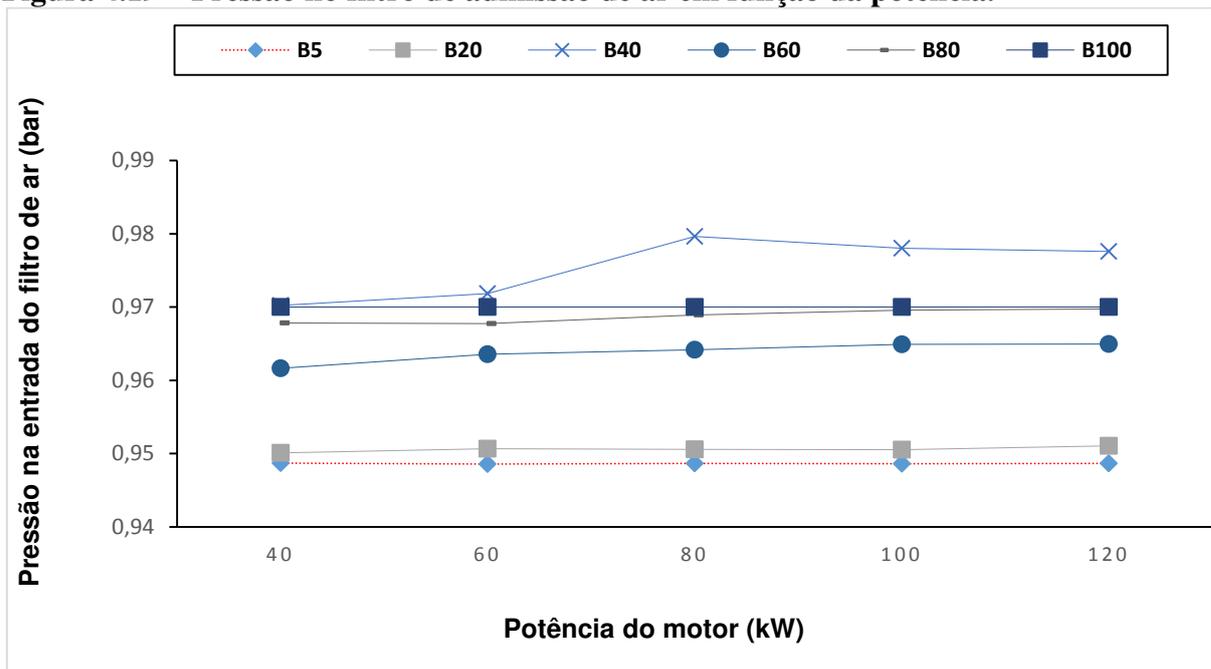


4.5 - Análises das pressões em função da potência

a) Pressão no filtro de admissão

A partir dos dados apresentados na Figura 4.19, pode-se observar de uma maneira global que em todas as faixas de potência ficaram abaixo de 1 bar. Isso se configura em função da depressão causada pela movimentação dos cilindros no interior de suas camisas, que é um padrão de funcionamento dos motores. Observando apenas o comportamento no modo diesel, percebe-se que este apresenta uma pressão menor que a pressão apresentada para o modo dual em todas as potências. Esse comportamento se explica em parte devido a entrada de gás ter sido feita pelo filtro de ar, na linha do ar de entrada, fazendo com que a pressão nesse modo de operação caísse menos do que no modo diesel.

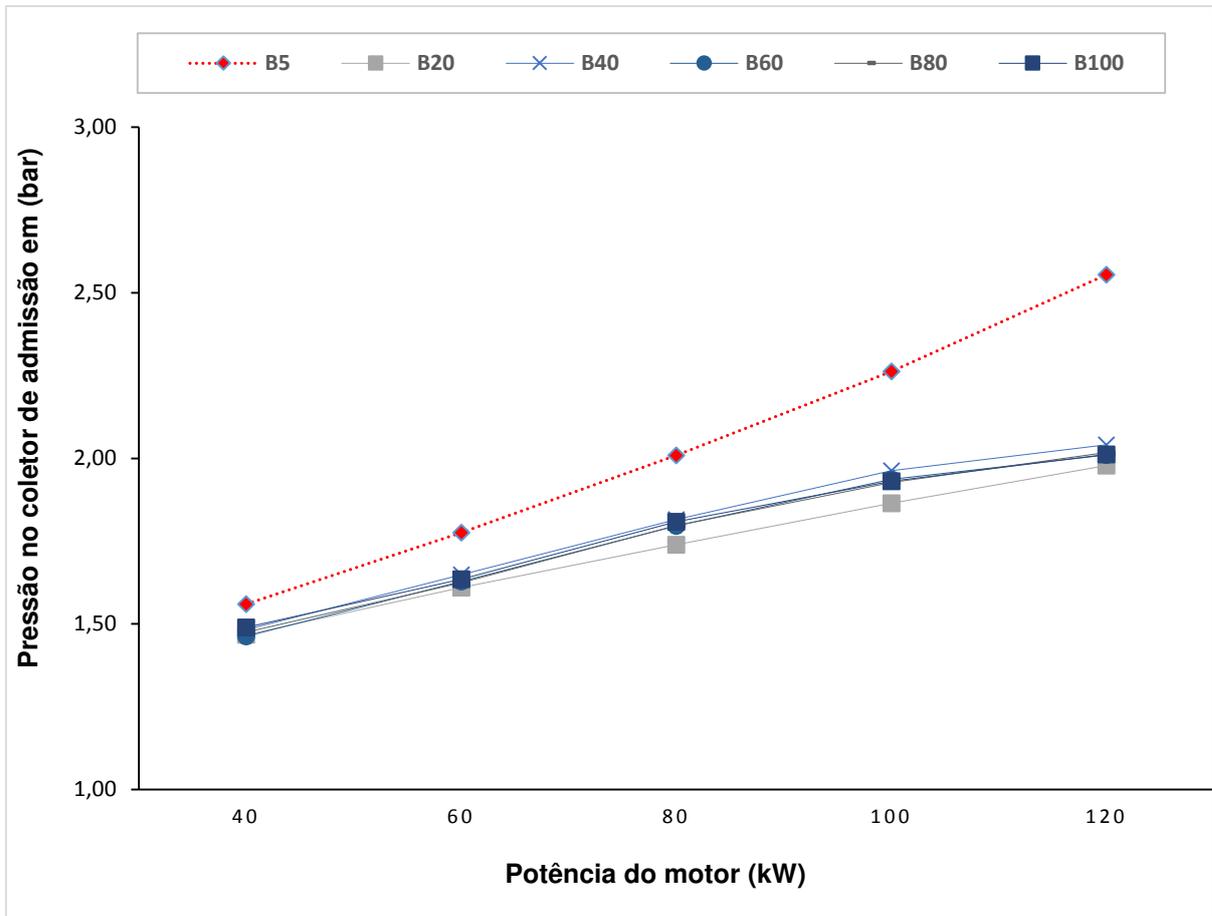
Figura 4.19 – Pressão no filtro de admissão de ar em função da potência.



b) Pressão no coletor de admissão

A partir dos dados apresentados na Figura 4.20, pode-se observar que em todas as faixas de potência o comportamento da pressão no coletor de admissão operando no modo diesel apresentou valores maiores que os do modo dual. Esse comportamento se explica em parte devido a entrada de gás ter sido feita pelo filtro de ar, fazendo com que a vazão de ar para o motor nesse modo de operação fosse menor do que no modo diesel.

Figura 4.20 – Pressão no coletor de admissão em função da carga.

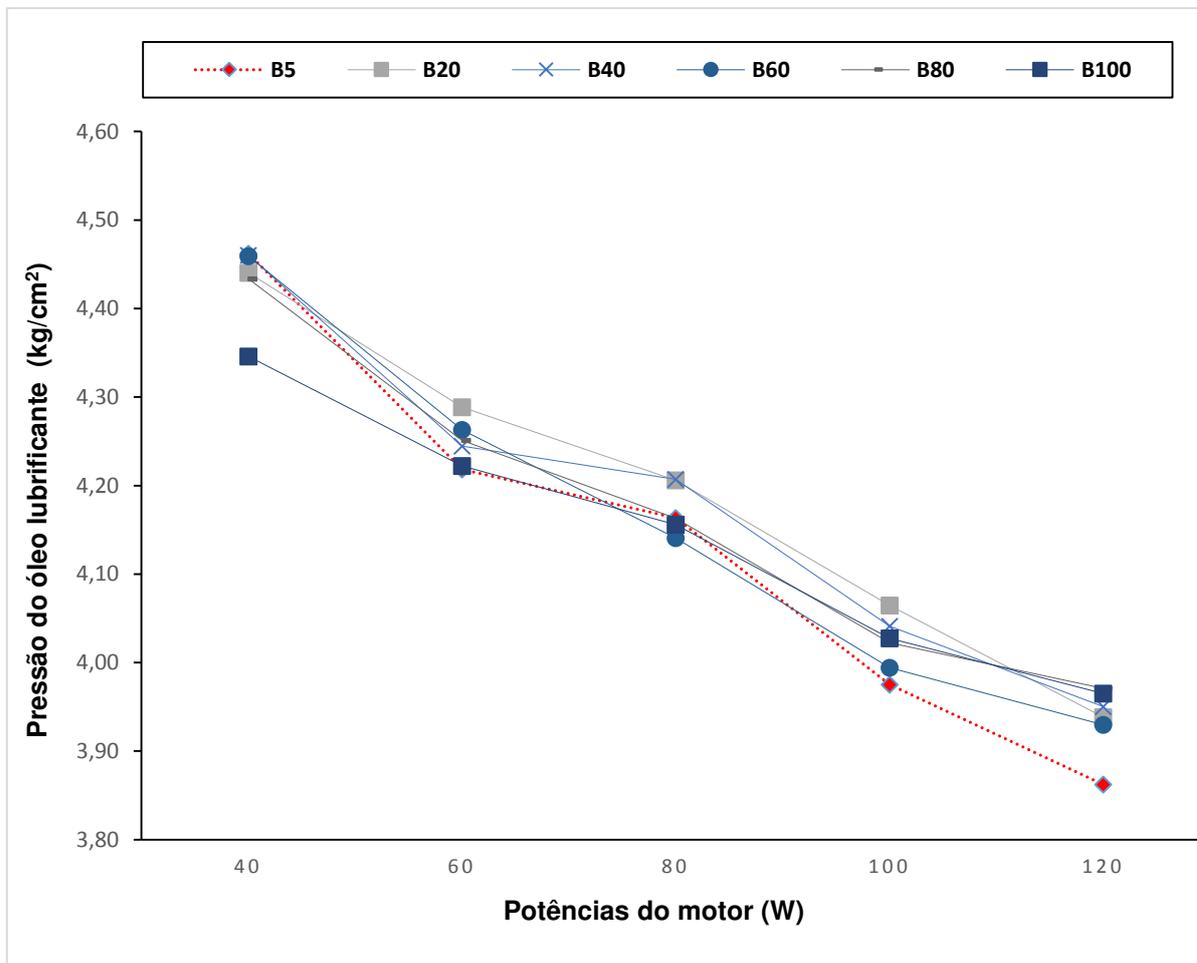


c) Pressão do óleo lubrificante do motor

A pressão de óleo do motor é um dos parâmetros mais importante do sistema, uma vez que é um dos responsáveis por manter o sistema funcionando e/ou desligar o motor por baixa pressão de óleo, como forma de preservar o sistema de danos permanente.

A pressão do óleo lubrificante visto na Figura 4.21, inicia com valores mais altos, pelo fato do óleo se encontrar com temperatura mais baixa, portanto com densidade maior, e cai com o aumento da potência, exatamente pelo aumento da temperatura deste, fazendo com que sua densidade relativa diminua, conseqüentemente a pressão também diminui. A variação no modo dual foi de $0,53 \text{ kg/cm}^2$ e de $0,60 \text{ kg/cm}^2$ no modo diesel.

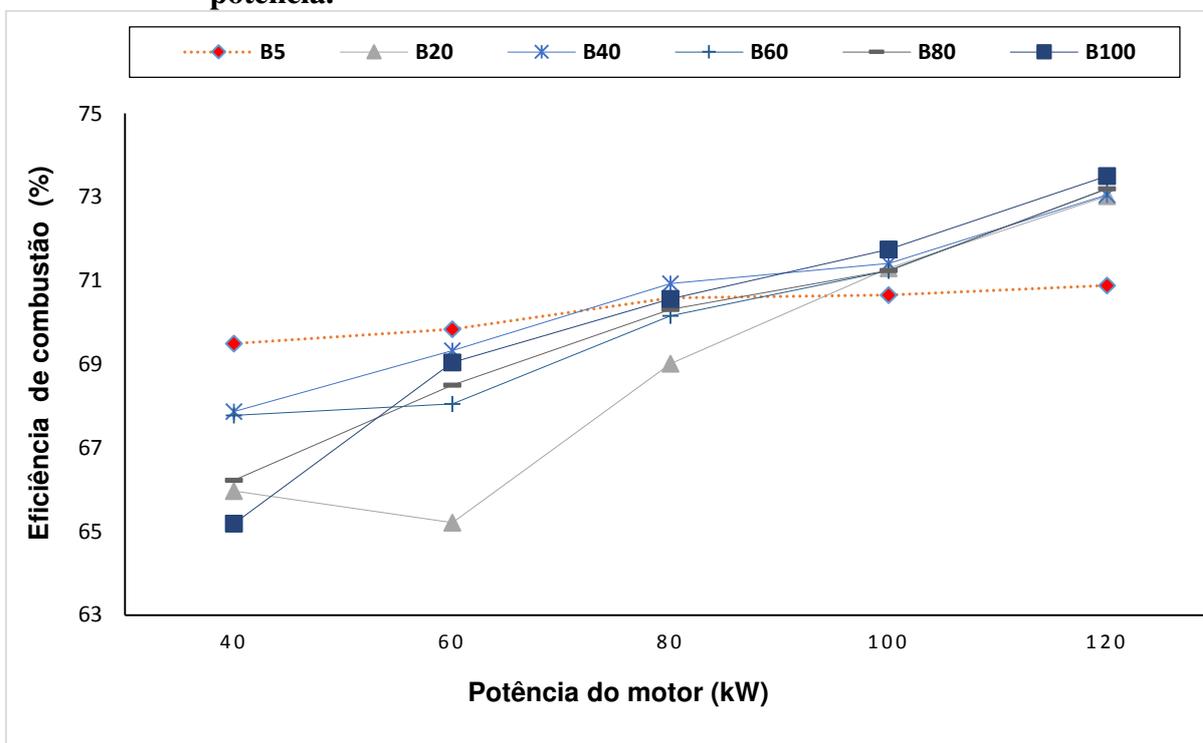
Figura 4.21 – Pressão do óleo lubrificante em função da potência.



4.6 - Análise da eficiência de combustão em função da potência

A eficiência da combustão cresceu rapidamente com o aumento da potência, para as misturas, a exceção da mistura B20 que, nas potências de 60 kW e de 80 kW, apresentaram pontos diferentes da tendência do comportamento das outras misturas, tendo variado de 8,32% entre a maior e a menor potência. A operação em modo diesel iniciou com valores maiores do que os valores das misturas nas potências de menores de 20 kW e 40 kW, interceptando estes valores na potência de 80 kW e atingindo valores menores nas potências menores de 100 kW e 120 kW, obtendo uma variação entre a maior e a menor da ordem de 1,49%.

Figura 4.22 – Eficiência de combustão no modo diesel e no modo dual em função da potência.



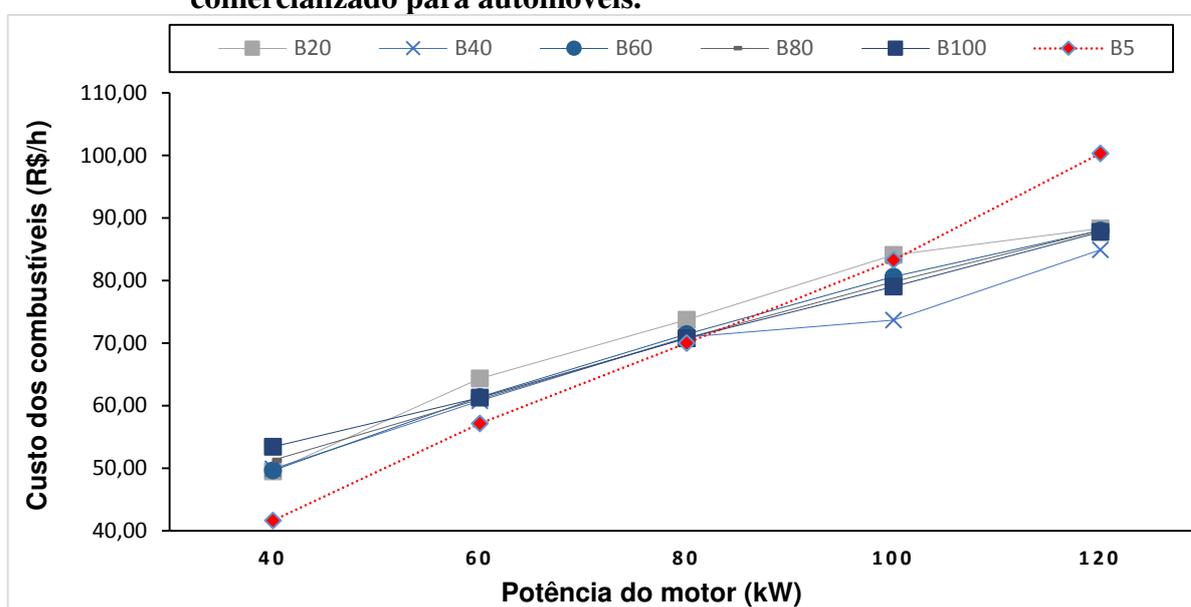
O comportamento das curvas de eficiência no modo diesel e no modo dual em função das potências é apresentado na Figura 4.22. No modo dual, para todas as faixas de potências (40 a 120 kW) ensaiadas, a exceção da curva da mistura B20 em 60 kW e B20 em 80 kW, apresentaram um comportamento de crescimento da eficiência com o aumento da potência, de acordo com o esperado para o motor de combustão interno e ciclo Otto. A curva do consumo padrão diesel - CPD ou B5, apresentou um crescimento pequeno com o aumento da potência e com relação as outras misturas, apresentou uma eficiência um pouco maior das nas potências de 40 kW e 60 kW, muito próximo em 80 kW e um pouco menor das nas potências de 100 kW e 1200 kW. Podemos resumir que o comportamento das curvas de mistura se invertem com o aumento da potência.

A partir das análises dos dados dos parâmetros de funcionamento do motor como: consumo, potência, temperaturas, pressões e eficiência de combustão apresentados nas Figuras, 4.1 a 4.22, verifica-se que não houve alteração significativa quanto ao funcionamento do motor diesel no modo dual, portanto, podemos concluir que é perfeitamente viável a utilização do modo de operação dual, (15% diesel/biodiesel e 85% gás natural), para qualquer que seja o regime de carga e/ou de mistura de diesel/biodiesel utilizada com o gás natural.

4.7 – Análise da viabilidade econômica em função dos custos com os combustíveis para gerar energia elétrica no modo diesel e no modo dual em função da potência.

A Figura 4.23 apresenta os custos com os combustíveis na geração de energia elétrica no modo diesel e, no modo dual, em função da potência com os valores em reais praticados nos postos de distribuição para o gás natural comprimido.

Figura 4.23 – Custos com combustíveis na geração de energia elétrica no modo diesel e no modo dual em função da potência, utilizando o gás natural pós comprimido comercializado para automóveis.



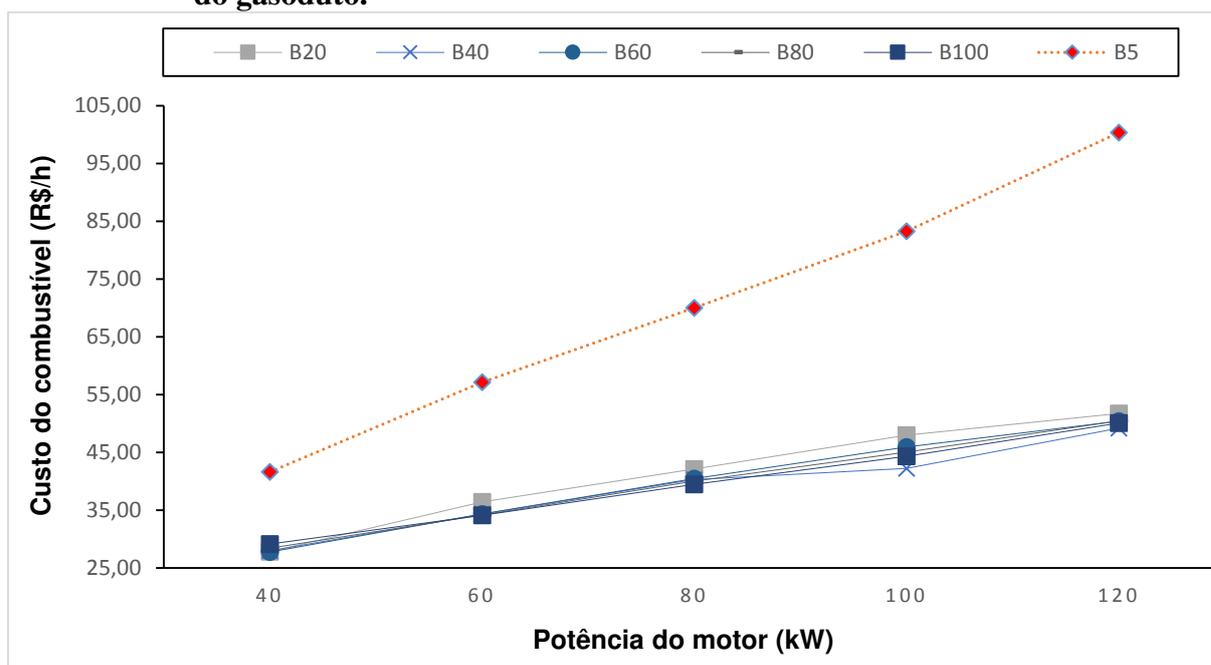
Nota: Custos dos combustíveis calculados com os preços praticados nos postos de distribuição.

O custo em reais no modo diesel (B5) cresceu com o aumento da potência em todas as potências ensaiadas. Manteve-se menor em relação ao modo dual nas potências de 40 kW e de 60 kW, mantendo-se aproximadamente igual na potência de 80 kW e, a partir da potência de 100 kW, já apresentou consumo maior, sendo que na potência de 120 kW já se percebe um aumento considerável, da ordem de 12,5%.

Com relação ao modo de operação dual, tem-se que o comportamento dos custos também apresentou crescimento com o aumento da potência em todas as potências testadas, porém menos acentuado do que no modo diesel. Inicialmente, nas potências menores, de 40 kW e de 60 kW, os custos se mostraram bem maiores no modo dual, cruzando por valores aproximadamente iguais na potência de 80 kW, caindo um pouco na potência de 100 kW e, finalmente, na potência de 120 kW cai significativamente com relação ao modo de operação diesel, cujo valor já foi informado anteriormente.

Vale salientar que a mistura B20, manteve a mesma tendência das outras misturas nas potências de 40 kW e 120 kW, sendo que nas potências de 60 kW, 80 kW e 100 kW apresentou custo maior que no modo diesel. Percebe-se também que a mistura B40 na potência de 100 kW apresentou um comportamento diferente das demais misturas, caindo o custo de forma não coerente com os valores encontrados para as outras misturas. Pode-se perceber, a partir da Figura 4.24, que do ponto de vista dos custos financeiros unicamente com os combustíveis, adquiridos diretamente nos postos de comercialização, onde o gás natural é vendido na forma comprimida em cilindros, a geração de energia elétrica em modo dual é viável para todas as misturas na potência de 120 kW, sendo praticamente indiferente na potência de 100 kW e totalmente inviável nas outras potências.

Figura 4.24 – Análise dos custos com combustíveis na geração de energia elétrica, no modo diesel e no modo dual em função da potência, utilizando o gás natural direto do gasoduto.



Nota: Custos dos combustíveis calculados com os preços do diesel e do biodiesel praticados nos postos de comercialização, porém o gás natural comprado a partir do gasoduto por distribuição direta, que reduz em no mínimo 50% do preço praticado pelos postos de distribuição.

A partir da comparação com os dados plotados na Figura 4.9, percebe-se realmente a diferença dos custos com combustíveis na geração de energia elétrica utilizando o gás natural com relação ao óleo diesel. Some-se a isso os outros custos oriundos do transporte, armazenamento, manuseio, etc., necessários na utilização do óleo diesel e, então, quando computados os outros custos financeiros envolvidos, a diferença é bastante significativa.

A partir das análises dos dados apresentados nas Figuras, 4.23 e 4.24, com relação a viabilidade econômica, pode-se concluir que, é perfeitamente viável a utilização do modo de operação dual (15% diesel/biodiesel e 85% gás natural), para qualquer que seja o regime de carga e/ou de mistura de diesel/biodiesel utilizada com o gás natural.

4.8 - Análises das emissões em função da potência

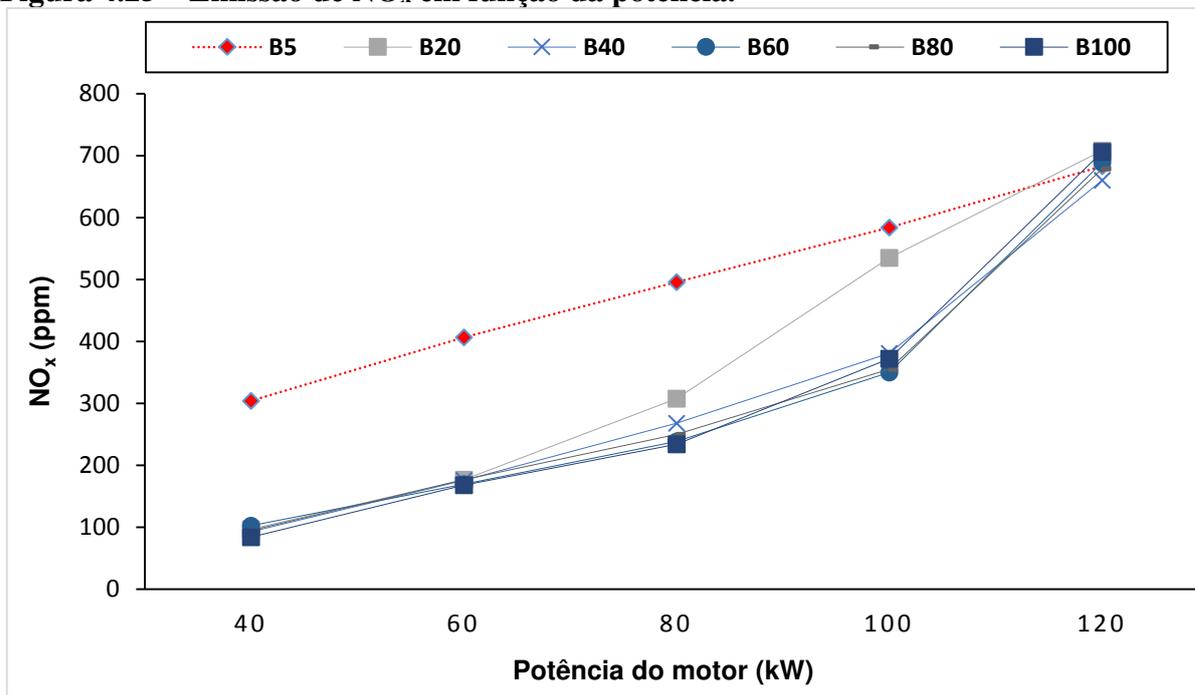
O motor diesel utilizado no sistema testado foi fabricado em 2001. O PROCONVE no uso de suas atribuições através da norma (Conama) Res. 08/93, define na Fase P4, equivalente a Euro 2, que os valores limites para as emissões dos motores diesel de médio e grande porte fabricados entre os anos de 2000 à 2005, não devem ultrapassar: para o NO_x 7,00 (g/kW.h), para o CO 4,0 (g/kW.h), para o HC 1,10 (g/kW.h), para o MP 0,15 (g/kW.h) e o teor de enxofre deveria estar entre 3000 e 10.000 ppm.

a) Emissão de NO_x

Verifica-se a partir da Figura 4.25 que a curva de emissão de NO_x no modo diesel normal, cresce praticamente linear com o crescimento da potência enquanto no modo dual, os valores de emissões de NO_x são bem menores na maior potência, porém crescente também quase que linearmente e mantendo aproximadamente a mesma amplitude até a potência de 100 kW, e convergem em torno de valores aproximadamente iguais na potência de 120 kW, a exceção da mistura B20. É possível observar que para a mistura B20, nas potências de 80 kW e 100 kW os valores registrados não obedecem a tendência das outras misturas ficando fora da faixa das outras misturas e por se tratar de trabalho experimental não foi possível determinar e/ou apontar a causa desses desvios. No modo de operação a diesel, a variação entre a maior potência e a menor foi de 379 ppm, enquanto que no modo dual foi de 624 ppm. Desta forma fica evidenciado claramente a maior emissão de NO_x no modo de operação diesel, ressaltando apenas que na potência de 120 kW, os valores de emissão de NO_x são praticamente os mesmos.

Analisando os dados da Figura 3.5 à luz dos valores limites impostos pelas normas do PROCONVE na Fase P4 que estabelece para o NO_x 7,00 (g/kW.h), percebe-se que os valores medidos estão bem abaixo deste índice. Para o modo de operação diesel foi registrado os valores de 304 ppm ou 5,732 (g/kW.h) na potência de 40 kW e 683 ppm ou 6,896 (g/kW.h) na potência de 120kW, enquanto que, no modo de operação dual foi registrado 84 ppm ou 1,912(g/kW.h) na potência de 40 kW e 706 ppm ou 6,270 (g/kW.h), na potência de 120kW.

Figura 4.25 – Emissão de NO_x em função da potência.



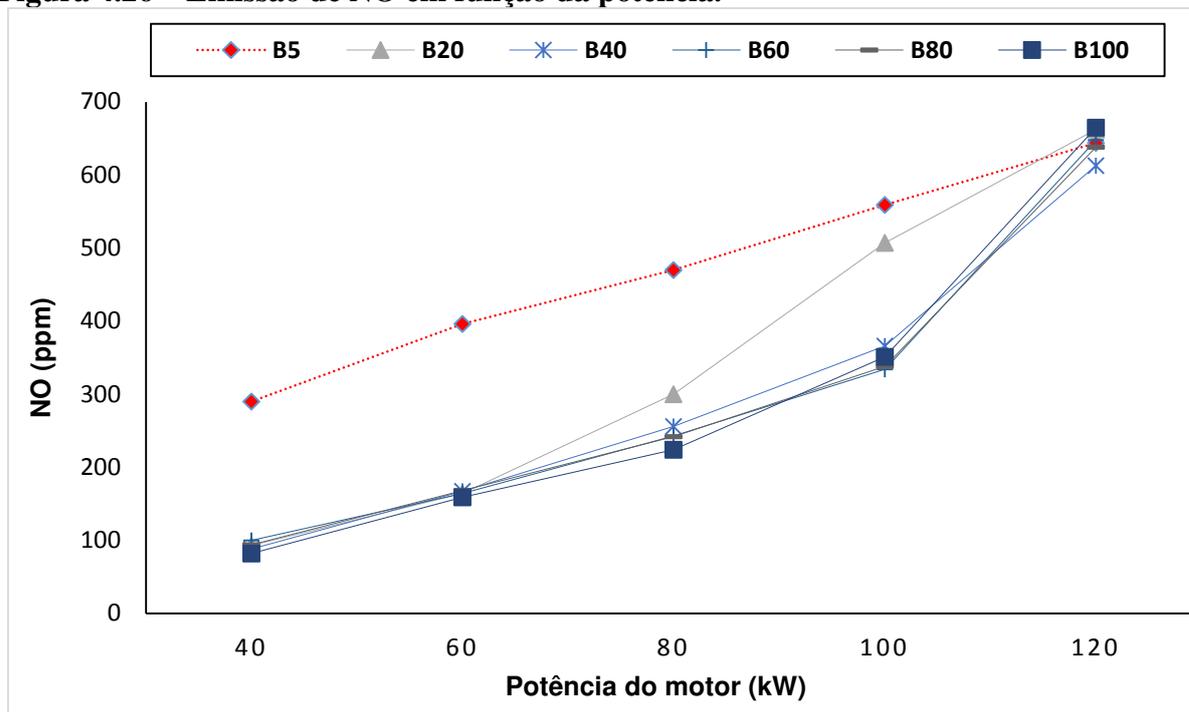
Sahoo et al. (2009) encontraram que em operação no modo dual, baixas emissões de NO_x acompanhada de uma drástica redução das emissões de fuligem para todos os combustíveis gasosos, não especificando o comportamento das emissões de NO_x com o aumento da potência.

b) Emissão de NO

Percebe-se na Figura 4.26, que a curva de emissão de NO com o motor operando em modo diesel normal e no modo dual, os valores de emissões de NO são muito próximos dos valores apresentados na Figura 2.5 e apresentando comportamento semelhante para todas as misturas e todas as potências, uma vez que, a diferença percentual dos valores de emissões entre o NO_x e o NO é de apenas 5%.

Analisando os dados da Figura 3.5 à luz dos valores limites impostos pelas normas do PROCONVE na Fase P4 que estabelece para o NO_x 7,00 (g/kW.h), e sabendo-se que o NO representa $\approx 95\%$ do NO_x, portanto $\approx 6,65$ (g/kW.h), percebe-se que os valores medidos estão bem abaixo deste índice. Para o modo de operação diesel foi registrado os valores de 290 ppm ou 5,468 (g/kW.h) na potência de 40 kW e 644 ppm ou 6,502 (g/kW.h) na potência de 120kW, enquanto que, no modo de operação dual foi registrado 82 ppm ou 1,833 (g/kW.h) na potência de 40 kW e 665 ppm ou 5,862 (g/kW.h), na potência de 120kW.

Figura 4.26 – Emissão de NO em função da potência.



Papagiannakis (2003) e Hountalas (2004) relatam que o nível de concentração de NO com o motor operando em modo dual é menor se comparado com o motor operando com diesel normal.

Sahoo et al. (2009) verificaram que, com relação aos efeitos da carga do motor operando no modo dual, as emissões de NO_x são relativamente baixas acompanhada de uma drástica redução das emissões de fuligem para todos os combustíveis gasosos. Observaram ainda que o aumento de massa do gás natural, além de produzir uma diminuição brusca na concentração de fuligem, reduz as emissões de NO com relação a operação em modo diesel normal, o que se encontra em pleno acordo com os resultados encontrados neste trabalho de pesquisa experimental, conforme pode ser visto na Figura 4.26 para uma determinada potência.

Costa (2007) e Silva (2013) também encontraram que os valores do NO para o biodiesel puro e/ou misturados com diesel são bem menores em todas as faixas de potências. Porém, nas baixas potências a diferença é muito mais acentuada.

É possível observar que, para a mistura B20, nas potências de 80 kW e 100 kW, os valores registrados não obedeceram a tendência das outras misturas ficando um pouco fora da faixa esperada e por se tratar de trabalho experimental, não foi possível determinar e/ou apontar a causa desses desvios.

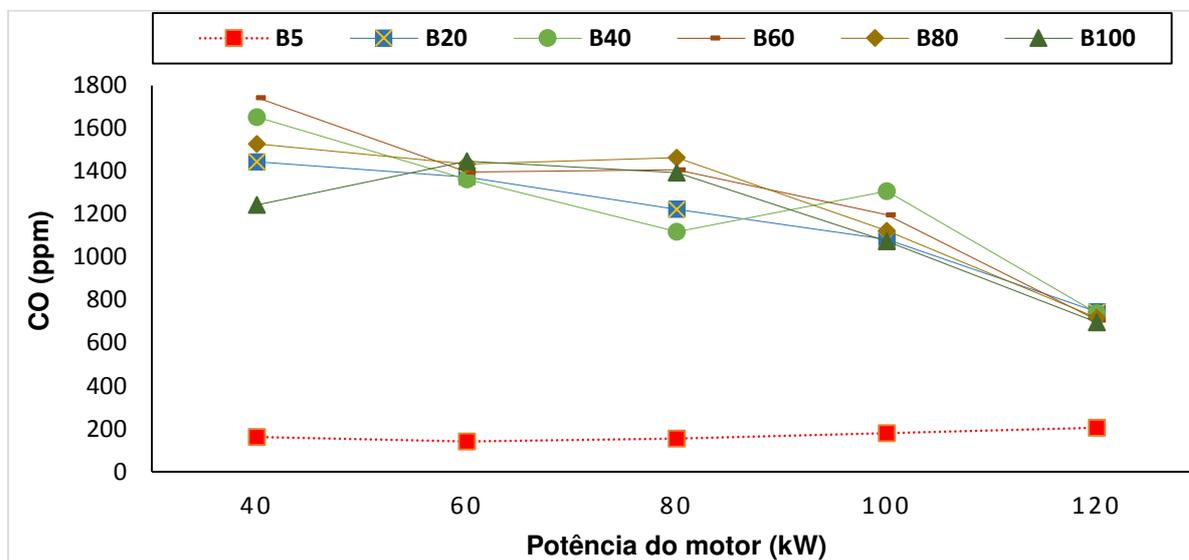
c) Emissão de CO

O comportamento das curvas de emissões de CO das misturas B20, B40, B60, B80 e B100 diminuem com o aumento da potência de valores aproximados entre 6 e 9,5 vezes maiores na menor potência (40 kW) e de valores aproximados a 3,5 vezes maiores na maior potência (120 kW) do que os valores emitidos pelo CPD-B5, na mesma faixa de potência. Ao contrário do comportamento das emissões de CO pelo gás natural, o CPD-B5 apresenta uma pequena variação nas emissões de CO com o aumento potência, além de apresentar valores muitíssimo abaixo dos valores apresentados pelo GNV a aproximadamente 85% de substituição do B5, conforme pode ser visto na Figura 4.27. As misturas B20 e B40 apresentaram comportamento um pouco diferente das outras misturas nas potências de 80 kW e 100 kW.

Analisando os dados da Figura 3.5 à luz dos valores limites impostos pelas normas do PROCONVE na Fase P4 que estabelece para o CO 4,00 (g/kW.h), percebe-se que os valores medidos no modo diesel B5 estão bem abaixo deste índice enquanto que no modo de operação dual estão acima dos índices estabelecidos, porém caem vertiginosamente com o aumento da potência

Para o modo de operação diesel foi registrado os valores de 162 ppm ou 3,050 (g/kW.h) na potência de 40 kW e 205 ppm ou 2,070 (g/kW.h) na potência de 120kW, enquanto que, no modo de operação dual foi registrado 1243 ppm ou 28,466 (g/kW.h) na potência de 40 kW e 697 ppm ou 6,606 (g/kW.h), na potência de 120kW

Figura 4.27 – Emissão de CO em função da potência.



Papagiannakis (2003) e Hountalas (2004), observaram que as emissões de CO e HC, na operação em modo dual são, em geral, superiores quando comparadas com o motor operando em modo diesel normal. Os valores aumentam proporcionalmente com o aumento da massa de combustível gasoso e apenas quando o motor opera em altas cargas é que se observa uma diminuição em razão de maior massa de gás natural.

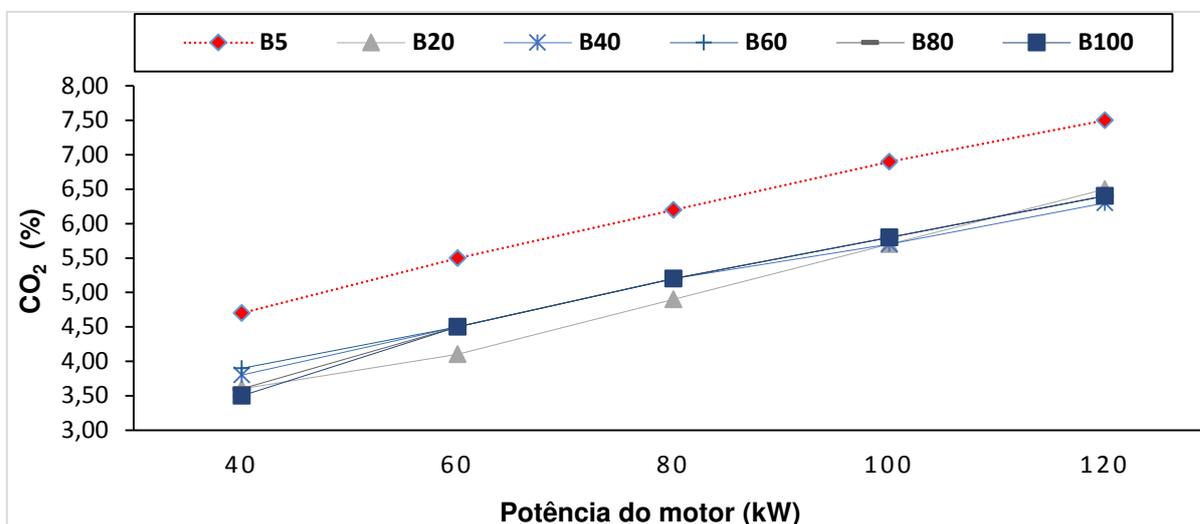
Sahoo et al. (2009) observaram que em todas as condições de carga, as emissões de CO e HC no modo dual de operação, são consideravelmente mais altas em comparação com as emissões do modo diesel normal. Observaram ainda que o aumento de massa do gás natural promove um aumento nas emissões de HC e CO, fato este que também está de acordo com os dados encontrados neste trabalho experimental e apresentados na Figura 4.27.

É possível observar que, para a mistura B20 e B40, nas potências de 80 kW e 100 kW, os valores registrados não obedeceram a tendência das outras misturas ficando um pouco fora da faixa esperada, e por se tratar de trabalho experimental, não foi possível determinar e/ou apontar a causa desses desvios.

d) Emissão de CO₂

As emissões de CO₂ são apresentadas na Figura 4.28. Pode-se verificar na referida figura, que as emissões de CO₂ são bem menores no modo dual, se comparadas ao modo diesel, e em ambos os modos de operação, crescem quase que linearmente com o aumento da potência, em todas as potências ensaiadas, mantendo praticamente a mesma amplitude em todas as faixas de potência.

Figura 4.28 – Emissão de CO₂ em função da potência.



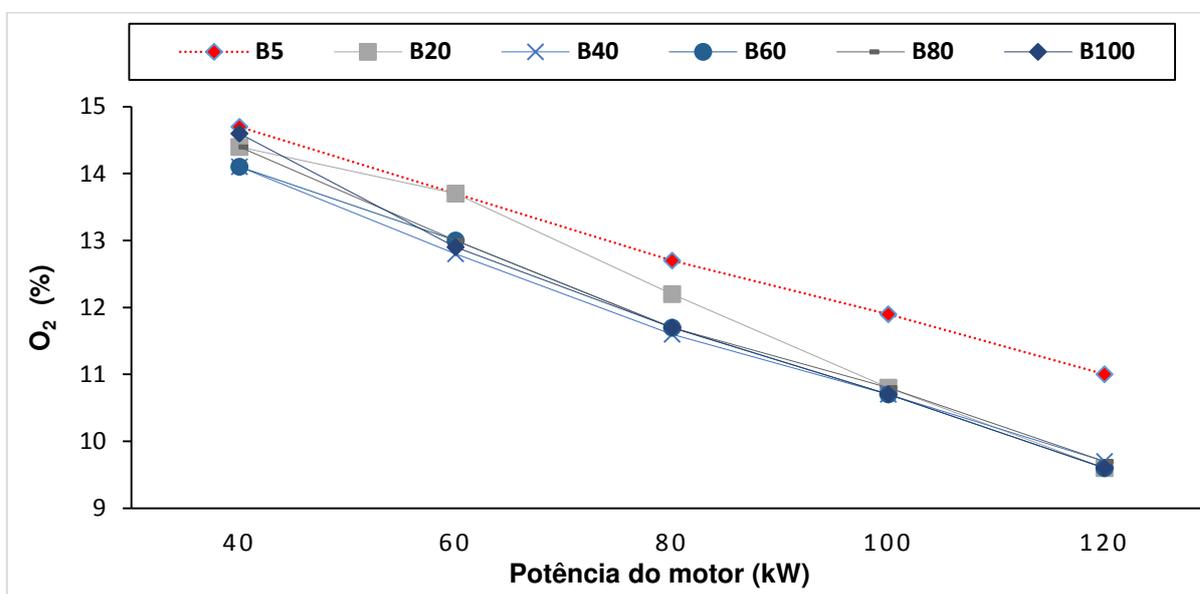
É possível observar que para a mistura B20, nas potências de 60 kW e 80 kW, os valores registrados não obedeceram a tendência das outras misturas ficando um pouco fora da faixa esperada e, por se tratar de trabalho experimental, não foi possível determinar e/ou apontar a causa desses desvios.

Rodriguez et al. (2009) observaram em seu estudo que o combustível que libera menos emissões de CO₂ para a atmosfera é o gás natural e o que libera as maiores emissões de CO₂ para a atmosfera é o diesel, fato este que pode ser observado na Figura 4.28. Também relata que o biodiesel apresenta uma situação semelhante no que diz respeito ao óleo combustível. Um detalhe a parte é que, na verdade, o biodiesel emite maiores quantidades de CO₂ do que as emissões de combustível convencionais, porém, como a maior parte deste é de estoques de carbono renováveis, esta fração não é contado como emissão de gases com efeito de estufa a partir do combustível;

e) Emissão de O₂

A Figura 4.29 apresenta as emissões de O₂ em função da potência. O comportamento das curvas da Figura 4.29, mostra uma diminuição do O₂ em ambos os modos, porém um pouco menos acentuada para o modo diesel normal, com o aumento da potência em toda faixa ensaiada, o que é explicado uma vez que aumentando-se a massa de combustível a ser queimada para gerar mais potência, demanda-se mais O₂ para queimá-la reduzindo assim a quantidade disponível com o aumento da potência.

Figura 4.29 – Emissão de O₂ em função da potência.



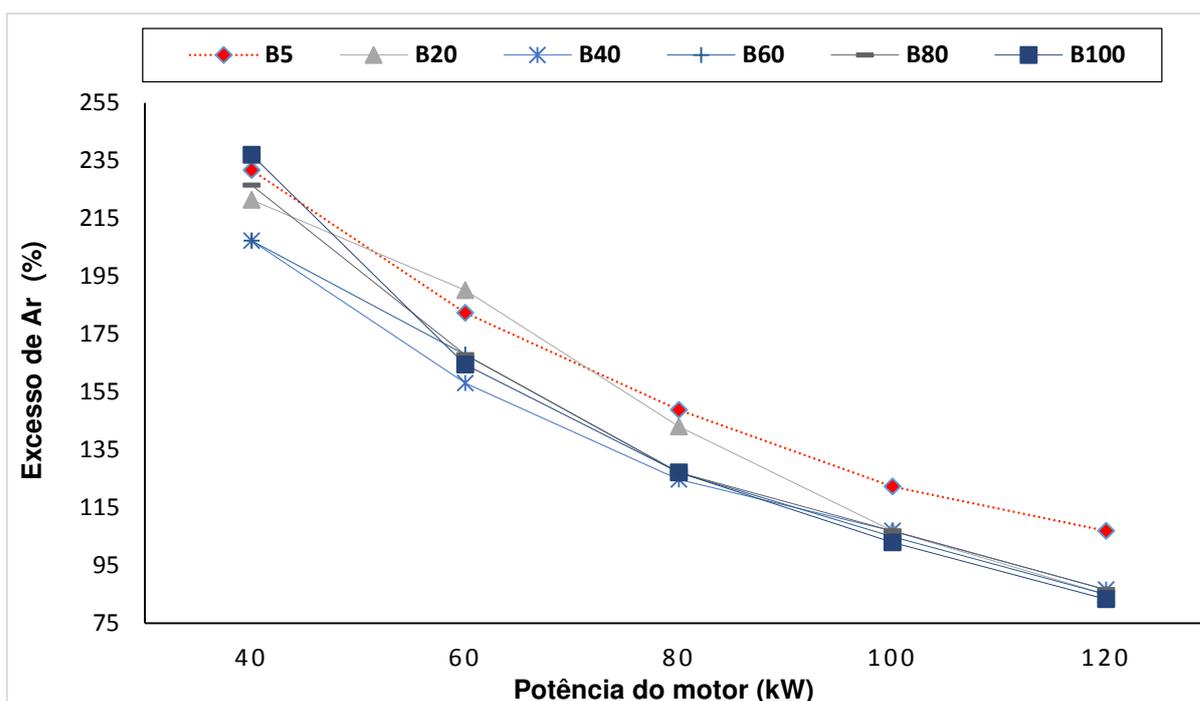
O fato da operação do motor em modo dual consumir mais O_2 conforme pode ser observado na figura 4.29, deve-se ao fato de o combustível em modo gasoso forma uma mistura mais homogênea com o ar, o que proporciona uma melhor queima, desta forma utilizando mais O_2 para isto, em relação ao modo de operação diesel.

É possível observar que para a mistura B20, nas potências de 60 kW e 80 kW, os valores registrados não obedeceram a tendência das outras misturas ficando um pouco fora da faixa esperada e, por se tratar de trabalho experimental, não foi possível determinar e/ou apontar a causa desses desvios.

f) Excesso de ar

O comportamento das curvas do excesso de ar no modo diesel e no modo dual, representados na Figura 4.30, mostram que o excesso de ar diminui proporcionalmente com o aumento da potência, tanto para o modo diesel quanto para o modo dual, sendo que para a faixa das misturas B20-B100, a diminuição é mais acentuada, o que se encontra em acordo com o comportamento esperado para motores de combustão interna. Foi possível também observar que a curva da mistura B20 nas potências 60 kW e 80 kW, apresentou esses pontos fora do esperado, tendo voltado a seguir a tendência das outras misturas partir de 100 kW.

Figura 4.30 – Excesso de ar em função da potência.



A partir das análises dos dados dos parâmetros de emissões do motor apresentados nas Figuras, 4.25 a 4.30, verifica-se que existe melhoria significativa para do meio ambiente com o motor Diesel funcionando em no modo dual, portanto, pode-se concluir que é perfeitamente viável, além de recomendável do ponto de vista ambiental, a utilização do modo de operação dual.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Considerações finais

Espera-se que o presente trabalho tenha deixado uma pequena contribuição técnica, científica, social e ambiental para a redução do consumo do diesel, associado a uma redução significativa das emissões para o meio ambiente de: CO₂, CO e Material Particulado – MP, dentre outros componentes, conseqüentemente, gerando uma energia mais limpa e com um menor custo por kW gerado no modo dual, pelo menor preço do gás natural quando comparado ao diesel puro.

A partir deste trabalho, pode-se afirmar que é viável a utilização do motor diesel operando em modo dual, com taxa de substituição de até 85% de diesel por gás natural.

Observou-se uma redução dos níveis de emissões analisados, quando o motor operou com misturas de biodiesel crescente, chegando até o B100.

Observou-se uma redução do nível de ruído do motor, quando este operou com taxa de substituição mais elevada.

O uso do gás natural para acionamento de motores diesel na geração de energia elétrica é promissor, tanto na questão econômica quanto na ambiental, porém, ainda não tão prático do

ponto de vista da disponibilidade do GN, uma vez que este ainda é escasso e o armazenamento demanda altos custos, o que termina por inviabilizar projetos de termo geração à gás natural.

O uso de biodiesel na mistura com o diesel, a princípio, se mostrou bastante interessante por reduzir as emissões sem causar grandes problemas com o consumo e a potência.

A baixa estabilidade do biodiesel quando armazenado, ainda é um problema a ser resolvido, pois ocorre formação de borras, que podem provocar entupimento e corrosão dos dutos de alimentação de óleo do motor, da bomba de óleo combustível e dos filtros de combustíveis.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- a) Investigar a possibilidade de implantar mais centrais de geração termoelétrica acionadas por outros combustíveis não derivados de petróleo como por exemplo “Hidrogênio”.
- b) Repetir os procedimentos deste trabalho, utilizando-se um motor com potência semelhante, com injeção eletronicamente, e verificar se houver, melhorias dos resultados aqui apresentados.
- c) Repetir os procedimentos deste trabalho, utilizando-se um freio dinamométrico, de forma a se ter uma comprovação dos resultados obtidos com relação a potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A Fase P7 do PROCONVE e o Impacto no Setor de Transporte - 2.ed – Brasília: CNT SEST/SENAT 2012

A. P. Carlucci, A. de Risi, D. Laforgia, F. Naccarato - *Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual-fuel diesel–natural gas engine*, *Energy*, Volume 33, Issue 2, February 2008, Pages 256-263

Adeilton Fernandes - *Análise Do Desempenho De Motor Diesel Com A Utilização De Biocombustível Obtido A Partir Do Reuso De Óleo Vegetal* - Universidade Metodista de Piracicaba, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Santa Bárbara D’oeste 2012

AIE - Agência Internacional de Energia, disponibilizado em: <http://www.iea.org/>

ANP - Agência Nacional do Petróleo e Gás (2002)

ANP - Agência Nacional do Petróleo e Gás, Regulamento Técnico ANP N.º 001/98 ASTM 2007

B.B. Sahoo ^a, N. Sahoo ^b, U. K. Saha ^b - **Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines — A critical review**, ^a Centre for Energy, Indian Institute of Technology, Guwahati 781039, India ^b Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Guwahati 781039, India 2009.

Castro, Luiz Otavio da Cruz de Oliveira - *Contribuição ao Estudo do Gás Natural no Espírito Santo*, CIENTÍFICA CET-FAESA: Rev. da Faculdade de Tecnologia FAESA. Vitória, Ano 3, nº 3, p. 15-24, Jan. / Dez. 2009.

CETENE – Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste

Christian Rodriguez Coronado, João Andrade de Carvalho Jr., Juliana Tiyoko Yoshioka, José Luz Silveira - *Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The*

use of biodiesel São Paulo State University, Campus of Guaratinguetá, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP, Brazil, 2009.

CLEANDIESEL

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

Costa, Y. J. R. - *Análise Energética e Exegética de um Motor de Combustão Interna Operando com Diesel e Gás Natural*, 185f. Tese de Doutorado – Doutorado em Engenharia de Processo, Centro de Ciências e Tecnologia – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba – Brasil, 2007

CUMMINS

Daniel Marçal de Queiroz - *Potência dos motores do ciclo diesel*, disponibilizado em; ftp://www.ufv.br/Dea/Disciplinas/Daniel/Eng336/quarta_semana/slide_05.htm acessado em 08 de setembro de 2014

Daniel Marçal de Queiroz, *Termodinâmica e o ciclo dos motores*, disponibilizado em; ftp://www.ufv.br/Dea/Disciplinas/Daniel/Eng630/capitulo_04.pdf acessado em 08 de setembro de 2014

Eco-D Products – Argentina

Estudos Econômicos e Energéticos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) disponibilizado em: <http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>

EUA (US EPA, 2003a)

Fernando José da Silva, - *Motor De Combustão Interna Dual Operando Com Diesel, Biodiesel E Gás Natural: Análises De Desempenho E Emissões* - Universidade federal de campina grande - Centro de ciências e tecnologia - Doutorado em engenharia de processos - Campina Grande, PB-Brasil, Fevereiro de 2014

FGV - Fundação Getúlio Vargas e Petrobras, Painel 2012 5ª edição. Disponibilizado em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2011/11/matriz-brasileiras>, publicado em: 07-11-2011 12h26 e modificado em: 28-07-2014

FGV - Fundação Getúlio Vargas e Petrobras, Painel, 2012 5ª edição Disponibilizado em: <http://oglobo.globo.com/projetos/painelfgv/mat/mat14.asp>, publicado em: 07-04-2013

ftp://www.ufv.br/Dea/Disciplinas/Daniel/Eng336/quarta_semana/slide_05.htm

ftp://www.ufv.br/Dea/Disciplinas/Daniel/Eng630/capitulo_04.pdf,

Gás Engineers Handbook

GASENE - Gasoduto Sudeste-Nordeste

Guilherme B. Machado⁽¹⁾, Tadeu C. Cordeiro de Melo⁽²⁾, Luiz Fernando Martins Lastres⁽³⁾, - ***Utilização de Gás Natural em Motores e Cenário do Uso no Brasil, Universidade Petrobrás Maio 2007***, PETROBRAS/CENPES/PDAB/DPM^(1 e 2) PETROBRAS/CENPES/PDAB/LPE⁽³⁾.

<http://abastecendoavida.blogspot.com.br/2010/10/diferencas-entre-motores-alcool.html>

<http://maquinasemotoresnapescavso.blogspot.com.br/p/motor-do-ciclo-diesel.html>

<http://oglobo.globo.com/projetos/painelfgv/mat/mat14.asp>

http://pbgás.com.br/?page_id=195

<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/portal+de+conteudo/produtos/automotivos/oleo+diesel/caracteristica+do+oleo>

<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2011/11/matrizes-brasileiras>

http://www.pbgas.com.br/?page_id=195,

<https://www.youtube.com/watch?v=Ft-3Fm2xRmU&feature=youtu.be>

José Claudio Pereira Eng. - ***Princípios de Funcionamento, Instalação, Operação e Manutenção de Grupos Diesel Geradores.***

Joshua T. Cohen* - ***Diesel vs. compressed natural gas for school buses: a cost-effectiveness evaluation of alternative fuels***, Energy Policy 33 (2005) 1709–1722. www.elsevier.com/locate/enpol (* Harvard Center for Risk Analysis, Harvard School of Public Health, 718 Huntington Avenue, Boston, MA 02115, USA)

Joshua T. Cohen, James K. Hammitt e Jonathan I. Levy – ***Fuel for Urban Transit Buses: a Cost-Effectiveness Analysis***, Environ. Sci. Technol, 2003, 37, 1477 - 1484

Kane Instrument

MME - Ministério de Minas e Energia, disponibilizado em: <http://www.mme.gov.br/mme>

MME - Ministério de Minas e Energia, Núcleo Estratégico de Energia - Resenha Energética Brasileira Ano 2013, Pub. Junho 2014, Publicado em: www.mme.gov.br

Moran, Michael J. Howard N. Shapiro – ***Princípios de Termodinâmica para Engenharia.*** 6^a ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2011.

Painel 2012 5^a edição da FGV (Fundação Getúlio Vargas) e Petrobras

PBGÁS – Companhia Paraibana de Gás, publicado em: http://pbgás.com.br/?page_id=195

Plano Decenal de Expansão de Energia, disponibilizado em:

<http://www.epe.gov.br/PDEE/Forms/EPEEstudo.aspx>

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, 2004, http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/biodiesel/o_biodiesel.html

Pope, C.A., Thun, M.J., Namboodiri, M.M., Dockery, D.W., Evans, J.S., Speizer, F.E., Heath, C.W., 1995. *Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 151, 669–674.

Portal Brasil, Publicado 0x/11/2011 12h26. Última modificação:28/07/2014 12h58 no site: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2011/11/matrizes-brasileiras>

Portal Petrobrás

PROCONVE - Programa de Controle das Emissões dos Veículos Automotores

QUALITEX – Engenharia e serviços Ltda.

R.G. Papagiannakis, D.T. Hountalas - *Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot Diesel fuel and natural gas* Department of Mechanical Engineering, Thermal Engineering Section, 2004, National Technical University of Athens, Heroon Polytechniou 9, Zografou Campus, Athens 15 773, Greece. Received 23 July 2003; received in revised form 7 November 2003; accepted 9 January 2004, Energy Conversion and Management 45 (2004) 2971–2987 www.elsevier.com/locate/enconman.

R.G. Papagiannakis, D.T. Hountalas - *Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine* Internal Combustion Engines Laboratory, Thermal Engineering Section, Mechanical Engineering Department, National Technical University of Athens, Heroon Polytechniou 9, Zografou campus Athens 15 780, Greece Applied Thermal Engineering 23 (2003) 353–365 www.elsevier.com/locate/apthermeng

R.G. Papagiannakis, P.N. Kotsiopoulos, T.C. Zannis, E.A. Yfantis, D.T. Hountalas, C.D. Rakopoulos - *Theoretical study of the effects of engine parameters on performance and emissions of a pilot ignited natural gas diesel engine*, Energy, Volume 35, Issue 2, February 2010, Pages 1129-1138

Resenha Energética Brasileira, Exercício 2013, Edição de Junho 2014 – Ministério das Minas e Energia.

Thomas, José Eduardo. (organizador), Attilio Alberto Triggia, Carlos Alberto Correia, Clodoveu Verotti Filho, José Augusto DanielXavier, José Carlos Vieira Machado, José Erasmo de Souza Filho, José Luiz de Paula, Nereu Carlos Milani De Rossi, Nilton Emanuel Santos Pitombo, Paulo Cezar Vaz de Melo Gouvea, Renato de Souza Carvalho, Roberto Vinicius Barragan - *Fundamentos da Engenharia do Petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência, PETROBRAS, 2001.

Ullman, T.L., Smith, L.R., Anthony, J.W., 2002. - *Emissions from School Buses in Compressed Natural Gas, Low Emitting Diesel, and Conventional Diesel Engine Configurations*. Southwest Research Institute, San Antonio.

REFERÊNCIAS CONSULTADAS

Bhattacharjee, S., 2007, "*TEST: The Expert System for Thermodynamics*," Electronic Resource, Entropysoft, Del Mar, CA, <http://www.thermofluids.net>

C. Carrareto, A. Macor, A. Mirandola, A. Stoppato, S. Tonon - *Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations*, Department of Mechanical Engineering, University of Padova, Via Venezia, 1-35131 Padova, Italy. www.elsevier.com/locate/energy. Energy 29 (2004) 2195–2211

Chao He a,b, Yunshan Ge b,*, Jianwei Tan b, Kewei You c, Xunkun Han b, Junfang Wang b, Qiuwen You b, Asad Naeem Shah b - *Comparison of carbonyl compounds emissions from diesel engine fueled with biodiesel and diesel*, a) School of Transportation, Machinery and Civil Engineering, Southwest Forestry College, Kunming 650224, China; b) National Lab of Auto Performance & Emission Test, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; c) China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300162, China. Contents lists available at ScienceDirect Atmospheric Environment journal homepage: www.elsevier.com/locate/atmosenv

CIENTÍFICA CET-FAESA: Rev. da Faculdade de Tecnologia FAESA. Vitória, Ano 3, nº 3, p. 15-24, Jan. / Dez. 2009, publicado em:

https://fasul.edu.br/portal/files/biblioteca_virtual/7/revistacientaficacetfaesafaculadadedetecnologiadafaesa_1.pdf

Conde, Alexon do Prado, - *Desempenho de motor ciclo diesel alimentado com biodiesel de óleo de soja e oliva*, Alexon do Prado Conde. – Lavras – MG, UFLA, 2007.

Constantine D. Rakopoulos, Athanasios M. Dimaratos, Evangelos G. Giakoumis, Dimitrios C. Rakopoulos - *Investigating the emissions during acceleration of a turbocharged diesel engine operating with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends*, Energy, Volume 35, Issue 12, December 2010, Pages 5173-5184

COPERGÁS – Companhia Pernambucana de Gás, acessado em <http://copergas.com.br/produtos/industrial/#.VapjqfIVgko>

Costa Y. J. R. *Energetic and exergetic analyzes of internal combustion engine operating with diesel and natural gas mixture*. Ph. D. Thesis, Brazil: Doctorate in Process Engineering, Center of Sciences and Technology, Federal University of Campina Grande, 2007 (In Portuguese).

Costa Y. J. R., Lima A. G. B., Grilo M. B., Filho C. R. B., Lima A. M. N. - *Exhaust emissions characteristics: An experimental study on diesel engine operated with mixtures of diesel and natural gas*. Brazilian Journal of Petroleum and Gas 2008; 2(1): 36–44.

CTGÁS – Centro de Tecnologias do Gás – *Dados de Unidades de Conversão*, NATAL – RN – BRASIL

Freitas Guarrine, 2011, *O Funcionamento de Motores no Modelo de Combustão de Duplo Combustível* – Trabalho de Licenciatura,

<http://www.brasil.gov.br/cop/panorama/o-que-o-brasil-esta-fazendo/matriz-energetica>)

acessado em 08 de abril de 2013 as 00:10horas.

<http://www.culturamix.com/transporte/carros/ciclo-diesel>

http://www.gasnet.com.br/gasnatural/gas_completo.asp

Humberto José Manavella – *Emissões Automotivas, Sistemas de Controle Diagnóstico*. Obra Registrada na Fund. Biblioteca Nacional N° 561.574

Indian Institute of Technology, Guwahati 781039, India Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Guwahati 781039, India Renewable and Sustainable Energy Reviews journal homepage: www.elsevier.com/locate/rser.

Jorge Martins – *Motores de Combustão Interna*, Quarta Edição, revista e aumentada, Fev. 2013.

LeTavec, C., Uihlein, J., Vertin, K., Chatterjee, S., Wayne, S., Clark, N., Gautam, M., Thompson, G., Lyons, D., Hallstrom, K., Chandler, K., Coburn, T., 2002. - *Year-Long Evaluation of Trucks and Buses Equipped with Passive Diesel Particle Filters*. 2002-01-0433. SAE International, Warrendale, PA.

Mariana Iooty a,b,_, HelderPintoJr.a, FranciscoEbeling - *Automotive fuel consumption in Brazil:Applying static and dynamics systems of demand equations*, IE-UFRJ (Institute of Economics—Federal University of Rio de Janeiro),Energy Economics Group b UFRRJ (Federal Rural University of Rio de Janeiro) Brazilian Petroleum Institute. Contents lists available at Science Direct journal home page: www.elsevier.com/locate/enpol

Mohamed Y.E. Selim - *Pressure–time characteristics in diesel engine fueled with natural gas* Mech. Power Eng. Dept, Faculty of Engineering, Helwan University, PO Box 11718,

Mattaria, Cairo, Egypt, *Renewable Energy* 22 (2001) 473–489
www.elsevier.nl/locate/renene

Nicolas B.C. Ahouissoussi ^a, Michael E. Wetzstein - *A comparative cost analysis of biodiesel, compressed natural gas, methanol, and diesel for transit bus systems*, b,) a *World Bank Resident Mission, Cotonou, Benin* b *Department of Agricultural and Applied Economics, University of Georgia, Athens, GA 30602, USA*

NIL Dalarsson and MARIANE Dalarson, *Introductory Statistical Thermodynamics*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Academic Press is an imprint of Elsevier.

ONCAR, Singh, New Age International (P) Limited Publishers, Third Edition *Applied Thermodynamics* – 2009-2006-2003, ISBN (13):978-81-224-2916-9.

Proceedings of the National Congress of Mechanical Engineering (CONEM), 2004, Belem, 2004. CD-ROM (In Portuguese). Y. J. Ramos da Costa et. al. - *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 4651–4660 4660

PUC-RIO – *Certificação Digital N° 0621507/CA*

R. Uma ^{a,*}, T.C. Kandpal ^b, V.V.N. Kishore ^a - *Emission characteristics of an electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes* - ^a TERI, Darbari Seth Block, India Habitat Centre, New Delhi 110 003, India - ^b Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi 110 016. India. Received 16 January 2003; received in revised form 2 December 2003; accepted 15 January 2004. *Biomass and Bioenergy* 27 (2004) 195 – 203 www.elsevier.com/locate/biombioe

Ricardo H. Pereira, Sergio L. Braga e Carlos Valois M. Braga, - *Substituição Parcial do Óleo Diesel pelo Gás Natural em Motores – a atividade da tecnologia e sua avaliação experimental*, 2005 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brasil

S. Baghdar Hosseini, K. Bashirnezhad, A.R. Moghiman, Y. Khazraii, N. Nikoofal - *Experimental Comparison of Combustion Characteristic and Pollutant Emission of Gas oil and Biodiesel*, *World Academy of Science, Engineering and Technology* Vol:4 2010-12-22, *International Science Index* Vol:4, No:12, 2010 waset.org/Publication/3845

Samet, J.M., Zeger, S.L., Dominici, F., Curriero, F., Coursac, I., Dockery, D.W., Schwartz, J., Zanobetti, A., 2000. - *The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study, Part II: Morbidity, Mortality, and Air Pollution in the United States. Health Effects*, Institute, Cambridge, MA.

Sonntag, R. E., Borgnakke, C. 2003. *Introdução à Termodinâmica para Engenharia*. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora. www.if.ufrgs.br/~lang/

Yoge Jerônimo Ramos da Costa, Antonio Gilson Barbosa de Lima, Celso Rosendo Bezerra Filho - *Energetic and exergetic analyses of a dual-fuel diesel engine*, 2012.

YUNUS A. ÇENGEL MAICHAEL A. BOLES. 2007. *Termodinâmica*. Tradução da 5ª edição americana. São Paulo: Editora McGraw-Hill

PIMENTEL, Valéria Said de Barros, BELCHIOR, Carlos Rodrigues Pereira and PEREIRA, Pedro Paulo. *Avaliação experimental do desempenho e emissões de motores diesel usando misturas de óleo de mamona e óleo diesel*. In *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, 2004, Campinas (SP) [online]. 2004 [cited 13 Jul 2015]. Available from: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100027&lng=en&nrm=iso .

PIMENTEL, Valéria Said de Barros, BELCHIOR, Carlos Rodrigues Pereira and PEREIRA, Pedro Paulo. *Avaliação experimental do desempenho e emissões de motores diesel usando misturas de óleo de mamona e óleo diesel*. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2004, Campinas. **Proceedings online** Available from: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100027&lng=en&nrm=abn>. Access on: 13 Jul. 2015.

ANEXOS

Anexo 1 - Ficha Técnica do Motor segundo os dados de seu fabricante

Dados da Plaqueta do Motor

Motor Cummins

ANO FABRICAÇÃO: 2001

MOD: 140 DGFK 1463

SÉRIE: C01T213734

SÉRIE – C 8/MOD/01

CID/L = 505/8.3

ING. 16°

Folga da válvulas 0,30” e 0,60”

Marcha Lenta 750 RPM

Vazão Comb. 159,6

Modelo MS023030

CIL = 2218

Série Motor 30467607

Injetora 3926787

Potência em HP = 277HP a 1800RPM ou (206,56 KW aproximadamente).

Um vídeo deste Grupo Gerador funcionando pode ser acessado em:

<http://www.youtube.com/watch?v=SioAjAOut2M>

Anexo 2 – Dados experimentais do motor nos ensaios com as misturas; B20 à B100 em modo dual com 85% de gás natural e em modo diesel, CPD ou B5

Misturas de Biodiesel (%)	Potência Elétrica (kW)	Temperaturas Medidas no Motor em (°C)							Pressão em				Rotação do Motor (rpm)	Taxa de fluxo de massa (kg/h)		
		Água		Óleo Lubrificante	Ambiente do Motor	Misturas Combustíveis	Média dos 6 Cilindros	Coletor Admissão	Óleo Lubrificante (Kg/cm ²)	Coletor Admissão (bar)	Ambiente Motor (bar)	Entrada do Filtro de AR (bar)		Diesel Biodiesel	Ar	Gás Natural
		Entrada	Saída													
B05	40	65	79	56	31,4	37,3	347	77,27	4,46	1,56	0,95	0,87	1803	12,51	796,78	
	60	66	81	61	32,4	41,9	409	82,00	4,22	1,78	0,95	0,87	1802	16,44	900,09	
	80	66	82	71	33,5	43,5	463	90,00	4,16	2,01	0,95	0,87	1802	20,66	1014,79	
	100	69	86	73	34,4	45,6	511	94,64	3,98	2,26	0,95	0,86	1802	24,86	1142,76	
	120	70	88	76	35,2	49,8	566	106,55	3,86	2,55	0,95	0,86	1802	29,59	1270,34	
B20	40	62	81	59	36,00	52,00	478	81,73	4,44	1,47	0,95		1794	1,90	820,10	13,3088
	60	62	83	62	36,70	57,00	551	87,55	4,29	1,61	0,95		1794	2,64	891,78	17,1307
	80	63	86	71	38,40	59,00	570	93,82	4,21	1,74	0,95		1795	3,26	966,76	19,3976
	100	64	86	77	39,80	61,00	598	95,00	4,06	1,86	0,95		1794	3,66	1029,06	22,1927
	120	65	89	77	31,30	63,00	597	100,82	3,94	1,98	0,95		1793	4,66	1114,98	22,4856
B40	40	62	84	61	33,60	38,30	377	82,00	4,46	1,48	0,97		1808	1,93	824,65	13,46
	60	62	86	63	36,40	46,60	508	90,00	4,24	1,65	0,97		1809	2,51	916,52	16,25
	80	59	87	71	37,20	49,60	567	94,00	4,21	1,82	0,98		1815	3,09	1000,25	18,82
	100	55	89	76	39,90	55,60	584	98,55	4,04	1,96	0,98		1816	3,44	1080,23	19,32
	120	55	90	77	40,10	58,40	611	101,00	3,95	2,04	0,98		1816	4,31	1099,28	21,93
B60	40	63	84	55	32,40	38,90	376	80,00	4,46	1,46	0,96		1807	1,93	804,04	13,4546
	60	63	86	62	34,70	47,80	495	88,09	4,26	1,63	0,96		1808	2,42	897,88	16,6014
	80	64	86	66	36,30	51,90	536	94,00	4,14	1,80	0,96		1807	3,15	981,12	19,0202
	100	66	87	73	36,40	56,20	560	97,00	3,99	1,94	0,96		1808	3,73	1069,56	21,3038
	120	66	89	76	39,50	58,60	588	100,00	3,93	2,01	0,96		1808	4,23	1074,88	23,1038
B80	40	63	84	59	33,60	45,10	439	81,00	4,43	1,48	0,97		1808	1,92	811,79	14,03
	60	63	86	62	34,60	50,70	504	86,27	4,25	1,62	0,97		1809	2,53	894,61	16,47
	80	64	86	67	36,40	55,40	541	94,00	4,16	1,80	0,97		1809	3,15	989,25	18,93
	100	66	87	69	37,80	57,60	579	95,82	4,02	1,93	0,97		1811	3,53	1042,05	21,35
	120	66	89	70	38,00	58,10	605	97,00	3,97	2,02	0,97		1811	4,40	1089,60	23,10
B100	40	62	85	57	30,10	39,70	441	82,00	4,35	1,49	0,97		1813	1,77	829,39	14,8921
	60	62	86	61	29,80	44,20	487	88,82	4,22	1,64	0,97		1812	2,48	906,61	16,6994
	80	62	86	62	29,00	47,80	520	94,00	4,16	1,81	0,97		1813	2,94	1002,74	19,2157
	100	62	86	67	28,70	50,20	559	97,00	4,03	1,93	0,97		1814	3,45	1069,73	21,3273
	120	63	89	70	28,30	54,40	585	98,45	3,97	2,01	0,97		1814	4,44	1112,55	23,1722

Anexo 3 – Memorial de cálculos utilizado na conversão de volume em massa, para os dados experimentais

Misturas Biodiesel	Potência	Massa Específica		Massa Relativa	R = Cte	Pressão Atmosférica	Temperaturas Ambiente na Sala do Motor Medida		Vazão Mássica Calculada		Vazão Volumétrica Medida		
		(%)	(kW)	ρ_{Ar} (Kg/m ³)			$\rho_{Gás\ Natural}$ (Kg/m ³)	$\rho_{relativa\ Gás\ Natural}$ (Kg/m ³)	Constante dos Gases (J/Kg.K)	(bar)	Medida (°C)	Calculada (K)	Vazão de Ar (Kg/h)
B05	40	1,0867	0,7068	0,6504	287,058	0,95	31,4	304,55	796,78	0,00	366,61	733,21	
	60	1,0831	0,7045	0,6504	287,058	0,95	32,4	305,55	900,09	0,00	415,50	831,01	
	80	1,0793	0,7019	0,6504	287,058	0,95	33,5	306,65	1014,79	0,00	470,14	940,27	
	100	1,0761	0,6999	0,6504	287,058	0,95	34,4	307,55	1142,76	0,00	530,98	1061,96	
	120	1,0733	0,6981	0,6504	287,058	0,95	35,2	308,35	1270,34	0,00	591,79	1183,58	
B20	40	1,0710	0,6966	0,6504	287,058	0,95	36,00	309,00	820,10	13,31	382,85	765,70	19,11
	60	1,0681	0,6947	0,6504	287,058	0,95	36,70	309,85	891,78	17,13	417,46	834,92	24,66
	80	1,0623	0,6909	0,6504	287,058	0,95	38,40	311,55	966,76	19,40	455,04	910,08	28,08
	100	1,0575	0,6878	0,6504	287,058	0,95	39,80	312,95	1029,06	22,19	486,54	973,08	32,27
	120	1,0871	0,7070	0,6504	287,058	0,95	31,30	304,45	1114,98	22,49	512,85	1025,70	31,80
B40	40	1,0789	0,7017	0,6504	287,058	0,95	33,60	306,75	824,65	13,46	382,17	764,34	19,18
	60	1,0691	0,6954	0,6504	287,058	0,95	36,40	309,55	916,52	16,25	428,62	857,25	23,37
	80	1,0664	0,6936	0,6504	287,058	0,95	37,20	310,35	1000,25	18,82	468,99	937,98	27,14
	100	1,0572	0,6876	0,6504	287,058	0,95	39,90	313,05	1080,23	19,32	510,90	1.021,79	28,10
	120	1,0565	0,6872	0,6504	287,058	0,95	40,10	313,25	1099,28	21,93	520,24	1.040,48	31,91
B60	40	1,0831	0,7045	0,6504	287,058	0,95	32,40	305,55	804,04	13,45	371,16	742,32	19,10
	60	1,0750	0,6992	0,6504	287,058	0,95	34,70	307,85	897,88	16,60	417,60	835,20	23,74
	80	1,0695	0,6956	0,6504	287,058	0,95	36,30	309,45	981,12	19,02	458,69	917,37	27,34
	100	1,0691	0,6954	0,6504	287,058	0,95	36,40	309,55	1069,56	21,30	500,20	1000,39	30,64
	120	1,0585	0,6885	0,6504	287,058	0,95	39,50	312,65	1074,88	23,10	507,72	1015,43	33,56
B80	40	1,0789	0,7017	0,6504	287,058	0,95	33,60	306,75	811,79	14,03	376,21	752,42	19,99
	60	1,0754	0,6994	0,6504	287,058	0,95	34,60	307,75	894,61	16,47	415,94	831,89	23,55
	80	1,0691	0,6954	0,6504	287,058	0,95	36,40	309,55	989,25	18,93	462,64	925,27	27,22
	100	1,0643	0,6922	0,6504	287,058	0,95	37,80	310,95	1042,05	21,35	489,53	979,07	30,84
	120	1,0636	0,6918	0,6504	287,058	0,95	38,00	311,15	1089,60	23,10	512,20	1024,41	33,39
B100	40	1,0914	0,7098	0,6504	287,058	0,95	30,10	303,25	829,39	14,89	379,98	759,97	20,98
	60	1,0924	0,7105	0,6504	287,058	0,95	29,80	302,95	906,61	16,70	414,95	829,90	23,50
	80	1,0953	0,7124	0,6504	287,058	0,95	29,00	302,15	1002,74	19,22	457,74	915,48	26,97
	100	1,0964	0,7131	0,6504	287,058	0,95	28,70	301,85	1069,73	21,33	487,83	975,66	29,91
	120	1,0979	0,7141	0,6504	287,058	0,95	28,30	301,45	1112,55	23,17	506,68	1013,37	32,45

Anexo 4 – Análise de gás e dados de temperatura medida com a pistola nas misturas de B20 a B100 em modo dual e diesel, CPD ou B5

Misturas	Potência Elétrica	Consumo Horário Mistura	Consumo Específico Mistura	Taxa de Substituição Gás Natural	Consumo Gás Natural	Consumo AR	O ₂	CO	NO	SO ₂	Efficiência Combustão (Calculada)	Xair	CO ₂	NO _x	FLUE	T_Amb	T_Gás	T_Mistura Pistola Laser	T_Gás Pistola Laser	T_Ent. Ar Pistola Laser
(%)	(Kw)	(Kg/h)	(Kg/h)	85%	(m ³ /h)	(m ³ /h)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(% Gross)	(%)	(%)	(ppm)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
C.P.D B 05	40	12,54	313,59	313,59		733,21	14,60	162	290	0	69,50	231,70	4,70	304	310,00	29,70				
	60	17,20	286,74	286,74		831,01	13,50	142	396	0	69,84	182,40	5,50	407	356,00	30,40				
	80	21,08	263,54	263,54		940,27	12,50	155	470	0	70,59	148,80	6,20	496	391,00	30,60				
	100	25,07	250,70	250,70		1061,96	11,60	180	559	0	70,65	122,30	6,90	584	429,00	30,90				
	120	30,21	251,75	251,75		1183,58	10,80	205	644	0	70,89	106,90	7,50	683	460,00	31,10				
B 20	40	1,90	47,62	84,81	19,20	759,97	14,40	1444	93,00	0	65,97	221,50	3,60	97,00	353,00	30,30	36,00	52,00	34,00	36,00
	60	2,64	43,96	84,67	24,50	829,90	13,70	1373	164,00	0	65,21	190,20	4,10	177,00	396,00	30,60	40,00	57,00	36,20	36,70
	80	3,26	40,78	84,53	28,20	915,48	12,20	1223	300,00	0	69,02	143,00	4,90	308,00	424,00	30,80	41,00	59,00	36,40	38,40
	100	3,66	36,59	85,41	32,10	975,66	10,80	1083	507,00	0	71,30	106,90	5,70	535,00	454,00	31,10	42,00			
	120	4,66	38,81	84,58	32,20	1013,37	9,60	746	662,00	0	73,02	84,90	6,50	708,00	476,00	31,30	42,00			
B 40	40	1,93	48,34	84,58	19,20	752,42	14,10	1652	88,00	16	67,87	207,30	3,80	93,00	350,00	31,30	33,00	38,30	31,90	33,60
	60	2,51	41,84	85,41	23,30	831,89	12,80	1362	167,00	0	69,33	158,00	4,50	176,00	394,00	31,60	36,00	46,60	33,40	36,40
	80	3,09	38,68	85,32	27,10	925,27	11,60	1119	256,00	0	70,93	124,70	5,20	268,00	426,00	31,70	36,00	49,60	33,50	37,20
	100	3,44	34,40	86,28	28,20	979,07	10,70	1307	366,00	0	71,42	106,90	5,70	381,00	457,00	31,70	34,00	55,60	32,40	39,90
	120	4,31	35,95	85,72	31,90	1024,41	9,70	740	613,00	0	73,06	86,60	6,30	660,00	472,00	31,80	35,00	58,40	32,80	40,10
B 60	40	1,93	48,17	84,64	19,10	742,32	14,10	1743	100,00	29	67,78	207,30	3,90	103,00	347,00	27,40	36,00	38,90	33,00	32,40
	60	2,42	40,36	85,92	24,00	835,20	13,00	1397	164,00	24	68,05	167,90	4,50	170,00	396,00	27,80	40,00	47,80	35,40	34,70
	80	3,15	39,32	85,08	27,40	917,37	11,70	1407	243,00	15	70,16	127,10	5,20	239,00	428,00	27,60	42,00	51,90	37,20	36,30
	100	3,73	37,31	85,12	30,80	1000,39	10,70	1198	334,00	0	71,24	104,90	5,80	350,00	456,00	28,10	44,00	56,20	38,00	36,40
	120	4,23	35,27	85,99	33,70	1015,43	9,60	707	648,00	0	73,20	84,90	6,40	689,00	470,00	28,20	46,00	58,60	39,20	39,50
B 80	40	1,92	48,09	84,67	20,20	764,34	14,40	1528	94,00	9	66,23	226,50	3,60	95,00	350,00	29,80	38,00	45,10	34,20	33,60
	60	2,53	42,18	85,29	23,40	857,25	13,00	1434	168,00	13	68,50	167,90	4,50	177,00	393,00	30,00	39,00	50,70	35,30	34,60
	80	3,15	39,42	85,04	27,40	937,98	11,70	1464	242,00	11	70,31	127,10	5,20	250,00	428,00	29,60	42,00	55,40	37,40	36,40
	100	3,53	35,26	85,94	30,80	1021,79	10,80	1123	338,00	0	71,25	106,90	5,80	355,00	452,00	28,40	44,00	57,60	38,40	37,80
	120	4,40	36,67	85,43	33,40	1040,48	9,70	717	638,00	0	73,20	86,60	6,40	679,00	466,00	28,10	45,00	58,10	38,60	38,00
B 100	40	1,77	44,26	85,89	20,90	765,70	14,60	1243	82,00	11	65,19	237,00	3,50	84,00	350,00	30,10	38,00	39,70	34,40	33,50
	60	2,48	41,26	85,61	23,50	834,92	12,90	1447	159,00	16	69,05	164,50	4,50	168,00	391,00	29,80	38,00	44,20	34,60	33,60
	80	2,94	36,73	86,06	26,70	910,08	11,70	1393	224,00	9	70,57	127,10	5,20	234,00	424,00	29,00	38,00	47,80	34,60	33,60
	100	3,45	34,48	86,25	30,00	973,08	10,70	1074	351,00	0	71,75	102,90	5,80	372,00	449,00	28,70	38,00	50,20	34,90	35,10
	120	4,44	36,97	85,32	32,50	1025,70	9,60	697	665,00	0	73,51	83,30	6,40	706,00	465,00	28,30	39,00	54,40	35,30	35,20

Anexo 5 – Dados das emissões convertidos de ppm para g/kW.h

Potência (kW)	Massa			Emissões							Misturas	Massa média m ponto (kg/h)	Emissões				Eficiência Calculada (%)
	Diesel (kg/h)	Ar (kg/h)	Gás (kg/h)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	NO (ppm)	O ₂ (%)	NO _x (ppm)	SO ₂ (ppm)	Xair (%)			CO (g/kWh)	NO (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	SO ₂ (g/kWh)	
40,0	12,51	796,7774		162	4,7	290	14,60	304	0	231,70		809,29	3,055	5,468	5,732	0,000	69,50
60,0	16,44	900,0944		142	5,5	396	13,50	407	0	182,40		916,53	2,022	5,638	5,794	0,000	69,84
80,0	20,66	1014,791		155	6,2	470	12,50	496	0	148,80	B5	1035,45	1,870	5,670	5,983	0,000	70,59
100,0	24,86	1142,764		180	6,9	559	11,60	584	0	122,30		1167,62	1,959	6,083	6,355	0,000	70,65
120,0	29,59	1270,341		205	7,5	644	10,80	683	0	106,90		1299,93	2,070	6,502	6,896	0,000	70,89
40,0	1,90	820,0973	13,31	1243	3,5	82	14,60	84	11	237,00		835,31	24,192	1,596	1,635	0,131	65,19
60,0	2,64	891,7803	17,13	1447	4,5	159	12,90	168	16	164,50		911,55	20,489	2,251	2,379	0,116	69,05
80,0	3,26	966,7575	19,40	1393	5,2	224	11,70	234	9	127,10	B20	989,42	16,057	2,582	2,697	0,041	70,57
100,0	3,66	1029,062	22,19	1074	5,8	351	10,70	372	0	102,90		1054,92	10,559	3,451	3,657	0,000	71,75
120,0	4,66	1114,985	22,49	697	6,4	665	9,60	706	0	83,30		1142,13	6,183	5,899	6,263	0,000	73,51
40,0	1,93	824,6504	13,46	1528	3,6	94	14,40	95	9	226,50		840,04	29,907	1,840	1,859	0,130	66,23
60,0	2,51	916,5184	16,25	1434	4,5	168	13,00	177	13	167,90		935,28	20,833	2,441	2,571	0,101	68,50
80,0	3,09	1000,246	18,82	1464	5,2	242	11,70	250	11	127,10	B40	1022,16	17,433	2,882	2,977	0,058	70,31
100,0	3,44	1080,229	19,32	1123	5,8	338	10,80	355	0	106,90		1102,99	11,544	3,475	3,649	0,000	71,25
120,0	4,31	1099,284	21,93	717	6,4	638	9,70	679	0	86,60		1125,52	6,268	5,577	5,936	0,000	73,20
40,0	1,93	804,0388	13,45	1743	3,9	100	14,10	103	29	207,30		819,42	33,278	1,909	1,967	0,466	67,78
60,0	2,42	897,8811	16,60	1397	4,5	164	13,00	170	24	167,90		916,90	19,897	2,336	2,421	0,184	68,05
80,0	3,15	981,1156	19,02	1407	5,2	243	11,70	239	15	127,10	B60	1003,29	16,445	2,840	2,793	0,073	70,16
100,0	3,73	1069,564	21,30	1198	5,8	334	10,70	350	0	104,90		1094,60	12,222	3,407	3,571	0,000	71,24
120,0	4,23	1074,878	23,10	707	6,4	648	9,60	689	0	84,90		1102,21	6,052	5,547	5,898	0,000	73,20
40,0	1,92	811,7897	14,03	1652	3,8	88	14,10	93	16	207,30		827,74	31,861	1,697	1,794	0,247	67,87
60,0	2,53	894,6082	16,47	1362	4,5	167	12,80	176	0	158,00		913,61	19,329	2,370	2,498	0,000	69,33
80,0	3,15	989,2484	18,93	1119	5,2	256	11,60	268	0	124,70	B80	1011,33	13,184	3,016	3,158	0,000	70,93
100,0	3,53	1042,051	21,35	1307	5,7	366	10,70	381	0	106,90		1066,93	12,996	3,639	3,789	0,000	71,42
120,0	4,40	1089,604	23,10	740	6,3	613	9,70	660	0	86,60		1117,10	6,420	5,318	5,726	0,000	73,06
40,0	1,77	829,3923	14,89	1444	3,6	93	14,40	97	0	221,50		846,05	28,466	1,833	1,912	0,000	65,97
60,0	2,48	906,6062	16,70	1373	4,1	164	13,70	177	0	190,20		925,79	19,744	2,358	2,545	0,000	65,21
80,0	2,94	1002,745	19,22	1223	4,9	300	12,20	308	0	143,00	B100	1024,90	14,603	3,582	3,678	0,000	69,02
100,0	3,45	1069,733	21,33	1083	5,7	507	10,80	535	0	106,90		1094,51	11,048	5,172	5,457	0,000	71,30
120,0	4,44	1112,546	23,17	746	6,5	662	9,60	708	0	84,90		1140,16	6,606	5,862	6,270	0,000	73,02