



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia mecânica
- Mestrado - Doutorado

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INJEÇÃO DE GÁS
NATURAL VEICULAR EM MOTOR DE IGNIÇÃO POR
COMPRESSÃO COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE
BIODIESEL**

Por

Filipe Rocha Gouveia

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal
da Paraíba para obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Mecânica

João Pessoa, Paraíba

Agosto, 2021

Filipe Rocha Gouveia

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INJEÇÃO DE GÁS
NATURAL VEICULAR EM MOTOR DE IGNIÇÃO POR
COMPRESSÃO COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE
BIODIESEL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento
às exigências para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Profº Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

João Pessoa, Paraíba

Agosto, 2021

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INJEÇÃO DE GÁS NATURAL
VEICULAR EM MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO EM
DIFERENTES PROPORÇÕES DE BIODIESEL**

por

Filipe Rocha Gouveia

Tese aprovada em 08 de outubro de 2021



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS

Orientador - UFPB



Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO

Examinador Interno - UFPB



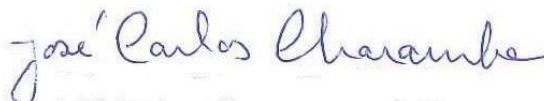
Prof. Dr. JOSÉ MAURÍCIO ALVES DE MATOS GURGEL

Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. ALVARO ANTONIO OCHOA VILLA

Examinador Externo – IFPE



Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA

Examinador Externo – UFPE

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G719a Gouveia, Filipe Rocha.

Avaliação experimental da injeção de gás natural
veicular em motor de ignição por compressão com
diferentes proporções de biodiesel / Filipe Rocha
Gouveia. - João Pessoa, 2021.

109 f. : il.

Orientação: Carlos Antônio Cabral dos Santos.
Tese (Doutorado) - UFPB/Tecnologia.

1. Motor diesel. 2. Gás Natural Veicular - GNV. 3.
Biodiesel. 4. Emissões de poluentes. I. Santos, Carlos
Antônio Cabral dos. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621.436(043)

Elaborado por Gracilene Barbosa Figueiredo - CRB-15/794

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Valtergralson Bandeira Gouveia e Maria Leda Dias Rocha, que sempre me apoiaram e são fontes de amor, carinho e dedicação em minha vida;

A minha irmã Gabriela Rocha Gouveia, a qual sempre me encorajou nos desafios da vida.

Aqueles que fizeram parte desse estudo de forma direta e indiretamente contribuindo para o avanço da pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades mostradas ao longo da minha trajetória de vida, e pela força para continuar nessa luta constante.

Agradeço a Maria, Mãe de Deus e de todos os homens, pela companhia e bênçãos obtidas em minha vida pessoal e acadêmica.

Agradeço a minha família, minha mãe Maria Lêda Dias Rocha, ao meu Pai Valtergralson Bandeira Gouveia, por todo apoio e investimento em minha educação e formação acadêmica.

Agradeço a minha namorada, Paula Carolina Ramos Leitão Nicolau, que sempre me incentivou muito na área dos estudos e é fonte de inspiração em minhas jornadas.

Agradeço a meus amigos de formação acadêmica que deram suporte bem como aos amigos profissionais e amigos em geral que sempre deram força e apoio.

Agradeço em especial ao Prof. Dr. Carlos Antonio Cabral dos Santos, meu orientador, e aos colegas do doutorado, agradeço pelos aprendizados e apoio.

Agradeço em especial ao Prof. Dr. Lesso Benedito dos Santos por todo apoio e dedicação em prol da realização do projeto.

Agradeço a Bosch Diesel na pessoa do Sr. Christian Wanhfried, gerente da área de biocombustíveis, pela contribuição com informações técnicas e atenção cedida.

Agradeço ao Cogencasa – UFPE e Jorge Migues Ricartes do PPGEM – UFPE, pela contribuição com a doação do combustível Biodiesel.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a elaboração dessa tese.

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INJEÇÃO DE GÁS NATURAL VEICULAR EM MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE BIODIESEL

RESUMO

O presente trabalho avalia a utilização do gás natural veicular com diferentes proporções de biodiesel, a fim de obter a correta proporção de utilização. A correta proporção é selecionada com base no melhor rendimento e na maior redução das emissões de poluentes. São avaliados os níveis de emissões de poluentes, opacidade, torque, potência e consumo dos combustíveis ensaiados em um motor MWM 4.07 TCE. Este motor possui um sistema de injeção eletrônico, que foi adaptado no laboratório de ensaios motores e emissões – UFPB. A adaptação visa reduzir o tempo de injeção do biodiesel por ciclo e compensar com injeção de GNV. Desta forma foi possível a utilização de GNV e Biodiesel. Na combustão do gás natural e do Biodiesel, o Biodiesel tem a função de produzir a ignição do gás natural, sendo possível a substituição de elevada porcentagem de Biodiesel na mistura. De tal forma é possível ter o GNV como combustível principal e biodiesel como ignitor. A avaliação dos dados obtidos em ensaios dinamométricos e de emissões de poluentes, e de opacidade dos gases de exaustão são utilizadas para determinar qual melhor proporção de utilização dos combustíveis. Para melhor análise dos resultados foram elaborados gráficos e tabelas contendo informações de torque, potência, consumo e emissões dos principais poluentes. Estes resultados são das misturas de Biodiesel nas proporções de B10, B20 e B50 e também aplicados juntos com GNV. É possível verificar uma variação de potência e torque com acréscimo de biodiesel nas misturas bem como com a utilização em conjunto com GNV. Também se analisa o efeito da variação da porcentagem de biodiesel e de sua aplicação em conjunto com GNV em relação ao consumo. Ainda foi feita uma análise para o consumo específico da aplicação de Biodiesel e Biodiesel em conjunto com GNV. Em relação as emissões dos gases, foram analisados: CO, O₂, CO₂, HC, NO_x e opacidade.

Palavras-chaves: Gás Natural Veicular, Biodiesel, Rendimento, Emissões de poluentes, Opacidade.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF VEHICULAR NATURAL GAS INJECTION IN A COMPRESSION IGNITION ENGINE IN DIFFERENT PROPORTIONS OF BIODIESEL

ABSTRACT

The present work evaluates the use of vehicular natural gas with different proportions of biodiesel in order to obtain the correct proportion of use. The correct proportion is selected based on the best performance and the greatest reduction in pollutant emissions. The levels of pollutant emissions, opacity, torque, power and fuel consumption tested in a MWM 4.07 TCE engine are evaluated. This engine has an electronic injection system, which was adapted in the engine and emissions testing laboratory - UFPB. The adaptation aims to reduce the biodiesel injection time per cycle and compensate with CNG injection. In this way it was possible to use CNG and Biodiesel. In the combustion of natural gas and Biodiesel, Biodiesel has the function of producing the ignition of natural gas, making it possible to replace a high percentage of Biodiesel in the mixture. In such a way it is possible to have CNG as the main fuel and biodiesel as an ignitor. The evaluation of the data obtained in dynamometric tests and pollutant emissions, and exhaust gas opacity are used to determine which is the best proportion of fuel use. For a better analysis of the results, graphs and tables were prepared containing information on torque, power, consumption and emissions of the main pollutants. These results are from the Biodiesel mixtures in the proportions of B10, B20 and B50 and also when applied together with CNG. It is possible to verify a variation of power and torque with the addition of biodiesel in the mixtures as well as with the use in conjunction with CNG. The effect of varying the percentage of biodiesel and its application together with CNG in relation to consumption is also analyzed. An analysis was also made for the specific consumption of the application of Biodiesel and Biodiesel in conjunction with CNG. Regarding gas emissions, the following were analyzed: CO, O₂, CO₂, HC, NO_x and opacity.

Keywords: Natural Gas, Biodiesel, Yield, Pollutant Emissions, Opacity.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	3
AGRADECIMENTOS.....	6
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS.....	15
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	17
1.1 INTRODUÇÃO	17
1.2 JUSTIFICATIVA	22
1.3 MOTIVAÇÃO	24
1.4 OBJETIVOS	24
1.4.1 Geral	24
1.4.2 Específicos	25
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 O ESTUDO DE MOTORES DIESEL DUAL FUEL.....	26
CAPÍTULO III – FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....	30
3.1 COMBUSTÃO	30
3.2 CONCEITOS RELACIONADOS A MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	31
3.3 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO	32
3.3.1 Etanol	32
3.3.2 Gás Natural.....	36
3.3.3 Óleo Diesel	40
3.3.4 Biodiesel	44
3.4 PODER CALORÍFICO DE UM COMBUSTÍVEL	50
3.5 ANALISADOR DE POTÊNCIA.....	53
3.5.1 Dinamômetro Hidráulico.....	54
3.5.2 Dinamômetro Elétrico	55
3.6 EMISSÕES DOS PRINCIPAIS GASES POLUENTES MOTORES ICO	57
3.6.1 Hidrocarbonetos.....	57
3.6.2 Monóxidos de Carbono	58

3.6.3 Óxidos de Nitrogênio.....	60
3.6.4 Material Particulado.....	61
CAPÍTULO IV – MATERIAS.....	62
4.1 SETUP DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	62
4.2 MOTOR MWM 4.07 TCE.....	62
4.3 ACOPLAMENTO MOTOR DINAMÔMETRO	64
4.4 DINAMÔMETRO	65
4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO DINAMÔMETRO.....	65
4.6 RESERVATÓRIOS DE COMBUSTÍVEIS E BALANÇAS DE MEDIÇÃO	66
4.6.1 Reservatório do combustível óleo Diesel	66
4.6.2 Reservatório do combustível GNV	67
4.7 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO GÁS NATURAL VEICULAR (GNV)	69
4.7.1 Reservatório de GNV	69
4.7.2 Redutor de pressão NG2-2	69
4.7.3 Eletroválvulas de injeção do GNV	70
4.8 SISTEMA DE CONTROLE DE INJEÇÃO BIODIESEL - GNV.....	71
4.9 SCANNER NAPRO PC TRUCK 5000.....	74
4.10 ANALISADORES DE EMISSÕES	76
4.10.1 Analisador de gases PC-MULTIGÁS	76
4.10.2 Analisador de Opacidade NA9000.....	77
CAPÍTULO V – METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	79
5.1 CONFEÇÃO DO ACOPLAMENTO MOTOR E DINAMÔMETRO.	79
5.2 PREPARAÇÃO DAS MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS.	80
5.3 ENSAIOS DINAMOMÉTRICOS.	82
5.4 MEDIÇÃO DOS GASES DE EXAUSTÃO E OPACIDADE.....	83
5.5 MEDIÇÃO DO CONSUMO DAS MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS ENSAIADAS.	87
CAPÍTULO VI - RESULTADOS E ANALISES.....	89
6.1 CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS ENSAIADOS.....	89
6.2 CURVAS DE EMISSÕES DOS GASES DOS COMBUSTÍVEIS ENSAIADOS.	92
6.3 OPACIDADE NOS GASES DE EXAUSTÃO.	97
6.4 CURVAS DE CONSUMO DOS COMBUSTÍVEIS ENSAIADOS.	99
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	102
7.1 CONCLUSÕES.....	102

7.2 SUGESTÕES.....	104
REFERÊNCIAS.....	106
APÊNDICE I.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuidoras de gás canalizado no Brasil.....	18
Figura 2 - Consumo de gás natural no Brasil em 2019, por segmento.....	19
Figura 3 - Capacidade nominal autorizada e consumo de Biodiesel em 2019	21
Figura 4 - Evolução do marco legal do biodiesel.....	46
Figura 5 – Bomba calorimétrica	51
Figura 6 – Esquema de um freio dinamométrico.....	54
Figura 7 – Ilustração do funcionamento do dinamômetro hidráulico.....	55
Figura 8 – Dinamômetro de corrente foucault.....	56
Figura 9 – Setup do experimento	62
Figura 10 - Motor MWM 4.07 TCE.....	63
Figura 11 – Identificação do Motor MWM 4.07 TCE.....	64
Figura 12 - Acomplamento Motor Dinamômetro	64
Figura 13 - Dinamômetro elétrico Logs acoplado ao motor MWM 4.07 TCE	65
Figura 14 - Sistema de Aquisição de dados do dinamômetro LOGS.....	66
Figura 15 - Reservatório de combustível óleo diesel	67
Figura 16 – Cilindro para armazenar GNV e balança de medição.....	68
Figura 17 - Conjunto Redutor de Pressão e Filtro GNV Instalado no Motor MWM 4.07 TCE	69
Figura 18– (A) Eletroválvulas; (B) Sistema de acionamento das eletroválvulas	71
Figura 19 - Sistema do controle Biodiesel-GNV utilizado na pesquisa de Santos (2015).....	72
Figura 20 - Sistema de controle Biodiesel-GNV da pesquisa em estudo.....	72
Figura 21 - Fluxograma do sistema biodiesel-GNV	74
Figura 22 - Scanner NAPRO PC TRUCK 5000	75
Figura 23 - Analisador de Gases Pc-Multigás.....	76
Figura 24 - Analisador de Opacidade NA9000.....	77
Figura 25 - Acoplamento Antaris AT versão especial acoplado e espaçador após ruptura.	79
Figura 26 – Acoplamento eixo cardan acoplado entre dinamômetro e motor.....	80
Figura 27 - Preparação das misturas de combustíveis.....	81
Figura 28 - PC Multigás analisador de gases	83
Figura 29 - Relatório das emissões de poluentes instantânea para B20 a 2000rpm.....	84
Figura 30 – Analisador de opacidade NA-9000T da Napro Eletrônica	85

Figura 31 – Relatório da opacidade dos gases e coeficiente de absorção da luz para B20 a 1000rpm.	86
Figura 32 - Recipiente e balança para medição de consumo.....	87
Figura 33 - Curvas de torque e potência com a utilização de B10, B20 e B50.....	90
Figura 34- Curvas de torque e potência com a utilização de B10+GNV, B20+GNV e B50+GNV.	91
Figura 35 - Comparação entre as curvas de torque dos combustíveis ensaiados	91
Figura 36 - Comparação entre as curvas de potência dos combustíveis ensaiados.....	92
Figura 37 - Comparação das curvas de CO dos combustíveis ensaiados.....	93
Figura 38 – Comparação das curvas de CO dos combustíveis ensaiados.	94
Figura 39 – Comparação das curvas de O2 dos combustíveis ensaiados.....	95
Figura 40 - Comparação das curvas de HC dos combustíveis ensaiados.....	96
Figura 41 – Comparação das curvas de NOx dos combustíveis ensaiados.....	97
Figura 42 – Comparação das curvas de opacidade dos combustíveis ensaiados.....	98
Figura 43 – Comparação das curvas de coeficiente de absorção da luz dos combustíveis ensaiado.	98
Figura 44 - Curvas de consumo de combustíveis ensaiados x Rotação	99
Figura 45 – Curvas de CEC dos combustíveis ensaiados x rotação.....	100
Figura 46 – Curvas características do motor MWM 4.07 TCA	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Especificações do EAC, EHC e EHCP	34
Tabela 2 - Características do EHC que deverão estar presentes no boletim de conformidade emitido pelo distribuidor de etanol ¹	35
Tabela 3 - Especificação do corante a ser adicionado ao EAC.....	36
Tabela 4 - Especificação para o Gás Natural Comercializado no Brasil.....	37
Tabela 5 - Especificação do óleo Diesel Bx a B30.....	40
Tabela 6 - Ponto de Entupimento de Filtro a Frio	43
Tabela 7 – Especificação de Biodiesel	46
Tabela 8 – Ponto de Entupimento de Filtro a Frio	50
Tabela 9 - Fontes e características dos poluentes Hidrocarbonetos (HC)	58
Tabela 10 - Fontes e características dos poluentes Monóxido de Carbono (CO).....	59
Tabela 11 - Fontes e características dos poluentes Óxido de Nitrogênio (NOx)	60
Tabela 12 – Fontes e características dos poluentes Material Particulado.....	61
Tabela 13– Especificações Técnica do Redutor de pressão NG2 - Landi Renzo.....	70
Tabela 14 - Características do NA9000	77
Tabela 15 - Média de consumo da massa de combustível com diesel/biodiesel.....	88
Tabela 16 - Média de consumo de massa de combustível dual (diesel/biodiesel + GNV)	88
Tabela 17 – Comparativo dos parâmetros analisados entre os combustíveis analisados	101

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

EDC	Controle eletrônico diesel
GNV	Gás natural veicular
ICE	Ignição por centelha
ICO	Ignição por compressão
MCI	Motor de combustão interna
NTC	Coeficiente negativo de temperatura
PME	Pressão média efetiva
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
SCR	Sistema Common Rail
UCE	Unidade de controle eletrônico
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
NO _x	Oxido de nitrogênio
SO _x	Oxido de enxofre
CO	Monóxido de carbono
GN	Gás natural
MP	Material particulado
c_p	Calor específico à pressão constante [kJ/kg °C]
c_v	Calor específico à volume constante [kJ/kg °C]
r_c	Taxa de compressão
O ₂	Oxigênio
$\dot{m}$	Vazão massica [kg/s]
$\dot{Q}$	Fluxo de Calor [kW]
$\dot{W}$	Potência [kW]
M	Massa [kg]
E	Energia [kJ]

g	Aceleração da Gravidade [m/s^2]
H	Entalpia [kJ]
h	Entalpia Específica [kJ/kg]
k	Razão entre calores específicos a Pressão e a Volume Constantes
P	Pressão [kPa]
Q	Calor [kJ]
q	Calor por unidade de massa [kJ/kg]
R	Constante Universal dos Gases [kJ/kg K]
S	Entropia [kJ]
s	Entropia Específica [kJ/kg]
T	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
t	Tempo [s]
U	Energia interna [kJ]
u	Energia interna específica [kJ/kg]
V	Velocidade [m/s]
V	Volume [m^3]
v	Volume Específico [m^3/kg]
W	Trabalho [kJ]
w	Trabalho específico [kJ/kg]
η_t	Eficiência Térmica pela 1ª Lei da Termodinâmica

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A saída para a crise energética passa por investimentos em fontes de energia renovável capazes de trazer uma maior diversificação para a matriz energética brasileira. O investimento em eficiência energética tem o potencial de trazer diversos benefícios para a indústria, que vão desde o aumento da vida útil dos equipamentos e redução dos custos operacionais até o aumento da produtividade e a possibilidade de isenções fiscais.

Com o aumento da emissão de poluentes, grande degradação da camada de ozônio e uma busca do governo para reduzir a importação de petróleo, medidas para diminuir a dependência de combustíveis derivados de petróleo e diminuição da emissão de poluentes fazem-se necessárias. Entre as medidas adotadas, encontra-se a alternativa do gás natural, um combustível menos poluente, de baixo custo e abundante, que pode substituir com vantagens outros combustíveis oriundos do petróleo em quase todas as aplicações, inclusive para alimentar motores de combustão interna.

Somente após a crise energética dos anos 70 e, principalmente, ao longo dos anos 90, é que vários países menos industrializados, verificando a experiência das nações mais desenvolvidas, passaram a considerar o gás natural como uma fonte de energia privilegiada e estratégica que deve ser desenvolvida e utilizada. O mercado de gás natural vem crescendo significativamente nos últimos anos no Brasil, sendo o segmento industrial o que representa a parcela mais significativa da demanda. A crise da eletricidade em 2001 acabou trazendo o tema do desenvolvimento da indústria do gás natural para o topo da agenda. O gás natural passou a ser encarado como o combustível mais competitivo para a produção de eletricidade, reduzindo a dependência da nação da geração hídrica.

Além do uso do gás natural para geração de eletricidade, o combustível ainda possui diversas aplicações, dentre as quais destacam-se, principalmente, os consumos industrial, residencial, automotivo e na cogeração. Embora haja a figura do consumidor livre, a maior parte do gás entregue ao consumidor final é realizado pelas distribuidoras. Existem hoje 27 distribuidoras de gás (Companhias Distribuidoras Locais – CDLs) distintas no país, espalhadas pelos 23 estados e no Distrito Federal, sendo que apenas o Rio de Janeiro (2) e São Paulo (3) possuem mais de uma distribuidora nos respectivos estados. A Figura 1 ilustra as CDLs existentes ao longo do País.

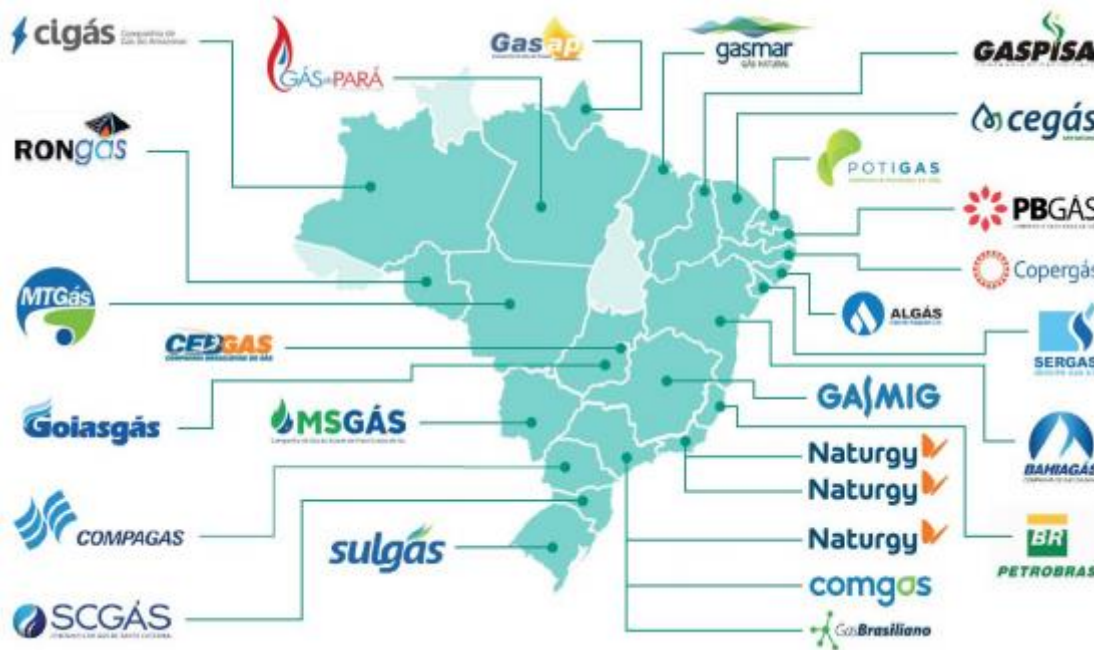


Figura 1 - Distribuidoras de gás canalizado no Brasil

Fonte: BNDES adaptado de ABEGAS (2020)

A demanda de gás natural no Brasil pode ser classificada nas categorias termelétrica e não termelétrica. A demanda não termelétrica pode ser dividida em demanda industrial, automotiva, residencial, comercial, matéria-prima e outros; enquanto a demanda termelétrica é relativa ao consumo em plantas termelétricas a gás natural e à cogeração. Segundo Ministério de Minas e Energia MME (2020) a demanda média de gás natural no ano de 2019 foi de 69,6 milhões de m³/dia distribuída pelos mais diversos setores de consumo, conforme pode ser visto na Figura 2.



Figura 2 - Consumo de gás natural no Brasil em 2019, por segmento

Fonte: empresa de pesquisa energética EPE, 2020

A demanda automotiva, embora apresente um constante aumento em termos de volume ano a ano, ainda representa uma pequena parcela (5%) da demanda de gás nacional. Com uma infraestrutura logística ainda limitada, concentra-se em grandes cidades, principalmente naquelas em que possuem algum incentivo para utilização de carros movidos a GNV e onde há uso extenso de táxis e/ou aplicativos de transporte.

O gás natural veicular se apresenta como uma alternativa energética menos poluente e como uma opção mais econômica para os usuários. Dessa forma, muito se tem a explorar com relação ao gás natural, que passou a ter um papel importante no atendimento da demanda de energia no Brasil. As atuais reservas de gás natural garantem um abastecimento em longo prazo. Nos últimos anos novas jazidas foram descobertas.

Outro combustível que vem em crescente demanda é o biodiesel. Pela sua natureza orgânica, este, é considerado um combustível totalmente limpo, orgânico e renovável. Sua principal finalidade é de substituir o óleo diesel usado em automóveis pesados como caminhões e ônibus. Ele pode ser usado em motores a combustão interna com ignição por compressão ou para geração de outro tipo de energia que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil. É um biocombustível feito a partir de biomassa, (matéria orgânica de origem vegetal ou animal) como por exemplo, plantas (óleos vegetais) ou de animais (gordura animal). É obtido através de fontes renováveis, desde que atenda as especificações da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis),

órgão regulador das atividades que integram as indústrias de petróleo e gás natural e de biocombustíveis no Brasil.

Desde o início do Programa de Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) em 2005, já foram produzidos, até dezembro de 2019, mais de 40,6 bilhões de litros deste biocombustível. Comparativamente, o Brasil continua entre os três maiores produtores e consumidores de biodiesel no ranking internacional, junto a EUA e Indonésia. Segundo dados da ANP, o setor de biodiesel brasileiro registrou um total de 51 usinas produtoras em dezembro de 2019, com maior concentração nas regiões Centro-Oeste e no Sul do país (ANP, 2020).

Em 2005 foi instituído o uso obrigatório do biodiesel na mistura com o diesel fóssil, através da Lei nº 11.097/2005, observou-se uma rápida evolução para a adição do biocombustível em maiores teores. O valor inicial foi fixado em 2% em volume, em 2008, alcançando 5% já em 2010, quando o previsto ocorreria somente em 2013. Nos anos subsequentes, houve a elevação gradual dos percentuais mínimos obrigatórios no diesel B, chegando a 12% em março de 2020. A Lei nº 13.263/2016 autorizou o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) a elevar o percentual de biodiesel na mistura até o patamar de 15%, desde que obedecidas as condicionantes de aprovação de testes nos motores para esse teor. Nesse contexto, a Resolução CNPE nº 16/2018 propôs um cronograma de aumento do percentual de biodiesel na mistura com o diesel de 1% ao ano, atingindo 15%, em 2023 (CNPE, 2018).

Segundo dados da ANP, em dezembro de 2019 a capacidade instalada correspondeu a 9,3 bilhões de litros, dividida entre as 51 usinas produtoras autorizadas. A Figura 3 apresenta a capacidade autorizada anual, com distinção para as usinas que possuem Selo Combustível Social (SCS), assim como indica o consumo anual, demonstrando o efeito de sobre capacidade desde 2008 (ANP, 2020). Observa-se que a produção em 2019 correspondeu a 63% da capacidade instalada no país, o que demonstra que há potencial para o crescimento da produção deste biocombustível (ANP, 2020).

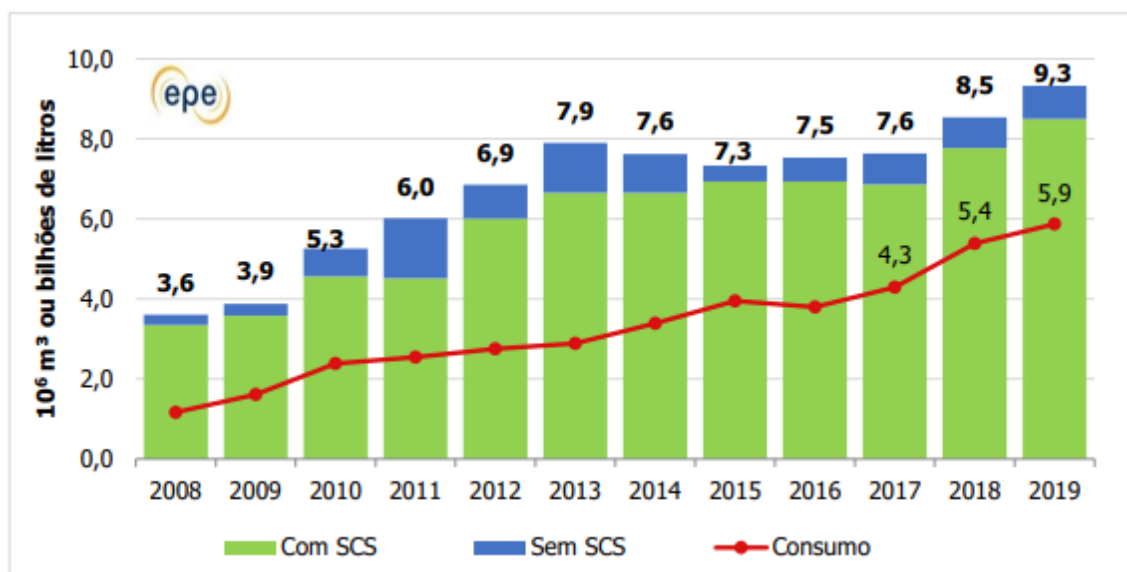


Figura 3 - Capacidade nominal autorizada e consumo de Biodiesel em 2019

Fonte: empresa de pesquisa energética EPE, 2020

Nota: O Selo Combustível Social (SCS) é uma distinção conferida às empresas produtoras de biodiesel que utilizam, em sua cadeia produtiva, produtos oriundos da agricultura familiar. O objetivo é a garantia de renda e estímulo à inclusão social das famílias produtoras. As empresas produtoras de biodiesel e detentoras do SCS são beneficiadas com o acesso a melhores condições de financiamento junto às instituições financeiras.

Devido aos benefícios ambientais e econômicos, bem como a ampla capacidade de obtenção dos combustíveis GNV e Biodiesel, o estudo em questão busca avaliar a utilização de misturas de tais combustíveis em várias proporções para obter a porcentagem que possa trazer a maior aproveitamento da energia e menor emissão de poluentes.

Sabe-se que o gás natural tem um índice de octanas muito elevado, podendo chegar a 140 octanas. Tal índice, é um índice empírico que mede a capacidade de uma mistura estequiométrica de um combustível com ar, de suportar pressões elevadas sem entrar em combustão espontânea. Nos motores ICO (ignição por compressão), a combustão ocorre espontaneamente devido à alta pressão a que fica submetido o ar, na câmara de combustão, onde o combustível Diesel é injetado. Portanto, se um motor Diesel for alimentado apenas por gás natural, não haverá combustão porque o gás natural tem um elevado índice de octanas e, portanto, suporta a elevada taxa de compressão sem entrar em combustão. Isso configura um problema, um motor de ignição por compressão, em condições normais, não funciona com gás natural.

Para solução tem-se a alternativa da aplicação de um motor dual ou bicomcombustível. Um motor dual é aquele que trabalha simultaneamente com dois combustíveis e, em geral,

são motores ciclo Diesel que trabalham com óleo Diesel e outro combustível que pode ser gasoso ou líquido vaporizado. Nesse caso, o gás ou vapor é introduzido juntamente com o ar na fase de admissão, e a ignição é efetuada por uma injeção-piloto de óleo diesel. O óleo Diesel continua sendo usado normalmente, porém apenas como combustível piloto para proporcionar a ignição por compressão, dando início à combustão do combustível principal (gás ou líquido vaporizado) que é admitido no cilindro pelo coletor de admissão, semelhante à alimentação de um motor de ciclo Otto. Esse sistema apresenta a vantagem de não exigir modificações no motor.

Para tanto, no laboratório de estudos motores e emissões (LEME – UFPB), foi desenvolvido e adaptado um sistema de injeção capaz de possibilitar a injeção de forma simultânea do Diesel/Biodiesel e GNV em um motor de ciclo Diesel, sem realizar alterações no motor, proporcionando a aplicação do motor dual.

O ensaio experimental é realizado em um motor de combustão interna de ignição por compressão, MWM 4.07 TCE, com o sistema de injeção eletrônica adaptado. O motor se encontra acoplado a um dinamômetro elétrico dotado de um sistema de aquisição de dados em tempo real, o qual permitiu o levantamento das curvas de torque e potência. Também são feitas medições de consumo dos combustíveis e de emissões de gases poluentes.

São traçadas as curvas de torque, potência, consumo e emissões de poluentes, para as proporções dos combustíveis B10, B20, B50, B10 + GNV, B20 + GNV, B50 + GNV com intuito de analisar quais proporções trazem maior rendimento e menor nível de emissões de poluentes.

1.2 JUSTIFICATIVA

A degradação dos recursos naturais finitos pode trazer um futuro desastroso para a humanidade, por isso a necessidade de um planeta sustentável, que garanta vida digna às próximas gerações. A utilização de fontes renováveis de energia é essencial para garantir o futuro da humanidade.

O desenvolvimento de tecnologia de aplicação de diesel/biodiesel com GNV traz contribuições na qualidade de vida e reduções econômicas para o país, pois se espera proporcionar redução de emissão de poluentes e geração de emprego e renda a partir da inserção de pontos de vendas de GNV e de mão de obra qualificada para manutenção dessas máquinas, aspectos estes que justificam a importância da pesquisa aqui apresentada.

Assim é importante considerar que o uso do biodiesel com gás natural permitirá ganhos para economia nacional a partir da redução das importações brasileira de óleo diesel, bem como, vai reforçar o uso de fontes renováveis de energia e a diversificação da matriz energética brasileira.

A utilização do biodiesel com Gás Natural Veicular, que apresenta importantes vantagens técnicas, se comparadas com os combustíveis tradicionais, gasolina, álcool e óleo diesel, o indica como alternativa promissora em termos de combustível automotivo.

As principais vantagens em se utilizar o Gás Natural como combustível são:

- Custo relativamente baixo com relação a outros combustíveis;
- Emite menos poluentes;
- Não é tóxico com o ar;
- Menor densidade que o ar, possibilitando assim uma rápida dissipação na atmosfera em caso de fuga.

Algumas vantagens em utilizar o biodiesel como combustível, em substituição ao óleo diesel são:

- É produzido de matérias-primas renováveis;
- É biodegradável;
- Reduz a emissão de gases poluentes (exceto óxido de nitrogênio, NO_x);
- Tem um alto ponto de fulgor;
- Suas propriedades são compatíveis com o óleo diesel.

A aplicação do biodiesel com gás natural surge, como fonte de energias alternativas nos diversos setores da economia, principalmente no setor de transporte urbano de passageiros.

Diante de todos os argumentos que foram expostos, desejamos desenvolver um estudo que seja capaz de determinar a melhor proporção de combustível visando o rendimento do motor e menor nível de poluentes, através de testes experimentais em um motor do ciclo diesel dual que utiliza biodiesel e gás natural a fim de que possa proporcionar uma combustão onde seja retirado o máximo trabalho de eixo possível obtendo, dessa forma, o maior rendimento do motor, redução de custos de funcionamento da máquina e, ainda, redução de elementos nocivos ao meio ambiente e, conseqüentemente, maior preservação deste.

1.3 MOTIVAÇÃO

A motivação para realização deste trabalho vem da busca por tecnologia que contribua para menor impacto ao meio ambiente e maior eficiência na utilização do moto de combustão interna ciclo Diesel. Tal pesquisa foi desenvolvida no CT-DEM-LABES, Labes 05 – Laboratório de Estudos Motores e Emissões da UFPB, o qual o Prof. Dr. Lesso Benedito dos Santos começou as pesquisas em sua tese: “ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA E CONTROLE ELETRÔNICO NA UTILIZAÇÃO CONJUNTA DE BIODIESEL - GNV EM MOTORES DO CICLO DIESEL”, aqui referenciada como SANTOS (2015).

A pesquisa de SANTOS (2015) foi precursora e serviu como base para fundamentação de minha dissertação: “ANÁLISE DA INJEÇÃO DE GÁS NATURAL VEICULAR EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO COM USO DE BIODIESEL EM DIFERENTES PROPORÇÕES”, e posteriormente para essa tese de doutorado.

Ainda há outro trabalho no mesmo sistema, motor dinamômetro, que foi desenvolvida conjuntamente a essa pesquisa. A pesquisa de Márcio Andrade Rocha em sua tese de doutorado: “ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DO MOMENTO IDEAL DA INJEÇÃO DE GÁS NATURAL VEICULAR (GNV) EM UM MOTOR DO CICLO DIESEL DUAL UTILIZANDO BIODIESEL E GÁS NATURAL”.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização de gás natural veicular com diferentes proporções de Diesel/Biodiesel a fim de analisar a proporção de injeção dos combustíveis que irá trazer o melhor rendimento de combustão e menor nível de emissão de poluentes e opacidade.

1.4.2 Específicos

- ✓ Analisar os resultados obtidos nos ensaios com o motor de combustão interna ciclo Diesel e realizar comparação entre os parâmetros analisados de cada combustível, a fim de melhorar o rendimento da combustão.
- ✓ Definir qual proporção de combustível se consegue maior torque e potência analisando os dados levantados do sistema de aquisição no dinamômetro.
- ✓ Determinar a proporção que traz melhor consumo específico de combustível analisando as diferentes proporções utilizadas.
- ✓ Analisar as emissões de gases poluentes e opacidade para cada proporção de combustível utilizada.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa etapa é feito um levantamento bibliográfico sobre trabalhos publicados referentes ao tema ou próximos a ele. Em primeira mão, esta etapa busca efetuar uma análise sobre os trabalhos de pesquisa realizados em nível mundial e publicados em revistas da área específica¹ ou mesmo livros no que tange ao tema em estudo.

A partir desta análise é possível identificar pesquisas que estão sendo desenvolvidas dentro do contexto em estudo de forma que possam vir a servir de base para identificar as tecnologias que estão sendo utilizadas no desenvolvimento de motores Diesel Dual Fuel, bem como, ideias para inovações, implementação e otimização, possibilitando assim fundamentar teoricamente tal trabalho de pesquisa.

2.1 O ESTUDO DE MOTORES DIESEL DUAL FUEL

A transformação do setor de energia no Brasil e no mundo está em um momento crucial. Em termos de fontes energéticas, o peso das renováveis é cada vez maior e este é um caminho inevitável. Com a crescente busca por eficiência energética muitas pesquisas tem sido desenvolvidas focando na utilização do gás natural veicular e biodiesel em motores estacionários e veicular do ciclo diesel e do ciclo Otto.

Nos motores recentes, o desenvolvimento da tecnologia Dual Fuel é motivada por regulamentações de emissões que requerem que limites específicos sejam cumpridos para poluentes liberados na atmosfera. O desenvolvimento também é motivado pelas potenciais economias nos custos de operação de motores Dual Fuel comparando com motores Diesel. Por esta razão, muitos motores diesel são convertidos para operar combustíveis gasosos tais como o gás natural e manter características positivas da operação com diesel (MANSOR, 2014).

O motor Dual Fuel consiste em um motor de combustão interna capaz de consumir dois tipos de combustíveis, em geral, um líquido e outro gasoso, de valor mais barato, mantendo níveis de desempenho e emissão de poluentes satisfatórios (FIGUERAL, 2016).

¹ Buscaram-se artigos publicados no periódico CAPES na área térmica da engenharia, dissertação de mestrado, teses de doutorado e também livros.

Vários combustíveis já têm sido implementados com sucesso no conceito de Dual Fuel, são alguns: gás liquefeito de petróleo (GLP), Gás natural (GN), gasolina, etanol e diesel.

Segundo PEREIRA et al (2004) uma alternativa para a importação de óleo diesel, será a utilização do gás natural veicular em motores do ciclo diesel, mesmo que a substituição seja parcial. Uma alternativa para a redução da demanda do óleo diesel no Brasil pode ser a conversão dos motores do ciclo diesel para a utilização do gás natural em substituição parcial do óleo diesel. Foi constatado neste trabalho que motores consumindo simultaneamente óleo diesel e gás natural, apresentam rendimento térmico superior ao motor que funciona somente com óleo diesel.

Segundo FILHO e ARRUDA (2004) o gás natural veicular (GNV) surge como alternativa para utilização em larga escala nos veículos automotores. Neste sentido apresentam uma metodologia de análise de demanda por gás natural veicular, que aborda os principais atributos de preferências dos consumidores de combustíveis veiculares. Constatou-se que é imprescindível a adoção de uma política pública para tornar o GNV uma opção de combustível competitiva no mercado de combustível veicular, para tanto é necessário aumentar a infraestrutura para dar suporte a demanda da indústria automobilística.

PAMPLONA et al (2006) determinaram as vantagens e desvantagens no uso do gás natural veicular em veículos de transporte coletivo de passageiros, em comparação com veículos Diesel. Para isto desenvolveu uma análise de viabilidade econômica e financeira de aquisição de frota de ônibus urbano considerando a utilização do gás natural veicular (GNV). Através da apropriação de custos e do fluxo de caixa foi determinado Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR). Entre as três alternativas (Diesel, GNV, Diesel/GNV) a melhor foi a alternativa GNV.

Segundo, COSTA (2007) a utilização de óleo diesel e gás natural são indicados como uma das melhores formas para controlar emissões de poluentes oriundos de motores do ciclo diesel. Em seu trabalho foi utilizado motor do ciclo diesel trabalhando de forma dual e foi constatado uma redução na emissão de poluentes como CO, CO₂, NO e SO₂.

De acordo com FERREIRA et al (2011) o biodiesel pode ser utilizado como combustível nos motores do ciclo diesel com quase nenhuma alteração construtiva e mostra uma redução das emissões de monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_x), hidrocarbonetos totais não queimados (HTNQ), material particulado (MP) e um não conclusivo aumento das emissões de óxidos de Nitrogênio (NO_x) se comparado ao óleo

diesel. Surgindo assim uma ótima oportunidade para a utilização de uma mistura ternária de óleo diesel, biodiesel e outros compostos.

FERRAZ et al (2012) em seu trabalho de conversão de um motor Mercedes Benz, (ciclo Diesel) modelo OM 366 para o ciclo Otto (ottolização) para operar com 100% de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), foram removidos todos os componentes pertinentes a utilização do Diesel e foi instalado um sistema de ignição e um sistema de alimentação de GLP. Foram realizados testes com três taxas de compressão diferentes e a que apresentou menor consumo de combustível foi a taxa de 12,2:1, com o ângulo de avanço igual a 14°, fazendo com que o motor convertido aumentasse sua potência em até 13% em comparação com o motor original. Foi observado que as emissões dos gases se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelo CONAMA.

COSTA e COSTA (2012) estudou o comportamento de um motor CUMMINS 6CTA8.3 com capacidade de 188 kW a 1800 rpm, acoplado a um gerador de 150 kW, utilizou uma mistura de diesel com gás natural veicular numa taxa de 15% de diesel e 85% de GNV, comparando os resultados com os obtidos nas misturas de diesel e biodiesel nas proporções que crescem a intervalos de 10%, saindo de B10 a B100. Foram aplicadas cargas predefinidas de 20 kW à 120 kW em intervalos de 20 kW. Em seu trabalho foi detectado uma redução notável nas emissões de CO e CO₂ quando foi utilizado o biodiesel puro (B100).

Em seu estudo da eficiência do motor de combustão interna utilizando biogás como combustível ABREU e AVELINO (2012) comparou a eficiência deste combustível com o gás natural. O biogás é produzido da decomposição matéria orgânica tendo em sua composição metano, dióxido de carbono, ácido sulfídrico e outros, em relação ao efeito estufa, o metano é cerca de 21 vezes mais poluente que o dióxido de carbono. Com relação ao rendimento o biogás apresenta menor rendimento em comparação com o gás natural (GN) devido poder calorífico ser menor.

FAVERI et al (2013) verificou a viabilidade econômica referente a instalação de kit gás natural veicular (GNV). Para tanto foi realizada uma pesquisa descritiva com abordagem qualitativa e quantitativa por meio de estudo de caso em uma empresa de instalação de kit GNV na cidade de Criciúma-SC. Os resultados apontaram para viabilidade lucrativa, rentável e com baixo tempo de retorno do capital investido.

SANTOS (2015), descreve em sua tese de doutoramento uma análise e desenvolvimento de técnica e controle eletrônico na utilização conjunta de Biodiesel/GNV

em motores do ciclo diesel. Trata-se do desenvolvimento de um controle eletrônico a ser utilizado em um motor Diesel adaptado para funcionamento “dual” no qual uma porcentagem de GNV é injetada juntamente com o Biodiesel para funcionamento do mesmo.

MACEDO (2018), realizou a adaptação de um motor Diesel MWM, modelo D229-4 para atuar de forma Dual com diesel e gás natural. Nesta adaptação, buscou-se, principalmente, a redução nos custos de operação do motor, assim como, a diminuição da emissão de particulados para o meio ambiente. Após os ensaios comparando o motor original com o motor dual fuel, foi possível constatar uma redução no custo de operação de até 17,92 R\$/h, tendo em vista que existe variação no percentual de economia, que vai de 3,49% até 48,77%, a depender da carga aplicada. Outro fator importante, foi a redução da opacidade da fumaça oriunda da combustão.

ROCHA (2020), realizou um trabalho com objetivo de estudar o avanço de injeção de biodiesel em um motor dual de ignição por compressão utilizando gás natural Diesel/biodiesel. A determinação do ponto ideal de injeção do Diesel/biodiesel tende a proporcionar a combustão completa da mistura do Diesel/biodiesel/GNV de forma a manter a potência e o toque de motor originalmente especificado pelo fabricante com uso exclusivo de Diesel/biodiesel, sem gerar problemas como knock, aumento de poluentes lançados ao meio ambiente, diminuição da autonomia e aumento de custos. Para análise dos resultados obtidos foram elaborados gráficos e tabelas contendo informações acerca dos atrasos de ignição e variações do avanço utilizando injeção de GNV e mistura de Diesel/biodiesel em três proporções B10, B20 B50. Também foi desenvolvido um estudo dos gases emitidos. Os resultados obtidos mostraram que o uso da mistura Diesel/biodiesel/GNV proporciono aumento do Ignition delay, o avanço da injeção do combustível aumentou ainda mais o Ignition delay necessitando, portanto, de um atraso do avanço; aumento de alguns gases de emissão foram verificados e avaliados como decorrentes de utilização de misturas ricas e ou combustão incompleta.

O presente estudo visa dar continuidade à pesquisa de desenvolvimento no que tange a otimização do sistema de controle eletrônico. Para tanto, é necessário que se determine a melhor proporção de combustível para injeção de biodiesel e GNV a fim de que o motor funcione gerando máxima potência comparativamente ao indicado pelo fabricante. Tem-se ainda a expectativa de que haja uma redução na emissão de gases nocivos ao meio ambiente contribuindo, dessa forma, com a preservação ambiental.

CAPÍTULO III – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são descritos, inicialmente, os elementos conceituais necessários ao entendimento da aplicação de motores Diesel Dual Fuel.

3.1 COMBUSTÃO

Define-se combustão como sendo a reação química na qual um combustível é oxidado e uma grande quantidade de energia é liberada. Normalmente, o agente oxidante mais usado (comburente) é o oxigênio do ar atmosférico, cuja composição é basicamente oxigênio, nitrogênio e argônio. Já o combustível é qualquer material que pode ser queimado para liberar energia e que tem em sua composição entre outros elementos, carbono, hidrogênio e enxofre. Exemplos de combustíveis são o carvão, a gasolina, o diesel e o gás natural (Moran e Shapiro, 2000)

Em um processo de combustão ocorre uma reação química, na qual as ligações entre as moléculas dos reagentes são quebradas e, em seguida, os átomos e os elétrons se reagrupam para formar produtos com uma liberação de energia, podendo ser expressa por reações químicas.

Durante este processo, a massa de cada elemento permanece a mesma, o que permite escrever equações químicas e, então, resolver problemas que envolvam quantidade de vários constituintes, com conservação de massa de cada elemento. Quando se trata de combustíveis constituídos por hidrocarbonetos, substâncias comumente derivadas do óleo cru por meio de processos de destilação ou craqueamento (como por exemplo, a gasolina, o diesel, o querosene), o carbono e o hidrogênio são oxidados para formar, em geral, dióxido de carbono e água, a qual pode estar na fase gasosa, líquida ou sólida dependendo da temperatura e pressão dos produtos. Observa-se, portanto, que em toda reação de combustão é necessário a presença de oxigênio puro ou misturado com outros componentes.

O oxigênio puro é essencialmente utilizado apenas em aplicações especiais como a soldagem. Na maioria das aplicações o ar fornece o oxigênio necessário para o processo de combustão.

A composição do ar em base molar é aproximadamente de 21% de oxigênio, 78% de nitrogênio e 1% de argônio. Na solução dos problemas de combustão que envolve o ar, o

argônio é normalmente desprezado e o ar é considerado como sendo composto de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, em volume. Esta hipótese conduz a conclusão de que para cada mol de oxigênio estão envolvidos 3,76 moles (79,0/21,0) de nitrogênio. Portanto, para que ocorra a combustão completa do carbono, hidrogênio e quaisquer outros elementos que constituem o combustível necessita-se de uma quantidade mínima de ar para que estes elementos se oxidem, a qual é denominada de “ar teórico”. Para a combustão completa com a quantidade de ar teórico, os produtos consistiriam de dióxido de carbono, água, dióxido de enxofre, o nitrogênio acompanhando o oxigênio no ar e o nitrogênio contido no combustível. Nenhum oxigênio livre apareceria nos produtos.

Normalmente a quantidade de ar que abastece a combustão é maior ou menor do que a quantidade teórica. Se a quantidade de ar fornecida é menor, a combustão é dita incompleta e pode haver a ocorrência de alguns hidrocarbonetos nos produtos da combustão. Quando há apenas uma pequena deficiência de ar implica que um pouco de carbono une-se ao oxigênio para formar monóxido de carbono, CO, ao invés de dióxido de carbono, CO₂. Quando ocorre um excesso de ar pode haver pequena quantidade de CO e a quantidade exata dependerá do nível de mistura e de turbulência durante a combustão.

O excesso de ar muito alto abaixa a temperatura da chama, diminui sensivelmente a troca de calor por radiação, reduzindo a eficiência dos equipamentos. Essa é a razão pela qual o excesso de ar, sempre que possível, deve ser mantido em níveis mínimos, compatíveis com a exigência de combustão completa.

Mistura ar combustível com mais ou menos ar do que o ar estequiométrico pode ser queimada. No entanto, com misturas ricas, não haverá oxigênio suficiente para oxidar todo o carbono e hidrogênio. Os produtos são: dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O), monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂) podendo ter também (N₂). A composição dos produtos não pode ser determinada partindo de um balanço dos elementos (Heywood, 1988).

3.2 CONCEITOS RELACIONADOS A MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Segundo Martins (2006), define-se máquinas térmicas como aquelas que transformam energia térmica em energia mecânica útil. A energia provém da combustão de uma mistura combustível/comburente, liberando-se deste modo, a energia química do combustível.

Van Wylen et al. (2010), do ponto de vista termodinâmico, define motor térmico como um sistema que opera segundo um ciclo, realizando trabalho líquido positivo e trocando

calor líquido positivo. Frequentemente a denominação máquina térmica é usada num sentido mais amplo para designar todos os dispositivos que produzem trabalho através da troca de calor ou combustão, mesmo que o dispositivo não opere segundo um ciclo termodinâmico. O motor de combustão interna é um exemplo desse tipo de dispositivo e a denominação de motores térmicos é aceitável nesses casos.

Nos motores de combustão interna (MCI) o combustível e o ar necessários a combustão, se misturam, efetuando a queima dentro do cilindro do motor. Após a queima, a liberação da energia faz elevar a temperatura da mistura provocando a expansão dos gases, e assim, realizando trabalho.

Apesar do MCI operar segundo um ciclo aberto (admissão, compressão, combustão/expansão e exaustão), nas análises desses motores é importante concebê-los operando em ciclos fechados que se aproximem dos ciclos abertos. Uma das aproximações é o ciclo padrão de ar. Como exemplos de ciclo padrão ar têm-se: ciclo padrão Diesel e o ciclo padrão Otto. Os motores alternativos são classificados, ainda, de acordo com seu tipo de ignição e podem ser por compressão (ICO) ou por centelha (ICE).

Devido às propriedades químicas do diesel, nos motores que utilizam este combustível a ignição se dá por compressão, ou seja, o pistão comprime apenas o ar e com a injeção do diesel a alta pressão e temperatura acontece a autoignição do combustível (MORAN, SHAPIRO, 2008).

Nos motores ciclo Otto (a gasolina, etanol, gás, etc.) o pistão admite e comprime uma mistura ar/combustível que necessita de uma energia extra para provocar uma temperatura suficientemente alta para o início da combustão. Assim, a ignição dessa mistura se dá por uma centelha elétrica advinda de uma vela de ignição (PENIDO F., 1991).

3.3 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO

3.3.1 Etanol

O etanol é uma substância pura, composta por um único tipo de molécula (C_2H_5OH); o álcool etílico hidratado combustível (AEHC) diferencia-se do anidro (AEAC) por possuir em torno de 4% em volume de água na sua composição. O etanol anidro é utilizado para a formação da gasolina C, pois assim evita a separação de fases dada pela presença da água.

No Brasil, utiliza-se o etanol da cana-de-açúcar, ao contrário de outros países que produzem o álcool etílico a partir do milho (Estados Unidos da América) ou beterraba e trigo (países da Europa).

Segundo a resolução ANP N° 7, de 9.2.2011, o etanol combustível no Brasil é destinado aos motores de ciclo Otto. É especificado sob a forma de álcool etílico anidro combustível, que é destinado ao distribuidor para ser misturado à gasolina tipo A para a formação da gasolina tipo C, e de álcool etílico hidratado combustível, que é destinado para a venda ao consumidor final nos postos revendedores

O etanol é um composto leve, fácil de ser obtido e que se mistura facilmente com água e com a grande maioria dos líquidos de baixo peso molecular. Ele é altamente inflamável, podendo entrar em combustão, se submetido a uma fonte de calor, a partir de 13 °C.

O álcool possui um poder calorífico menor que o da gasolina e diesel, o que significa que ele gera menos energia e rende menos quilometragem por litros. Sua densidade é menor que a da água e maior que a da gasolina, e seu PH é praticamente neutro.

As moléculas dos álcoois são solúveis tanto em substâncias polares como apolares, a miscibilidade do álcool acontece devido a existência de polaridade e apolaridade em sua molécula, ou seja, o álcool é solúvel em água como também em gasolina, como exemplo.

Dentre todos os álcoois, o etanol é o mais comum de ser obtido. A composição em massa de sua molécula é de 52.24 % de Carbono, 13.13 % de Hidrogênio e 34.73 % de Oxigênio.

O poder calorífico do etanol combustível comum (etanol hidratado) é de 5,380 quilocalorias por litro (Kcal/l). Esse valor corresponde a aproximadamente 70% do poder calorífico da gasolina, calculado em 8,325 Kcal/l. É por isso que, em média, o litro do etanol faz 70% da distância que o litro da gasolina percorre, pois a energia contida em 1 litro da gasolina é 30% maior.

Um dos fatores para o menor poder calorífico do etanol é a pouca quantidade de hidrogênio (átomo com maior poder calorífico que existe) em sua cadeia e a presença do oxigênio (que tem baixo poder calorífico). Em geral, quanto maior a proporção de hidrogênio no combustível maior é seu poder calorífico.

A partir da temperatura de 13 °C, o etanol começa a emitir vapores que, em contato com outras fontes de calor, possibilita que ele entre em combustão. Essa marca é chamada de ponto de fulgor, o que não significa que ele necessariamente pegue fogo nesse ponto, apenas indica que há chances de isso acontecer caso um agente externo reaja sobre ele. Já

seu ponto de auto-ignição, temperatura mínima para que a combustão ocorre sempre mesmo sem o contato direto com uma fonte de calor, é de 363 °C.

Pelo seu baixo ponto de fulgor, o álcool é considerado uma substância inflamável, que são aquelas com ponto de fulgor menor que 70 °C. Por isso que, quando armazenado, ele traz a letra "F" em sua embalagem, acompanhada pelo desenho de uma chama. Entre os combustíveis mais comuns, apenas a gasolina tem ponto de fulgor menor que o etanol, sendo o dela de – 40 °C, enquanto o diesel e o biodiesel possuem pontos de, respectivamente, 62 °C e 130 °C.

Tabela 1- Especificações do EAC, EHC e EHCP

Característica	Unidade	Limite			Método	
		EAC	EHC	EHCP	NBR	ASTM/EN/ISO
Aspecto	-	Límpido e Isento de Impurezas (LII)			Visual	
Cor	-				Visual	
Acidez total, máx. (em miligramas de ácido acético)	mg/L	30			9866 16047	ISO 17315
Condutividade elétrica, máx.	μS/m	300			10547	ISO 17308
Massa específica a 20°C.	kg/m3	791,5 máx.	805,2 a 811,2	799,7 a 802,8	5992 15639	D4052
Teor alcoólico ⁷	% massa	99,3 mín.	92,5 a 94,6	95,5 a 96,5	5992 15639	-
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	-	6,0 a 8,0		10891	-
Teor de etanol, mín.	% volume	98,0	94,5	96,3	16041	D5501
Teor de água, máx. ¹⁰	% massa	0,7	7,5	4,5	15531 15888	E203 E1064
Teor de metanol, máx. ¹⁰	% volume	0,5			16041	
Resíduo por evaporação, máx.	mg/100 mL	5			8644	-
Teor de hidrocarbonetos, máx. ¹²	% volume	3			13993	-
Teor de cloreto, máx.	mg/kg	1			10894	D7328 D7319
Teor de sulfato, máx.	mg/kg	4			10894	D7328 D7319
Teor de ferro, máx. ¹⁵	mg/kg	5			11331	-
Teor de sódio, máx. ¹⁵	mg/kg	2			10422	-
Teor de cobre, máx.	mg/kg	0,07	-		11331	-

Teor de enxofre, máx.	mg/kg	Anotar	-	D5453 EN 15485 EN 15486 EN 15837
-----------------------	-------	--------	---	---

Tabela 2 - Características do EHC que deverão estar presentes no boletim de conformidade emitido pelo distribuidor de etanol¹

Característica	Unidade	Limite		Método	
			EHCP2	NBR	ASTM/EN
Aspecto ³				Visual	
Cor				Visual	
Condutividade elétrica, máx. ⁶				10547	ISO 17308
Massa específica a 20 °C			796,2 a 802,8	5992 15639	D4052
Teor alcoólico ^{8, 9}			95,5 a 97,7	5992 15639	
	EHC			10891	-
-	Límpido e Isento de Impurezas (LII)			8644	-
-	5	3		13993	-
µS/m	300	1		10894	D7328 D7319
kg/m ³	802,9 a 811,2	94,5	96,3	16041	D5501
% massa	92,5 a 95,4	7,5	4,5	15531 15888	E203 E106411

-	6,0 a 8,0	0,5		16041
mg/100 mL	5			

Tabela 3 - Especificação do corante a ser adicionado ao EAC

Característica	Especificação	Método
Estado físico	Líquido	Visual
Família química - Color index	Solvent Red 19 ou Solvent Red 164	-
	Solvent Yellow 174 ou Solvent Yellow 175	-
Cor	Laranja	Visual
Absorvância a 420 nm	0,150 a 0,190	
Absorvância a 530 nm	0,100 a 0,135	
Solubilidade	Totalmente solúvel em etanol anidro combustível e insolúvel em água na concentração de 15 mg/L	

(*) Republicada por ter saído no DOU de 16/04/2015, Seção 1, páginas 46 a 49, com incorreção no original.
Fonte: Resolução ANP N° 19, de 15 de abril de 2015

3.3.2 Gás Natural

O Gás Natural é um combustível fóssil que se encontra na natureza, normalmente em reservatórios profundos no subsolo, associado ou não ao petróleo. Assim como o petróleo, ele resulta da degradação da matéria orgânica, fósseis de animais e plantas pré-históricas, sendo retirado da terra através de perfurações. Inodoro, incolor e de queima mais limpa que os demais combustíveis, o Gás Natural é resultado da combinação de hidrocarbonetos gasosos, nas condições normais atmosféricas de pressão e temperatura, contendo, principalmente, metano e etano.

O Gás Natural é uma fonte de energia moderna, utilizada em países de primeiro mundo. No Brasil, o uso vem crescendo, com uma evolução rápida e constante. São inúmeras as razões e vantagens para optar por ele.

O GNV (Gás Natural Veicular) tem sido muito utilizado como combustível para veículos. Além de ser mais barato do que o álcool e a gasolina, o GNV gera um baixo índice de poluentes atmosféricos em comparação aos combustíveis fósseis. Portanto é considerado uma fonte de energia limpa.

A composição comercial do gás natural é variada e depende da composição do gás natural bruto, do mercado atendido, do uso final e do produto gás que se deseja. Apesar desta variabilidade da composição, são parâmetros fundamentais que determinam a especificação comercial do gás natural o seu teor de enxofre total, o teor de gás sulfídrico, o teor de gás carbônico, o teor de gases inertes, o ponto de orvalho da água, o ponto de orvalho dos hidrocarbonetos e o poder calorífico.

Apresenta-se à seguir as normas para a especificação do Gás Natural a ser comercializado no Brasil, de origem interna e externa, igualmente aplicáveis às fases de produção, de transporte e de distribuição desse produto, determinadas pela Agência Nacional do Petróleo, Resolução ANP nº 16 de 17/06/2008. O Gás Natural deverá atender à especificações apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificação para o Gás Natural Comercializado no Brasil

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE (2) (3)		MÉTODO			
Norte		Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO	
Poder calorífico superior (4)	kJ/ m ³	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000	15213	3588	6976	
	kWh/m ³	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94				
Índice de Wobbe (5)	kJ/m ³	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500	15213	--	6976	
Número de metano, mín. (6)		anotar (3) (Célula alterada pela Resolução ANP nº 7, de	65	--	--	15403	

		16.04.2010, DOU 19.04.2010) Nota: Assim dispunha a célula alterada: "(3)"					
Metano, mín.	% mol.	68,0	85,0	14903	1945	6974	
Etano, máx.	% mol.	12,0	12,0	14903	1945	6974	
Propano, máx.	% mol.	3,0	6,0	14903	1945	6974	
Butanos e mais pesados, máx.	% mol.	1,5	3,0	14903	1945	6974	
Oxigênio, máx. (7)	% mol.	0,8	0,5	14903	1945	6974	
Inertes (N ₂ +CO ₂), máx.	% mol.	18,0	8,0	6,0	14903	1945	6974
CO ₂ , máx.	% mol.	3,0	14903	1945	6974		
Enxofre Total, máx. (8)	mg/m ³	70	--	5504	6326-3		
							6326-5
							19739
Gás Sulfídrico (H ₂ S), máx.	mg/m ³	10	13	10	--	5504	6326-3
						6228	
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx. (9)	°C	-39	-39	-45	--	5454	6327
							10101- 2
							10101- 3
							11541

Ponto de orvalho de hidrocarbonetos a 4,5 MPa, máx. (10)	°C	15	15	0	--	--	6570
Mercúrio, máx. (11)	µg/m³	anotar			--	--	6978-1
							6978-2

Observações:

- (1) O gás natural não deve conter traços visíveis de partículas sólidas ou líquidas.
- (2) Os limites especificados são valores referidos a 293,15K (20°C) e 101,325kPa (1atm) em base seca, exceto os pontos de orvalho de hidrocarbonetos e de água.
- (3) A aplicação veicular do gás natural de Urucu se destina exclusivamente a veículos dotados de motores ou sistemas de conversão de gás natural veicular que atendam à legislação ambiental específica. O revendedor deverá afixar em local visível de seu estabelecimento comercial o seguinte aviso: "GÁS NATURAL VEICULAR DE URUCU - EXCLUSIVO PARA VEÍCULOS ADAPTADOS AO SEU USO". (Redação dada à nota pela Resolução ANP nº 7, de 16.04.2010, DOU 19.04.2010)
- (4) O poder calorífico de referência de substância pura empregado neste Regulamento Técnico encontra-se sob condições de temperatura e pressão equivalentes a 293,15K, 101,325 kPa, respectivamente em base seca.
- (5) O índice de Wobbe é calculado empregando o poder calorífico superior em base seca. Quando o método ASTM D 3588 for aplicado para a obtenção do poder calorífico superior, o índice de Wobbe deverá ser determinado de acordo com a seguinte fórmula:

Fonte: Agência Nacional do Petróleo – ANP, Resolução ANP nº 16 de 17/06/2008

Além de obedecer aos índices da Tabela 4, o produto deve estar sempre livre de poeira, água condensada, odores objetáveis, gomas, elementos formadores de goma, glicóis, hidrocarbonetos condensáveis, compostos aromáticos, metanol ou outros elementos sólidos ou líquidos que possam interferir com a operação dos sistemas de transporte e distribuição e à utilização pelos consumidores.

O gás natural pode ser transportado sem odorização, exceto quando requerido por normas de segurança aplicáveis, porém, é obrigatória a presença de odorante na distribuição.

As determinações das características do produto são feitas mediante o emprego de normas da American Society for Testing and Materials (ASTM) e da International Organization for Standardization (ISO), segundo os Métodos de Ensaio listados à seguir:

ASTM D 1945 - Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas Chromatography;

ASTM D 3588 Calculating Heat Value, Compressibility Factor, and Relative Density (Specific Gravity) of Gaseous Fuels;

ASTM D 5454 - Standard Test Method Water Vapor Content of Gaseous Fuels Using Electronic Moisture Analyzers;

ASTM D 5504 - Standard Test Method for Determination of Sulfur Compounds in Natural Gas and Gaseous Fuels by Gas Chromatography and Chemiluminescence;

ISO 6326 - Natural Gas - Determination of Sulfur Compounds, Parts 1 to 5;

ISO 6974 - Natural Gas - Determination of Hydrogen, Inert Gases and Hydrocarbons up to C8 - Gas Chromatography Method;

Para adquirir as características comerciais desejadas o gás natural bruto passa por tratamento em uma Unidade de Processamento de Gás Natural – UPGN, que efetua a retirada de impurezas e a separação dos hidrocarbonetos pesados.

3.3.3 Óleo Diesel

O óleo diesel é um combustível fóssil, derivado do petróleo, muito utilizado em motores de caminhões, tratores, locomotivas, automóveis de passeio, máquinas de grande porte e embarcações. O óleo diesel é formado basicamente por hidrocarbonetos. Possui também em sua composição, em pequena quantidade, oxigênio, nitrogênio e enxofre.

As propriedades fluidodinâmicas de um combustível, importantes no que diz respeito ao funcionamento de motores de ignição por compressão (motores diesel), são a viscosidade e a densidade. Tais propriedades exercem grande influência na circulação e injeção do combustível. Afortunadamente, as propriedades fluidodinâmicas do biodiesel, independentemente de sua origem, assemelham-se as do óleo diesel mineral, significando que não é necessária qualquer adaptação ou regulação no sistema de injeção dos motores.

Tabela 5 - Especificação do óleo Diesel Bx a B30

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO
		S10	S500	S1800 não rodoviário	
Aspecto (1)		LII (2)			Visual

Cor		(3)	Vermelh o (4)	(5)	Visual
Cor ASTM, máx.		3,0			NBR 14483 ASTM D6045 ASTM D1500
Massa Específica (20°C) (6)	kg/m³	817,8 a 865,0	817,8 a 875,5	822,4 a 886,0	NBR 7148 NBR 14065 ASTM D1298 ASTM D4052 NBR 15983 ASTM D 7042
Viscosidade a 40°C (7)	mm²/s	1,9 a 4,1	2,0 a 5,0		NBR 10441 ASTM D445
					ASTM D7279 NBR 15983 ASTM D 7042
Teor de Biodiesel, % vol.	% volume	(8)			NBR 15568 EN 14078 ASTM D7861 ASTM D7371 (9)
Enxofre, máx.	mg/kg	10	-		ASTM D5453 ASTM D2622 ASTM D7039 ASTM D7220 (9)
		-	5 0 0	1800	ASTM D2622 ASTMD545 3 ASTMD7039
Destilação / 10% vol., máx. (10)	°C	180	Anotar		NBR 9619(9) ASTM D86 (9) ASTMD1160
Destilação / 50% vol. (10)	°C	245,0 a 295,0	245,0 a 310,0		
Destilação / 85% vol. (10)	°C	Anotar			
Destilação / 90% vol. (10)	°C	Anotar			
Destilação / 95% vol. (10)	°C	Anotar			

Ponto de fulgor, °C, mín.	°C	38			NBR 7974 NBR 14598 ASTM D56 ASTM D93 ASTM D3828
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(11)			NBR 14747 ASTM D6371
Resíduo de Carbono - 10% amostra, máx.	%massa	0,25			NBR 14318 ASTM D524
Cinzas, máx.	%massa	0,01			NBR 9842 ASTM D482
Corrosividade ao cobre		1			NBR 14359 ASTM D130
Teor de água, máx.	mg/kg	200	500		ASTM D6304 EN ISO 12937
Água e sedimentos, máx.	% vol	-	0,05		ASTM D2709
Estabilidade à oxidação, mín.	h	20			EN15751
Contaminação total, máx. (12)	mg/kg	24	Anotar		EN12662
Número de Acidez, máx.	mg KOH/g	0,3			NBR 14248 ASTM D664
Condutividade elétrica, mín. (13)	pS/m	25	25	Anotar (14)	ASTM D2624 ASTM D4308
Número de cetano ou número de cetano derivado (NCD), mín.	-	48	42	42	ASTM D613 ASTM D6890 ASTMD7170 ASTMD7668

- (1) Em caso de disputa ou para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade no Aspecto, deverão ser realizadas as análises de teor de água e contaminação total, para o óleo diesel BX a B30 (S10) e teor de água e água e sedimentos para o óleo diesel BX a B30 (S500), e somente teor de água no óleo diesel BX a B30 (S1800). O Aspecto será considerado não conforme caso ao menos um desses parâmetros esteja fora de especificação.
- (2) Límpido e isento de impurezas, com anotação da temperatura de ensaio.
- (3) Incolor a amarelada, podendo apresentar-se ligeiramente alterada para as tonalidades marrom e alaranjada devido à coloração do biodiesel.
- (4) O corante vermelho deverá ser especificado conforme a Resolução ANP nº 50/2013, ou outra que venha substituí-la.
- (5) Coloração de amarelo a alaranjado, podendo apresentar-se ligeiramente alterado para a tonalidade marrom devido à coloração do biodiesel.
- (6) As normas NBR 14065 e ASTM D4052 devem ser utilizadas como referência.
- (7) As normas ASTM D445 e NBR 10441 devem ser utilizadas como referência.
- (8) Será admitida variação de $\pm 0,5\%$ em volume para misturas de óleo diesel com teor de biodiesel inferior a 20% e variação de $\pm 1,0\%$ em volume para óleo diesel B20 a B30. A norma EN 14078 deve ser utilizada como referência.
- (9) Aplicável somente para mistura de óleo diesel A com até 20% de biodiesel.
- (10) Para óleo diesel BX a B20, somente os métodos NBR 9619 e ASTM D86 devem ser utilizados. O método ASTM D1160 deve ser utilizado para óleo diesel B21 a B30, sendo neste caso os limites "anotar" para as temperaturas de 10% e 50% recuperados.
- (11) Limites conforme Tabela II.
- (12) Deverá ser utilizada somente a versão da norma de 1998 ou 2008 (EN 12662:1998 ou EN 12662:2008)
- (13) Limite requerido no momento e na temperatura do carregamento/bombeio do combustível pelo distribuidor.
- (14) Caso a condutividade elétrica medida seja inferior a 25 (pS/m) deverá ser dado destaque do resultado no certificado da qualidade para que o distribuidor seja alertado quanto à adoção de medidas de segurança.

Tabela 6 - Ponto de Entupimento de Filtro a Frio

UNIDADES DA FEDERAÇÃO	LIMITE MÁXIMO, °C											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
SP - MG - MS	12	12	12	7	3	3	3	3	7	9	9	12
GO/DF - MT - ES - RJ	12	12	12	10	5	5	5	8	8	10	12	12
PR - SC - RS	10	10	7	7	0	0	0	0	0	7	7	10

Fonte: www.anp.gov.br - RESOLUÇÃO ANP Nº 30, DE 23.06.2016 - DOU 24.06.2016

3.3.4 Biodiesel

A principal matéria-prima utilizada na fabricação do biodiesel são óleos de origem vegetal. Entre os vários métodos existentes para obtenção do biodiesel, destacam-se o craqueamento e a transesterificação de óleos vegetais, sendo este, atualmente o melhor método de escolha, pois as características físicas dos ésteres de ácidos graxos são muito próximas do diesel. Além disso, trata-se de um processo simples que reduz a massa molecular para um terço em relação aos triglicerídeos, como também reduz a viscosidade e aumenta a volatilidade, se tornando um melhor combustível, colaborando diretamente a favor da vida útil do motor (Geris, 2007).

O biodiesel representa uma diminuição na poluição de duas formas. Durante sua reação de combustão a quantidade de dióxido de carbono liberada pela queima é menor em relação aos combustíveis fósseis. Além de ser uma fonte de energia renovável.

Segundo a PETROBRÁS (2017), o biodiesel constitui combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que substitui total ou parcialmente o óleo diesel de fonte mineral nos motores de combustão interna de ciclo diesel, como os de caminhões, tratores, ônibus e outros veículos, ou em motores estacionários (como os utilizados para geração de energia elétrica). O biodiesel pode ser empregado como combustível puro ou em mistura com o diesel de mineral. Sua utilização está associada à substituição de combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão, sem haver a necessidade de nenhuma modificação no motor. Esse biocombustível tem as características necessárias para substituir o óleo diesel, com a vantagem de ser praticamente livre de compostos orgânicos nocivos ao ser humano. O biodiesel apresenta vantagens sobre os combustíveis derivados do petróleo por ser praticamente isento de enxofre e de compostos aromáticos; ter ponto de fulgor mais elevado e propiciar menor emissão de material particulado e maior biodegradabilidade, além de ser proveniente de fontes renováveis (SANTOS et al., 2007a). Seu caráter renovável está apoiado no fato da matéria-prima se originar de práticas agrícolas

As características físicas e químicas do biodiesel variam de acordo com a matéria-prima utilizada para a obtenção do combustível. No entanto, conforme a Resolução ANP 07 de 19/03/2008, o biodiesel puro (B100) a ser misturado ao diesel de petróleo na proporção de 5% deve atender às especificações descritas na norma para qualquer fonte de matéria-prima. Assim, os limites de alguns parâmetros físico-químicos a atender estão listados na Tabela 7. Quando enquadrados nesses limites, o biodiesel poderá ser usado na maioria dos motores modernos sem modificação e manterá o mecanismo, a durabilidade e a confiabilidade do motor.

Desde que foi instituído o uso obrigatório do biodiesel na mistura com o diesel fóssil, através da Lei nº 11.097/2005, observou-se uma rápida evolução para a adição do biocombustível em maiores teores. O valor inicial foi fixado em 2% em volume, em 2008, alcançando 5% já em 2010, quando o previsto ocorreria somente em 2013. Nos anos subsequentes, houve a elevação gradual dos percentuais mínimos obrigatórios no diesel B, chegando a 12% em março de 2020. A Lei nº 13.263/2016 autorizou o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) a elevar o percentual de biodiesel na mistura até o patamar de 15%, desde que obedecidas as condicionantes de aprovação de testes nos motores para esse teor. Nesse contexto, a Resolução CNPE nº 16/2018 propôs um cronograma de aumento do percentual de biodiesel na mistura com o diesel de 1% ao ano, atingindo 15%, em 2023 (CNPE, 2018b).

Embora na Resolução CNPE de dezembro de 2018, constasse a previsão de entrada do percentual de 11% de biodiesel na mistura de diesel B, no mês de junho de 2019, a modificação foi adiada para agosto, de acordo com a Resolução ANP nº 758/2018 (ANP, 2018a), em decorrência dos resultados dos testes de misturas BX em motores realizados pelas montadoras automotivas. Em relatório que avaliou a utilização de misturas com biodiesel B15, observou-se que um aumento do teor de biocombustível na mistura com diesel fóssil, reduz a eficiência do sistema de tratamento de gases dos motores Euro 6, que serão adotados na fase do Proconve P8 (MME, 2019c). Esta será a tecnologia de redução de poluentes no escapamento que poderá ser utilizada no Brasil a partir de 2022/23, quando se prevê a entrada em vigor desta fase para veículos pesados. A Resolução ANP nº 758/2018 busca aumentar a vida útil do óleo diesel B (com mistura de biodiesel) em todas as suas etapas de comercialização, e com isso tornar mais segura a implantação das misturas subsequentes (ANP, 2018a).

A evolução dos teores de adição obrigatória de biodiesel ao diesel fóssil está detalhada na Figura 4.

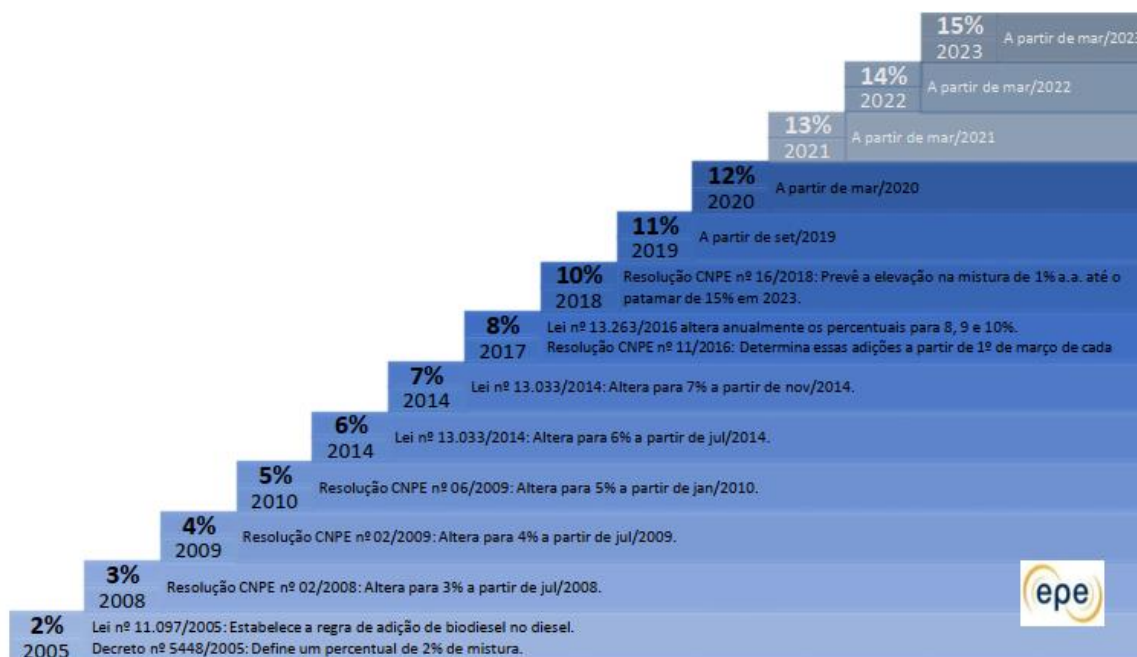


Figura 4 - Evolução do marco legal do biodiesel

Fonte: empresa de pesquisa energética EPE, 2020

- 2003 - Facultativo
- Jan/2008 - 2%
- Jul/2008 - 3%
- Jul/2009 - 4%
- Jan/2010 - 5%
- Nov/2014 - 7%
- Mar/2018 - 10%
- Set/2019 – 11%
- Mar/2020 – 12%

A especificação do biodiesel tem sido aprimorada constantemente ao longo dos anos, o que tem contribuído para a sua harmonização com as normas internacionais e alinhamento da sua qualidade às condições do mercado brasileiro, assegurando maior segurança e previsibilidade aos agentes econômicos.

Tabela 7 – Especificação de Biodiesel

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1) (2)	-	-	-

Massa específica a 20°C	kg/m³	850 a 900	7148 14065	1298 4052	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm²/s	3,0 a 6,0	10441	445	EN ISO 3104
Teor de água, máx.	mg/kg	200,0 (3)	-	6304	EN ISO 12937
(Redação dada pela Resolução ANP Nº 51 DE 25/11/2015):					
Contaminação Total, máx. (13)	mg/kg	24	15995	-	EN12662 (5)
Ponto de fulgor, mín. (4)	°C	100,0	14598	93	EN ISO 3679
Teor de éster, mín	% massa	96,5	15764	-	EN 14103 (5)
Cinzas sulfatadas, máx. (6)	% massa	0,020	6294	874	EN ISO 3987
Enxofre total, máx.	mg/kg	10	15867	5453	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5	15554 15555 15553 15556	-	EN 14108 (5) EN 14109 (5) EN 14538 (5)
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5	15553 15556	-	EN 14538 (5)
Fósforo, máx. (7)	mg/kg	10	15553	4951	EN 14107 (5) EN 16294 (5)
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx. (6)	-	1	14359	130	EN ISO 2160

Número Cetano (6)	-	Anotar	-	613 6890 (8)	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(9)	14747	6371	EN 116
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,50	14448 -	664 -	EN 14104 (5)
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15771 15908 (5) -	6584 (5) -	EN 14105 (5) EN 14106 (5)
Glicerol total, máx. (10)	% massa	0,25	15344 15908 (5)	6584 (5) -	EN 14105 (5)
Monoacilglicerol, máx.	% massa	0,7	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Diácilglicerol, máx.	% massa	0,20	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Triácilglicerol, máx.	% massa	0,20	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	0,20	15343	-	EN 14110 (5)
Índice de Iodo	g/100g	Anotar	-	-	EN 14111 (5)
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín. (11)	h	6 (12)	-	-	EN 14112 (5) EN 15751 (5)

Nota:

(1) Límpido e isento de impurezas, com anotação da temperatura de ensaio. Em caso de disputa, o produto só poderá ser considerado como não especificado no Aspecto, caso os parâmetros teor de água e/ou contaminação total estejam não conformes.

(2) Para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade no Aspecto, deverão ser realizadas as análises de teor de água e contaminação total. O produto será reprovado caso

pelo menos um desses dois últimos parâmetros esteja fora de especificação.

(3) Para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade, será admitida variação de +50 mg/kg no limite do teor de água no biodiesel para o produtor e de +150 mg/kg para o distribuidor.

(4) Quando a análise de ponto de fulgor resultar em valor superior a 130°C, fica dispensada a análise de teor de metanol ou etanol.

(5) Os métodos referenciados demandam validação para os materiais graxos não previstos no método e rota de produção etílica.

(6) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da Tabela de Especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados à ANP pelo Produtor de biodiesel, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de material graxo, o Produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de materiais graxos utilizados.

(7) Em caso de disputa, deve ser utilizado o método EN 14107 como referência.

(8) O método ASTM D6890 poderá ser utilizado como método alternativo para determinação do número de cetano.

(9) Limites conforme Tabela II. Para os estados não contemplados na tabela o ponto de entupimento a frio permanecerá 19°C.

(10) Poderá ser determinado pelos métodos ABNT NBR 15908, ABNT NBR 15344, ASTM D6584 ou EN14105, sendo aplicável o limite de 0,25% em massa. Para biodiesel oriundo de material graxo predominantemente láurico, deve ser utilizado método ABNT NBR 15908 ou ABNT NBR 15344, sendo aplicável o limite de 0,30% em massa.

(11) O limite estabelecido deverá ser atendido em toda a cadeia de abastecimento do combustível.

(12) A estabilidade à oxidação a 110°C terá seu limite mínimo de 8 horas, a partir de 1º de novembro de 2014.

(13) Deverá ser utilizada somente a versão da norma de 1998 ou 2008 (EN 12662:1998 ou EN 12662:2008) (Nota acrescentada pela Resolução ANP Nº 51 DE 25/11/2015).

Tabela 8 – Ponto de Entupimento de Filtro a Frio

UNIDADES FEDERAÇÃO	DA	LIMITE MÁXIMO, °C											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
SP - MG - MS		14	14	14	12	8	8	8	8	8	12	14	14
GO/DF - MT - ES - RJ		14	14	14	14	10	10	10	10	10	14	14	14
PR - SC - RS		14	14	14	10	5	5	5	5	5	10	14	14

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, RESOLUÇÃO ANP Nº 51 DE 25/11/2015

3.4 PODER CALORÍFICO DE UM COMBUSTÍVEL

De acordo com D. Vlassov (2008), a característica mais importante de qualquer combustível é o poder calorífico que é a quantidade do calor que se liberta durante a combustão completa do combustível. O poder calorífico é medido em Joule (J, kJ, MJ) por quilograma de combustíveis líquidos ou por metro cúbico de combustíveis gasosos, pois em MJ/kg ou MJ/m³.

O valor do poder calorífico depende de composição química do combustível. O poder calorífico é determinado de forma experimental nos combustíveis líquidos em um banco especial que se chama bomba calorimétrica, ver Figura 5, em que o combustível é queimado no meio do oxigênio puro, de combustíveis gasosos em um calorímetro.



Figura 5 – Bomba calorimétrica

Fonte: Autor

Na bomba calorimétrica é determinado o chamado poder calorífico superior (PCS). O valor do poder calorífico superior inclui um calor de condensação do vapor da água formado pela combustão do hidrogênio e pela umidade contida no combustível. Em MCI gases de escape têm a temperatura maior de que a de condensação do vapor da água e por isso este calor de condensação não se aproveita. Em cálculos térmicos dos MCI é usado poder calorífico inferior (PCI), que não inclui o calor de condensação de vapor da água. Entre poder calorífico superior e inferior há uma correlação $PCI = PCS - 225H - 25W$ [kJ/kg]

Onde: H e W - porcentagem mássica do hidrogênio e da umidade em combustível líquido.

Maiores dos motores consomem combustíveis líquidos provenientes do petróleo, isto é: gasolina, óleo diesel (simplesmente diesel), óleo combustível para motores Diesel de grande potência que são usados em viaturas pesadas e navios e, também, é usado o álcool etílico. Nos últimos tempos, cada vez mais, são usados combustíveis gasosos, gás comprimido (GNV) e liquefeito (GLP) que são mais ecológicos. Um combustível líquido derivado do petróleo, pela massa é composto em geral de carbono C, hidrogênio - H e pequenas quantidades de enxofre - S, oxigênio - O e nitrogênio - N.

Dependendo das condições de determinação, o poder calorífico de um combustível pode apresentar diferentes valores.

- Poder Calorífico a Pressão Constante (PCp) - É a quantidade de calor liberada na combustão que se processa a pressão constante (ambiente aberto).

- Poder Calorífico a Volume Constante (PCv) - É a quantidade de calor liberada na combustão que se processa a volume constante (ambiente fechado). O valor do poder calorífico a volume constante é maior que o valor do poder calorífico a pressão constante para um mesmo combustível. A razão de tal fato é que parte do calor gerado no processo a pressão constante, é consumido no trabalho de expansão dos gases submetidos à pressão reinante.

Em função do estado físico que se encontra a água presente nos gases de combustão, define-se ainda:

- Poder Calorífico Superior (PCS) - Obtido quando resfriamos os gases da combustão até a temperatura ambiente. Dessa forma, ocorre a condensação do vapor de água, e a quantidade de calor medida inclui o calor de condensação da água.

- Poder Calorífico Inferior (PCI) - Pode ser obtido deduzindo-se do valor do poder calorífico superior, a quantidade de calor relativa à condensação do vapor de água, segundo equação demonstrada anteriormente.

Quando se fornece o valor do poder calorífico de um combustível devem ser especificadas as condições de determinação, se a pressão ou volume constante, e ainda as condições do combustível, se seco ou úmido, se considerado com ou sem cinzas. Geralmente os dados tabelados (que expressam as condições práticas) referem-se a pressão constante (1 atm) e temperatura de entrada do combustível e saída dos gases igual a 18°C (ou 25 °C).

A diversas formas de se obter o poder calorífico dos combustíveis, dentre elas temos:

Determinação experimental do Poder Calorífico: A medida experimental em laboratório é feita com o auxílio de calorímetros, que são aparelhos adiabáticos (que não trocam calor com o ambiente), dentro dos quais promove-se a combustão de uma massa conhecida do combustível. O calor gerado é transferido para uma massa de água, cuja temperatura sofre elevação. A partir dos dados experimentais coletados, calcula-se o poder calorífico. Para combustíveis sólidos e líquidos, utiliza-se o calorímetro (ou "bomba calorimétrica") de Berthelot-Mahler. Para combustíveis gasosos utiliza-se o calorímetro de Junke's.

É importante ressaltar que a bomba calorimétrica utilizada para testes permite obter o poder calorífico superior (PCS). No entanto, para que seja determinado o coeficiente de correção que deverá ser fornecido, deve-se calcular o poder calorífico inferior.

Cálculo do Poder Calorífico: O cálculo estimativo do poder calorífico de um combustível pode ser feito com base na composição do combustível, e nos valores dos calores de combustão das frações combustíveis. Outra forma é com o auxílio de fórmulas empíricas, usando-se a fórmula de Gouthal e as fórmulas de Dulong.

Cálculo pelos Calores de Combustão: Conhecida a composição em massa (ou em quantidade de matéria) do combustível, determina-se a quantidade de calor despreendida na combustão de cada fração. A soma dessas quantidades de calor será o valor estimativo do poder calorífico. Importante: No cálculo do poder calorífico inferior de combustíveis que contenham umidade e/ou água combinada, deve ser descontada do valor encontrado, a quantidade de calor necessária para vaporizar a massa de água combinada e/ou a massa de umidade.

3.5 ANALISADOR DE POTÊNCIA

O dinamômetro é um equipamento usado para medir rotação, torque e potência de um motor de combustão interna em suas diversas condições de funcionamento. Os testes de motores são realizados em laboratório de ensaios, utilizando um dinamômetro, que é um instrumento de absorção de energia e que é capaz de aplicar uma carga controlada no motor que está sendo testado.

Ajustes e modificações em um veículo, normalmente requerem testes em dinamômetros, de forma a verificar sua viabilidade técnica da nova configuração. Seu princípio de funcionamento consiste em aplicar uma força de atrito, no virabrequim do motor através do uso de um freio, buscando um equilíbrio dinâmico (BRUNETTI, 2012).

O freio dinamométrico consiste basicamente de um rotor ligado a um motor e um estator apoiado em mancais de rolamento e travado sobre uma célula de carga, colocada no extremo de um braço de comprimento b , provocando uma força na célula de carga conforme Figura 6, resultando em um binário de valor $b \times F$ que multiplicado pela rotação do motor teremos como resultado a potência do mesmo (MARTINS, 2013).

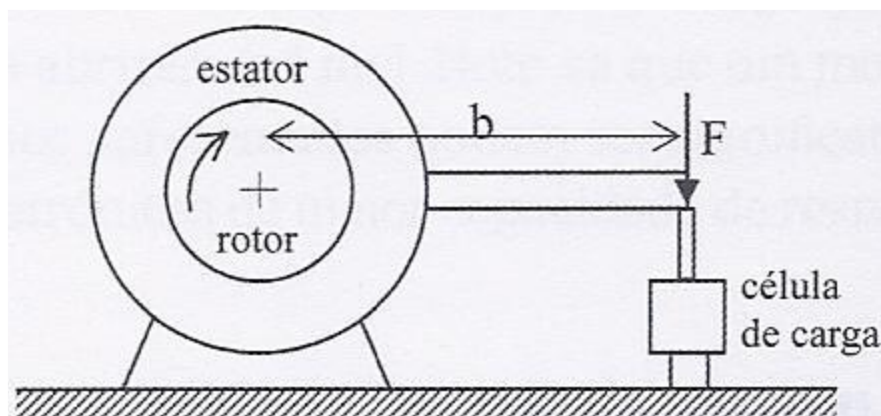


Figura 6 – Esquema de um freio dinamométrico.

Fonte: Martins, 2013

Os dinamômetros diferenciam-se apenas com relação ao tipo de frenagem, sendo os mais comuns os elétricos e os hidráulicos. Onde o dinamômetro hidráulico utiliza o atrito de cisalhamento da água contra a carcaça, em quanto os elétricos utilizam os esforços do campo elétricos ou magnéticos.

3.5.1 Dinamômetro Hidráulico

Os dinamômetros hidráulicos são ferramentas de controle e instrumentação que medem a potência de um motor usando uma célula cheia com um líquido para aumentar a sua carga. São amplamente utilizados em aplicações para medição em veículos automotores porque a capacidade de determinação das medidas do torque, velocidade de rotação máxima e absorção de potência máxima é importante e valiosa para a indústria automobilística, assim como para os consumidores finais.

O dinamômetro hidráulico consiste em um rotor solidário a um eixo, a ser acoplado ao motor, que é freado pela força de pressão da água. O seu princípio de funcionamento está ilustrado na Figura 7.

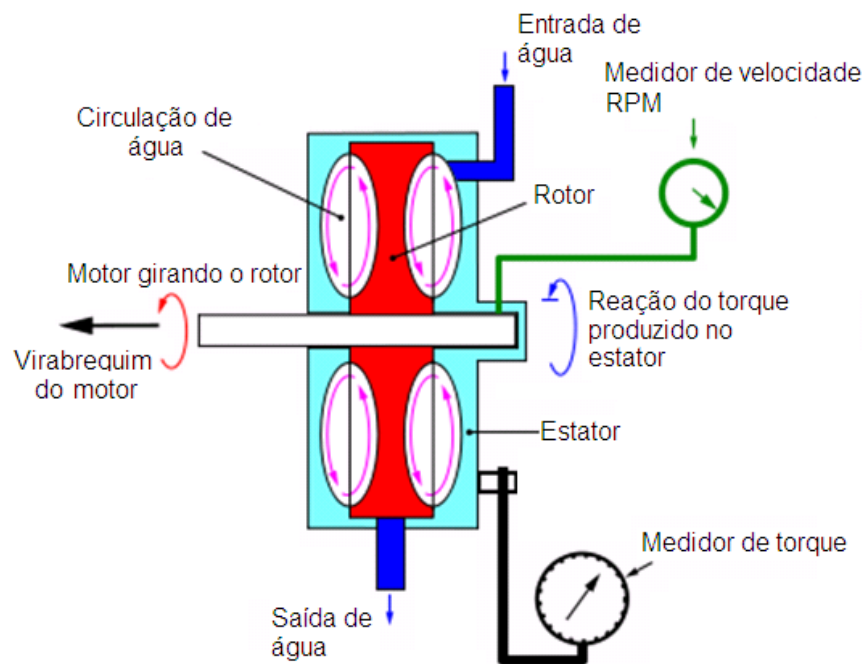


Figura 7 – Ilustração do funcionamento do dinamômetro hidráulico.

Fonte: intechno

Conforme ilustra a Figura 7, observa-se que o dinamômetro possui um rotor aletado que gira no interior de uma carcaça (estator). O rotor succiona água para dentro do estator, sendo que quanto maior a restrição da saída de água, maior a carga imposta ao eixo. Na ocorrência do equilíbrio dinâmico, dispositivos do dinamômetro medem o torque no eixo e sua rotação, calculando valores de potência.

É preciso alguns critérios para a escolha ideal do dinamômetro, alguns deles: finalidade, preço, faixa de potência, rotação máxima, torque e sentido de rotação.

3.5.2 Dinamômetro Elétrico

Há vários tipos de dinamômetros elétricos, mas em todos a energia absorvida é transformada em energia elétrica, que pode ser retirada do freio como eletricidade ou como calor resultante das perdas eletromagnéticas (correntes de Foucault).

Os dinamômetros de corrente contínua, são basicamente um motor de corrente contínua que funciona como gerador, sendo a carga controlada eletronicamente. Uma vantagem adicional deste tipo de dinamômetro é que o motor pode ser posto em movimento pelo freio (para arranque ou para medição das perdas mecânicas). Geralmente estão limitados a uma velocidade baixa e tem bastante inércia. Semelhantes a estes são os

dinamômetros de corrente alternada (motor assíncrono ou de indução), que tem as mesmas vantagens, mas apresentam menos inércia e aguentam maiores velocidades. O controle é conseguido pela variação da frequência da corrente de ativação (inversor de frequência).

Os dinamômetros de corrente de Foucault. Figura 8, são em geral os mais utilizados. O seu funcionamento assenta na indução eletromagnética pelo rotor em movimento (excitado eletricamente), que produz correntes de Foucault dissipadas na forma de perdas resistivas no estator. A variação da corrente de excitação produz as variações de carga do freio. O calor dissipado no estator tem de ser retirado por água (processo mais frequente) ou por ar (como nos freios elétricos dos veículos pesados).



Figura 8 – Dinamômetro de corrente foucault

Fonte: Autor

Os dinamômetros elétricos absorvem a energia disponível no eixo do motor e a transforma em energia elétrica (FERGUNSON, 2001). Isso é possível devido ao acionamento de resistências elétricas pelo dinamômetro. As resistências são denominadas cargas. A potência do motor é indicada pela potência que está sendo dissipada pelas resistências. O gerador elétrico acionando um conjunto de resistores é um exemplo de dinamômetro elétrico.

3.6 EMISSÕES DOS PRINCIPAIS GASES POLUENTES MOTORES ICO

3.6.1 Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos (HC) são a parcela de combustível não queimado ou parcialmente queimado que é expelido pelo motor, bem como vapor de combustível emitido de diversos pontos do veículo ou expelido durante o abastecimento do tanque. O HC merece especial atenção quanto ao seu controle, já que reagem na atmosfera promovendo a formação do “smog” fotoquímico. Por sua reatividade, é comum tratar os HC como Compostos Orgânicos Voláteis (COV), onde se exclui o metano.

Em motores de combustão interna com ignição por compressão são duas as causas principais da presença de combustível não queimado na exaustão:

- o combustível misturado entre o início da sua injeção e o início da combustão é mais pobre que o limite de mistura pobre adequado para o motor.
- a não ocorrência de mistura do combustível com o ar devido à baixa velocidade do combustível ao sair dos furos do bico injetor.

Segundo Degobert (1995), a emissão de hidrocarbonetos não queimados, ou substâncias orgânicas de um modo geral, resulta da combustão incompleta de hidrocarbonetos. Contrariamente ao CO e NO_x, estes formados em uma fase homogênea a elevada temperatura, os hidrocarbonetos resultam a partir de efeitos heterogêneos na mistura e na vizinhança com as paredes do cilindro, consequentemente a uma baixa temperatura. Hidrocarbonetos não queimados incluem uma ampla variedade de hidrocarbonetos os quais são perigosos a saúde ou possuem diferentes reatividades nas conversões químicas troposféricas.

Em particular, HC não queimados contém uma ampla proporção de metano, o qual é inerte neste sentido. Enquanto compostos carbonílicos são considerados para somente um pequeno percentual de emissões de HC em motores de ignição por centelha, aldeídos podem ter uma variação acima de 10% nas emissões de HC em motores diesel a entre estas aldeídos e formaldeídos representam 20% do total decompostos carbonílicos.

Mesmo com excesso de oxigênio, característica esta da combustão diesel, condições heterogêneas da câmara de combustão podem causar reações de oxidação incompletas e não queimadas ou parcialmente hidrocarbonetos oxidados na exaustão em adição ao CO. Alguns destes componentes são responsáveis pelo odor típico da exaustão diesel. Todos os

parâmetros que melhoram a exploração do oxigênio na câmara de combustão (tal como o escoamento turbulento da mistura) ou aumento das temperaturas da combustão podem reduzir as emissões de CO e HC. (BASSHUYSEN; SCHAFER, 2004, p.601).

Tabela 9 - Fontes e características dos poluentes Hidrocarbonetos (HC)

Poluente	Características	Fontes principais	Danos
Hidrocarbonetos (HC)	Normalmente encontrados em concentrações baixas suspensas na atmosfera em qualquer área urbana (gás ou fase líquida) e são muitas vezes emitidos quando a combustão é incompleta	Combustão incompleta de combustíveis (consumo de compostos de petróleo, como gasolina e diesel). Além disso, esses gases podem ser formados por incêndios, reações químicas	Distúrbios no sistema respiratório

3.6.2 Monóxidos de Carbono

A combustão de hidrocarbonetos é um processo de oxi-redução, ocorrendo a oxidação do carbono e a redução do hidrogênio, com liberação de energia e formação de novos compostos, sendo o principal elemento o dióxido de carbono (CO₂). Quando a quantidade de oxigênio presente na mistura ar/combustível é insuficiente para promover a completa oxidação do carbono presente na câmara de combustão ocorre à formação de monóxido de carbono (CO).

Segundo Majewski e Khair (2006, p.124), a uma elevada temperatura ou através de um catalisador oxidante, o monóxido de carbono pode ser oxidado pelo oxigênio e formar dióxido de carbono.

Esta reação produz elevado efeito térmico, sendo que no caso de gases de exaustão ricos em CO, podem causar um significativo aumento na temperatura do gás em reatores catalíticos projetados para oxidar o CO. Uma oxidação adiabática de 1% de CO no fluxo de gases de exaustão aumentam a temperatura do gás em aproximadamente 100 °C.

Atualmente as emissões de CO dos novos motores diesel são relativamente baixas, estando em uma faixa entre 10 a 500 ppm. (MAJEWSKI; KHAIR, 2006). Heywood (1988) afirma que a formação de monóxido de carbono (CO) em motores de combustão interna depende primariamente da razão de equivalência da mistura combustível/ar (ϕ). Misturas ricas fazem com que falte O₂ para formação do CO₂. Todas as outras variáveis ocasionam variações menos relevantes. Em motores multi-cilindros, se a metade dos cilindros roda com uma mistura pobre e a outra metade com uma mistura rica, então os cilindros com mistura pobre produzem muito menos CO do que os cilindros com mistura rica. A média de emissão do CO no motor corresponderia a sua razão de equivalência de mistura mais rica do que média. Assim, a chave para minimizar a emissão de CO é minimizar o tempo que o motor opera com a mistura rica e a utilização de um sistema de indução que minimize a variação de ϕ de cilindro para cilindro e de ciclo a ciclo. Motores Diesel operam com misturas mais pobres, conseqüentemente, suas emissões de monóxido de carbono são mais baixas e, geralmente, não são consideradas um problema.

A necessidade de enriquecimento da mistura quando o motor está frio faz com que as emissões de monóxido de carbono durante o aquecimento do motor sejam muito maiores em relação à operação do motor completamente aquecido. Os maiores índices de potência são obtidos com a mistura levemente rica, que apresenta níveis de emissões de NO e CO elevados. Nas misturas ligeiramente pobres o nível de CO se reduz, mas o nível de NO é relativamente alto. Com o objetivo de reduzir o nível de NO, usa-se a recirculação dos gases residuais, afetando a qualidade da combustão.

Tabela 10 - Fontes e características dos poluentes Monóxido de Carbono (CO)

Poluente	Características	Fontes principais	Danos
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	Náuseas, distúrbios visuais, vertigens e hemorragias

3.6.3 Óxidos de Nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio (NOX) apresentam-se nos gases de exaustão com o óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Os elementos óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) são usualmente agrupados como NOX. Porém, a produção de óxido nítrico é predominante em motores com ignição por centelha (HEYWOOD, 1988), correspondendo a cerca de 90% do total de NOX.

Heywood (1988) menciona que o NOX se forma nas regiões de altas temperaturas atrás da frente de chama. Quanto maior a temperatura, maior a sua formação. A taxa de formação dos óxidos de nitrogênio depende da temperatura atingida pelos gases durante a combustão, normalmente acima de 1600°C, e do tempo de permanência dos gases à alta temperatura. Os NOX formam-se através de reações químicas envolvendo moléculas de nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂) dissociadas do ar de combustão.

Nos motores de combustão interna com ignição por compressão o dióxido de nitrogênio pode atingir valores entre 10 e 30% do total de NOX presente na exaustão. As exceções são os casos em que o NO₂ é rapidamente misturado com combustível frio, o que ocorre em motores de combustão interna com ignição por compressão operando com baixa carga, condição necessária para que as regiões com temperaturas menores que a da chama sejam difusas. O óxido nítrico se forma na queima de uma mistura de combustível típico e ar a partir da temperatura de 426,85 °C (700 K) e pressão de 15 atm (15,2 bar). A taxa de formação de óxido nítrico cresce com o aumento da temperatura e da pressão.

Tabela 11 - Fontes e características dos poluentes Óxido de Nitrogênio (NO_x)

Poluente	Características	Fontes principais	Danos
Óxido de Nitrogênio (NO _x)	Gás marrom avermelhado, com odor forte. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Edema pulmonar, bronquites hemorragias e enfisema pulmonar.

3.6.4 Material Particulado

Segundo a EPA (U.S. Environmental Protection Agency), o material particulado é definido como qualquer massa coletada em um filtro posicionado na exaustão de um veículo após um determinado ciclo de operação, com a temperatura de exaustão mantida a 52 °C. O material particulado produzido por um motor diesel consiste, basicamente, de aglomerados de núcleos de carbono e de hidrocarbonetos, SO₃ ou ácido sulfúrico, e água adsorvidos ou condensados sobre esses núcleos carbônicos.

O material particulado forma-se em altas temperaturas, em regiões da câmara de combustão ricas em combustível, a partir de gotículas individuais.

É importante salientar que o material particulado apresenta uma estrutura complexa, que depende de vários fatores como o tipo de motor, carga, modo de condução do veículo, qualidade do óleo lubrificante do motor e combustível utilizado.

Em outros termos, a oxigenação do combustível na câmara de combustão, que nos motores de combustão interna com ignição por compressão ocorre com a sua pulverização efetuada pelo injetor, é fator preponderante para a redução da formação de fuligem. O processo de formação da fuligem é influenciado pela chama, pelo fluxo do combustível e, sobretudo, pelo tipo de hidrocarboneto, pressão e temperatura.

Tabela 12 – Fontes e características dos poluentes Material Particulado

Poluente	Características	Fontes principais	Danos
Material Particulado	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem.	Processos de combustão (industrial, veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera)..	Doenças pulmonares, asma, bronquite e câncer.

CAPÍTULO IV – MATERIAS

Nesse capítulo é feita uma descrição sobre os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa. Alguns equipamentos foram desenvolvidos pelo corpo discente do Laboratório de Estudos Motores e Emissões da UFPB.

4.1 SETUP DOS MATERIAIS UTILIZADOS

A Figura 9 traz uma visão geral dos materiais utilizados e ilustra o setup utilizado no experimento.

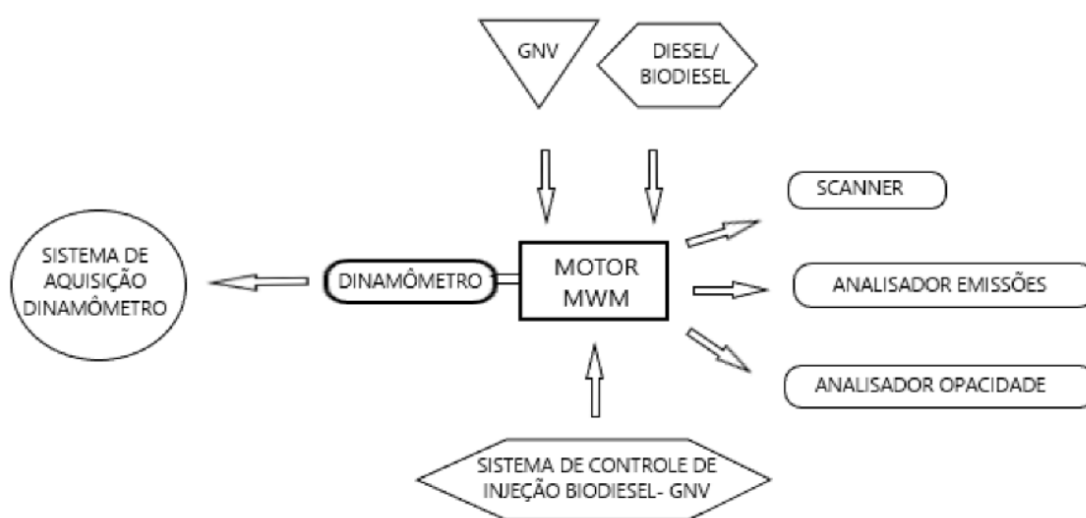


Figura 9 – Setup do experimento

Fonte: autor

Em seguida serão descritos, de forma detalhada, cada material utilizado no experimento.

4.2 MOTOR MWM 4.07 TCE

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o motor MWM 4.07 TCE, ver Figura 10, com o sistema de injeção eletrônica Common Rail Instalado no Laboratório do

Ensaio Motores e Emissões (LEME) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), acoplado a um dinamômetro elétrico dotado de todo sistema de aquisição de dados em tempo real.



Figura 10 - Motor MWM 4.07 TCE

Fonte: manual de operação MWM

Sua aplicação pode ser encontrada em uma ampla gama de veículos que utilizam este modelo de motor tais como: A S10 da Chevrolet GM, Micro-onibus Volare, Nissan frontier e Nissan Xterra. A Figura 11 mostra a imagem do motor e sua respectiva identificação segundo a terminologia MWM.



Figura 11 – Identificação do Motor MWM 4.07 TCE

Fonte: MWM Internacional

O Apêndice I traz outras informações técnicas as quais foram fornecidas pelo fabricante do motor na Tab. AI.

4.3 ACOPLAMENTO MOTOR DINAMÔMETRO

O acoplamento do conjunto motor dinamômetro foi confeccionado pelo corpo discente da UFPB, ver Figura 12.



Figura 12 - Acomplamento Motor Dinamômetro

Fonte: Autor

4.4 DINAMÔMETRO

O dinamômetro utilizado no desenvolvimento dessa pesquisa para os ensaios de teste de potência e torque do motor é um dinamômetro LOGS elétrico de corrente de Foucault com capacidade de 410 CV a 4000 RPM, que apresenta rápida resposta a variações de carga, boa robustez e efetua várias medições em diversos regimes de funcionamento dentro da faixa de utilização do motor, ver figura 13.



Figura 13 - Dinamômetro elétrico Logs acoplado ao motor MWM 4.07 TCE

Fonte: Autor

Nos vários tipos de dinamômetros elétricos a energia absorvida é transformada em energia elétrica ou como calor resultante das perdas eletromagnéticas (correntes de Foucault) (Martins, 2011).

4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO DINAMÔMETRO

O Sistema de aquisição de dados DinMon 3, utilizado na presente pesquisa, apresenta as seguintes características:

- 32 entradas analógicas, sendo 16 com condicionadores de sinal para termopares, 16 entradas genéricas;

- 1 entrada digital para medição de rotação;
- 2 saídas analógicas para controle de carga e servo acelerador;
- 1 porta de comunicação para microcomputador RS-232 ou USB, condicionador de sinal para sensor de rotação;
- 1 entrada para célula de carga;
- 1 entrada para o sensor de pressão do óleo;
- 1 entrada para o sensor de temperatura do ar;
- Sensores atmosféricos, pressão barométrica;

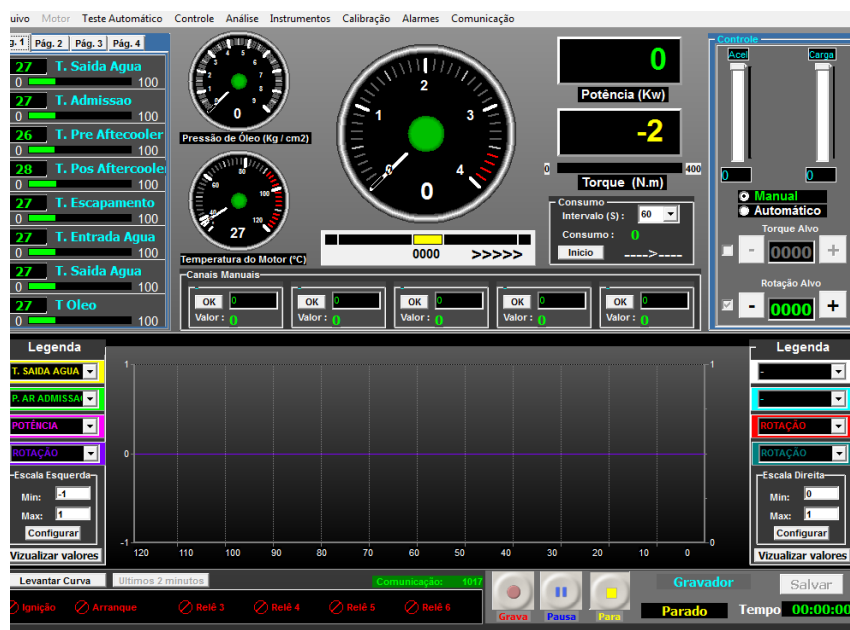


Figura 14 - Sistema de Aquisição de dados do dinamômetro LOGS

Fonte: Autor

4.6 RESERVATÓRIOS DE COMBUSTÍVEIS E BALANÇAS DE MEDIÇÃO

4.6.1 Reservatório do combustível óleo Diesel

No laboratório há disponível um tanque de combustível de aço galvanizado com capacidade de 84 litros de óleo diesel, este modelo é utilizado no veículo F-4000 da marca Ford.

Porém no processo de medição de consumo de óleo diesel não era viável utilizar uma balança para pesar 84 litros de óleo diesel, então utilizamos um recipiente com capacidade de 2 litros de óleo e utilizamos uma balança da marca Balmak ELC-25 com capacidade de 25 quilogramas com uma precisão de 2 gramas, ver Figura 15. Foi necessário confeccionar um suporte para o reservatório de vidro transparente e com graduação, com isto poderemos verificar o consumo de óleo por volume e por massa que é o mais utilizado para esses fins.



Figura 15 - Reservatório de combustível óleo diesel

Fonte: Autor

4.6.2 Reservatório do combustível GNV

O cilindro de GNV deste projeto é da marca CILBRAS com capacidade de $29,20\text{dm}^3$ e peso de 42,10kg, ver figura 16. Todos os cilindros que são comercializados para armazenar o GNV, necessitam ser certificados pela norma ISO 9001 e submetidos a diversos testes, obedecendo às mais rígidas exigências do mercado. O gás natural veicular é armazenado a uma pressão de 200 bar podendo variar de acordo com a tolerância que é de 10%. No sistema de medição do consumo do gás natural veicular, o cilindro de GNV é montado em um suporte para poder ser colocado em cima da balança a fim de facilitar o manuseio para medição.



Figura 16 – Cilindro para armazenar GNV e balança de medição

Fonte: Autor

No processo de medição de consumo de GNV utiliza-se o sistema de medição baseado no consumo da massa do GNV e para tanto tem-se uma balança da marca digitron, ver figura 16, com as devidas características:

- Classe de exatidão III
- Aprovado pelo INMETRO conforme Portaria 236
- Display com 26 mm de altura (com 5 ou 6 dígitos)
- Divisão de Leitura: 50 gramas
- Célula de carga ICS em alumínio com grau de proteção IP68
- Alimentação de 85 a 250 Vca (Fonte Automática)
- Suporta até 8 células de 350 ohm ou 12 de 700 ohm
- Capacidade Programável
- Velocidade de leitura/tempo de estabilização configurável
- Filtro digital, contra vibrações, configurável em até 8 níveis
- Indicadores luminosos de zero, peso líquido e peso estável
- Detector de pico máximo
- Dimensões Indicador: 120mm, L:240mm, P: 70mm
- Grau de Proteção IP-65 (Módulo de Pesagem)

4.7 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO GÁS NATURAL VEICULAR (GNV)

O sistema de alimentação de gás natural veicular é composto por vários componentes os quais serão brevemente descritos a seguir.

4.7.1 Reservatório de GNV

O cilindro de GNV a ser utilizado é da marca CILBRAS com capacidade de 29,20 dm³, peso de 42,10 kg e pressão de armazenamento de 200bar;

4.7.2 Redutor de pressão NG2-2

É um redutor de dois estágios de membrana com compensação por vácuo. Para evitar a queda interna de pressão e o congelamento do GNV, o redutor possui internamente um trocador de calor, que utiliza a água do radiador do motor do veículo como líquido de arrefecimento. Vem incorporada no corpo do redutor, uma eletroválvula de alta pressão que libera a entrada do gás natural que está armazenado em uma pressão máxima de 200 bar. Está calibrado pra uma pressão de saída de 2 bar (200 kPa superior a pressão presente no coletor de admissão).

A Figura 17 ilustra o redutor de pressão enquanto que a Tabela 13 caracteriza as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.



Figura 17 - Conjunto Redutor de Pressão e Filtro GNV Instalado no Motor MWM 4.07 TCE

Fonte: Autor

Tabela 13– Especificações Técnica do Redutor de pressão NG2 - Landi Renzo

Capacidade nominal operativa	40 kg/h
Temperatura de funcionamento	-20 ÷ 120 °C
Pressão abertura da válvula de segurança	8 bar (800 kPa)
Pressão de trabalho aspirado	2 bar (200 kPa)
Características elétricas da bobina	EV 12 V 20 W
Peso	2250 g
Homologação: E 4-110R-000022	E 4-110R-000022
Fonte: Landi Renzo,(2013)	

4.7.3 Eletroválvulas de injeção do GNV

As eletroválvulas injetoras GI25-65 que compõe o sistema em estudo são fabricadas pela Landi Renzo e podem fornecer uma potência de até 28kW/cilindro chegando a um total de 112kW, superior a exigência do motor que é de 103kW. A galeria de injetores recebe o gás proveniente do filtro de alimentação. Os injetores quando são pilotados pela unidade de central eletrônica (UCE) libera o gás, e o mesmo chega ao coletor de admissão e ao motor. O Gás natural veicular proveniente do redutor, que passou por uma redução de pressão de uma entrada de até 200 bar de pressão para uma saída de 2 bar passa pelo filtro e vai alimentar o conjunto de injetores. Os injetores são acionados individualmente a liberar a passagem do GNV de acordo com comando do sistema de controle biodiesel-GNV.

Ao ser liberado, o GNV sai dos injetores e chega ao coletor de admissão e é admitido pelo motor. O conjunto de injetores pode ter 2, 3 ou 4 injetores, para cobrir a gama das possíveis aplicações. No conjunto de injetores é possível ser coletados sinais de pressão e temperatura do gás. O acionamento dos injetores é do tipo "peak and hold". Onde no desenvolvimento deste projeto foi utilizado um conjunto de 4 injetores que é apresentado na Figura 18, a qual mostra o conjunto de eletroválvulas já instalado e em funcionamento no motor e o esquema de acionamento dos mesmos.

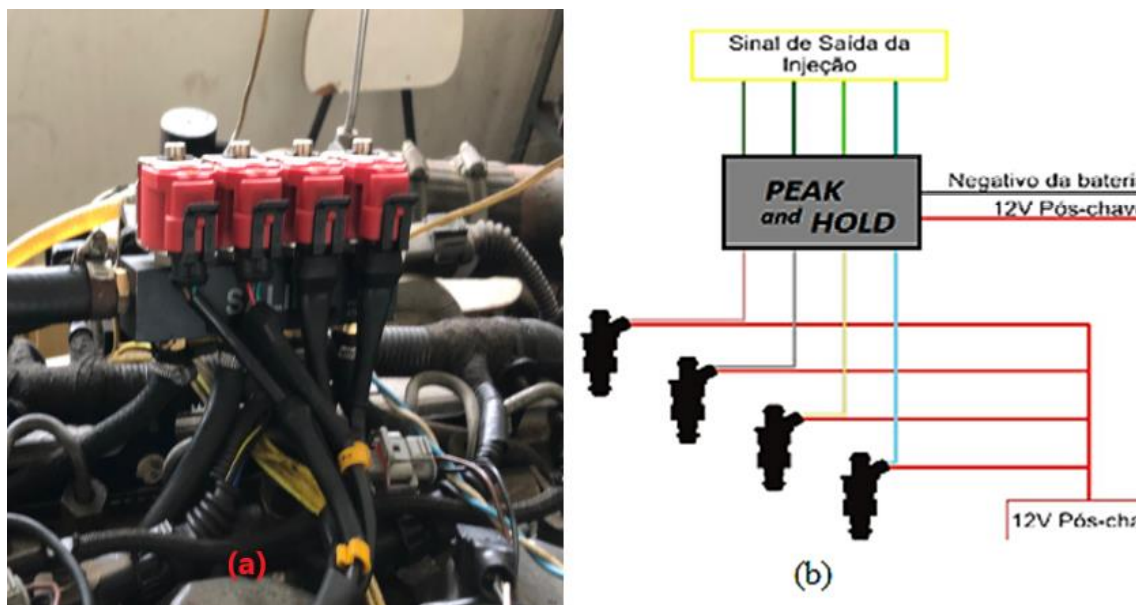


Figura 18– (A) Eletroválvulas; (B) Sistema de acionamento das eletroválvulas

Fonte: Autor

4.8 SISTEMA DE CONTROLE DE INJEÇÃO BIODIESEL - GNV.

Para conseguir injetar dois combustíveis na câmara de combustão do motor em estudo fez se necessário desenvolver um sistema para controlar o fluxo de óleo diesel/biodiesel e de gás natural veicular de tal forma que permita o uso simultâneo dos dois combustíveis. Nesta pesquisa foi feita uma atualização do equipamento de controle Biodiesel-GNV. Era utilizada a placa de aquisição e o microcontrolador conforme Figura 19 abaixo.

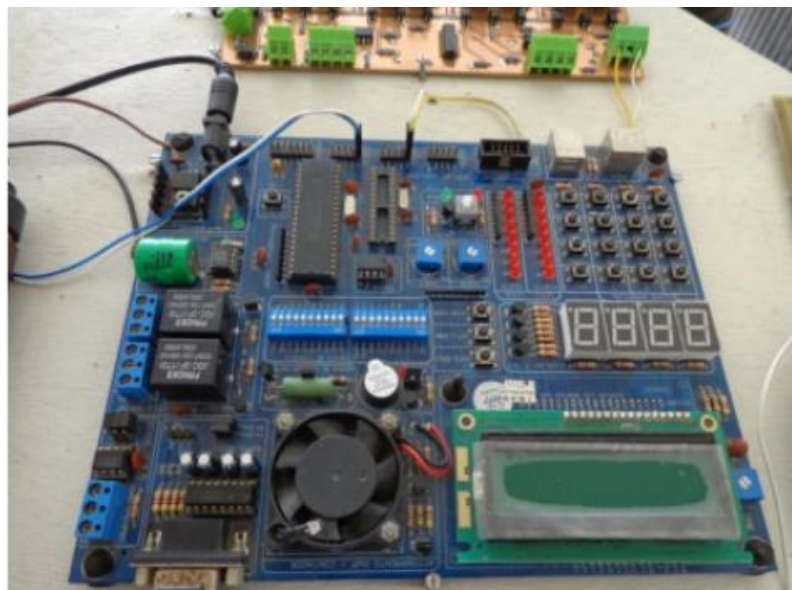


Figura 19 - Sistema do controle Biodiesel-GNV utilizado na pesquisa de Santos (2015).

Fonte: Autor

Na atualização do sistema eletrônico houve a substituição da placa de aquisição e do microcontrolador PIC18F4520, ver Figura 19, responsável pelo processamento do controle do fluxo dos combustíveis por uma placa com microcontrolador PIC18F4550 da microchip, ver Figura 20, a qual é mais compacta e permite maior capacidade de processamento, conseguindo melhor controle sobre os tempos de injeção, onde os do óleo diesel ocorrem em micro segundos.

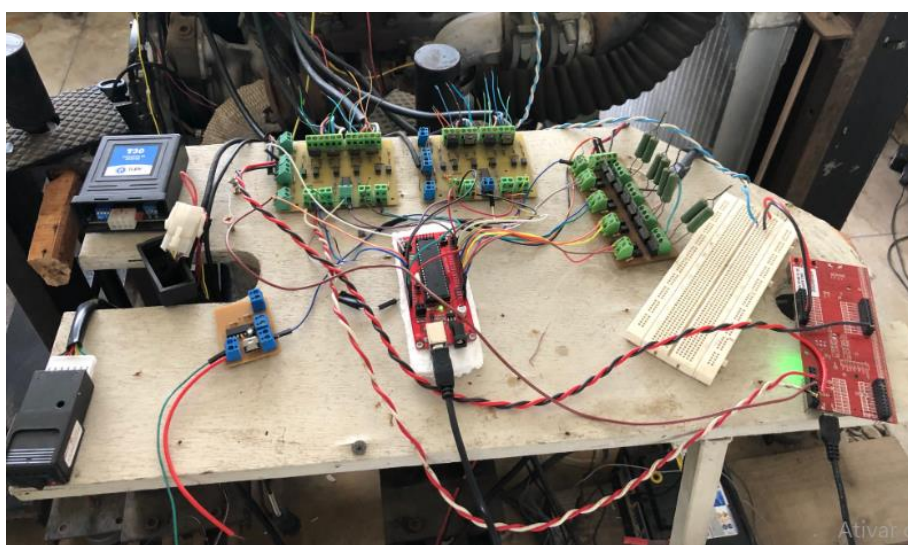


Figura 20 - Sistema de controle Biodiesel-GNV da pesquisa em estudo.

Fonte: Autor

O microcontrolador PIC18F4550 utilizado na Placa de controle do Sistema Biodiesel-GNV tem as seguintes especificações:

- Chip: PIC18F4550
- Pinos: 40
- Memória de Programa (Flash): 32Kb
- Memória de Dados (RAM): 2Kb
- Memória EEPROM: 256 bytes
- Velocidade de Operação: até 48Mhz
- Portas I/O: 35
- Portas A/D: 13 (10-bit)
- Comparadores: 2
- Ampla faixa de tensão de Operação: 2,0V à 5,5V
- 20 tipos de interrupções
- Arquitetura RISC (set de instruções reduzidas)
- 31 níveis de STACK - Módulo CCP (Capture/Compare/PWM)
- Porta Paralela: 8 bits
- Timers: 1 (8-bit), 3 (16-bit)
- WDT (WatchDogTimer)
- Porta de Comunicação USB 2.0 (Full Speed)
- Comunicação UART, USART, SPI, I2C

Fez-se necessário o uso da instrumentação eletrônica e de alguns subsistemas eletrônicos:

- Sistema de aquisição de sinais;
- Sistema de controle diesel GNV
- Sistema de acionamento dos injetores diesel;
- Sistema de acionamento dos injetores GNV
- Modulo peak-hold dos injetores do GNV;

Cada subsistema citado tem funções específicas no sistema de controle biodiesel-GNV conforme fluxograma da Figura 21 abaixo:

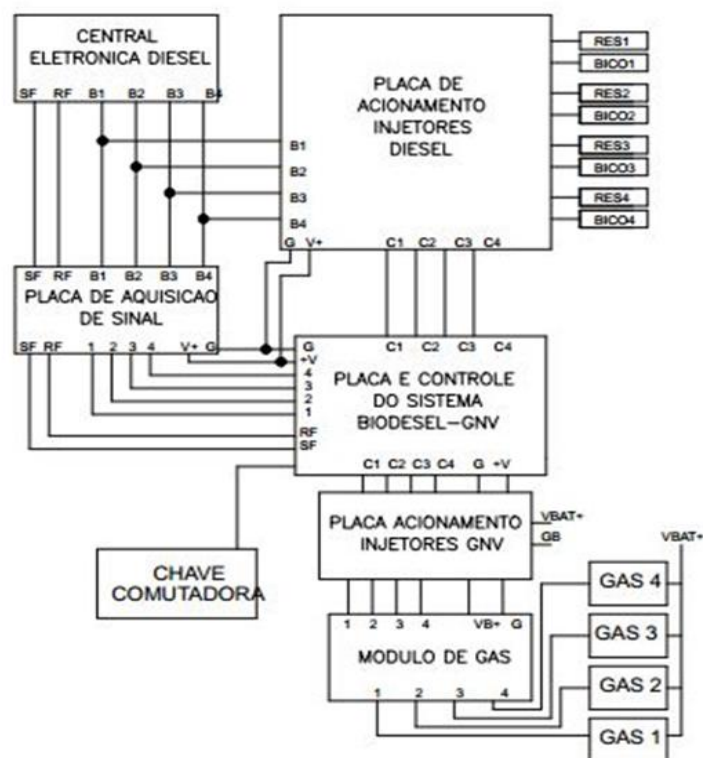


Figura 21 - Fluxograma do sistema biodiesel-GNV

Fonte: Santos (2015)

4.9 SCANNER NAPRO PC TRUCK 5000

O PC-SCAN50000 USB é o scanner com tecnologia brasileira, que atende grande parte da frota nacional e importada. Desenvolvido para atender as necessidades dos mecânicos, funciona junto a um computador (PC ou Notebook).

Com as evoluções tecnológicas no mercado, a rápida comunicação USB associada a um computador, permite uma ótima velocidade de processamento dos dados, o que traz uma rápida resposta dos sistemas analisados e atende aos diversos protocolos e sistemas.



Figura 22 - Scanner NAPRO PC TRUCK 5000

Fonte: autor

Principais funções:

- Consultar a memória de avarias (leitura do código de falhas)
- Limpar a memória de avarias
- Diagnóstico de sensores e elementos atuadores
- Regulagem básica
- Orientação ao mecânico na identificação de defeitos
- Modo Contínuo
- Leitura dinâmica de parâmetros do veículo, dependendo do tipo de injeção, permite ver na tela do computador uma série de valores ao mesmo tempo como Rotação do Motor, Temperaturas do Líquido de Arrefecimento, Ar de admissão, Óleo e Combustível, Pressões do Combustível e Turbo, Posição Pedal do Acelerador, etc.

O PC-TRUCK5000 abrange vários protocolos de comunicação inclusive o CAN. Trabalha conectado em qualquer computador ou Notebook compatível com algumas características mínimas.

4.10 ANALISADORES DE EMISSÕES

4.10.1 Analisador de gases PC-MULTIGÁS

O PC-MULTIGÁS é um Analisador infravermelho de alta tecnologia para CO, CO₂, HC, O₂, NO_x, Lambda e AFR, ver Figura 23. Baseado no método de medição de infravermelho não dispersivo, que atende as normas vigente “NBRs, OIML R99 CLASS I, ISO 3930 e ASM/BAR 97, onde a transferência de dados para o computador se dá através da interface USB.



Figura 23 - Analisador de Gases Pc-Multigás

Fonte: Autor

Dados técnicos:

Alimentação: 12VDC ou 110/220VAC - 60Hz- Escalas:

CO : 0 - 15%

CO₂: 0 - 20%

HC : 0 - 20000ppm Hexano

O₂ : 0 - 25%

NO_x Opcional: 0 - 5000 ppm

Lambda: 0 - 9.99

AFR : 0 - 99.99

Interface Serial: RS 232C

Eliminador de água Condensada (NAPRO, 2014)

4.10.2 Analisador de Opacidade NA9000

O sistema NA-9000 é um analisador de opacidade de fluxo parcial, ver Figura 24, provido de um módulo controlado por microprocessador. O conjunto ótico de medição atende ou excede os seguintes requerimentos e normas: ISO(Worldwide), PTB – AVII(Germany) MOT(United Kingdom), 1996 French Regulations, NBR 12897 / 13037, onde o monitoramento das emissões é realizado através do software que fornece o detalhamento das medições.



Figura 24 - Analisador de Opacidade NA9000

Fonte: Autor

Tabela 14 - Características do NA9000

CARACTERÍSTICAS:	
Opacidade	0 ... 99,9%
Coef. de Absorção de luz K	0 ... 9,99 m ⁻¹
Precisão	+/-2 relativo
Resolução	0,1
Fluxo	Parcial
Temperatura da câmara	75 °C nominal
Comprimento do feixe	430 mm (equivalente)

Tempo de resposta	0,9 ... 1,1s
Tensão de alimentação	220 VAC (12 VDC/110 VAC opcional)
Temperatura ambiente de funcionamento	5 ... 40 °C
Umidade ambiente de funcionamento	0 ... 95%
Frequência	50 / 60 Hz
Potência	400W (NAPRO, 2014)

CAPÍTULO V – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão abordados todos os aspectos relacionados à metodologia experimental adotada para o presente trabalho. Uma vez descritos e discutidos os aspectos construtivos e funcionais do aparato experimental, informando em detalhes quanto aos meios de obtenção dos valores e aos parâmetros de interesse, resta neste momento do presente trabalho, abordar a metodologia empregada.

5.1 CONFEÇÃO DO ACOPLAMENTO MOTOR E DINAMÔMETRO.

Antes de tudo, para realizar os testes experimentais se fez necessário a confecção de um novo acoplamento entre o motor e dinamômetro. Em testes experimentais anteriores houve o rompimento no acoplamento da marca Antares da linha AT aplicações convencionais, ver Figura 25.



Figura 25 - Acoplamento Antaris AT versão especial acoplado e espaçador após ruptura.

Fonte: Autor

O acoplamento da linha AT é um acoplamento flexível, o qual apresenta grande benefício de absorção de desalinhamento reduzindo o esforço entre o eixo do dinamômetro e o volante do motor. Além disso absorve choques mecânicos no início da rotação, e reduz os problemas de vibrações e ruídos. Provavelmente um desalinhamento causou a ruptura do acoplamento da marca antares.

Como solução foi confeccionado um acoplamento, ver Figura 26, a partir do eixo cardan de uma Ford ranger. O novo acoplamento possibilitou a realização dos testes, porém com pouca absorção de choques mecânicos, vibrações e ruídos, principalmente em baixas rotações.

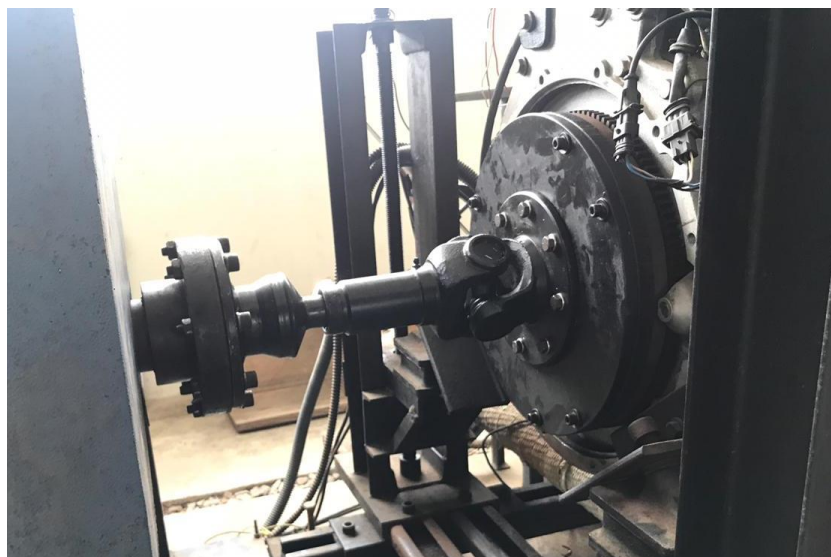


Figura 26 – Acoplamento eixo cardan acoplado entre dinamômetro e motor.

Fonte: Autor

Algumas medições, na faixa de 800 rpm e acima de 2200 rpm, se tornaram inviáveis de realizar devido ao nível de vibração e ruído que o conjunto apresentava. Por questões de segurança, optou-se por trabalhar dentro da faixa de rotação a qual não havia alto nível de vibração e ruído, ou seja, entre 1000 e 2200 rpm.

5.2 PREPARAÇÃO DAS MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS.

As misturas de biodiesel foram realizadas utilizando de óleo diesel S10 (possui em sua composição 10% de biodiesel) encontrado comumente nos postos de abastecimento e o biodiesel B100.

Vale salientar que no período em que o combustível foi adquirido o teor de biodiesel era de 10% em sua composição. Poucos meses depois houve uma evolução na porcentagem do biodiesel para 11% e atualmente (dezembro/2020) o teor é de 12%.

Devido ao óleo diesel comercializado na ocasião dos testes possuir 10% de biodiesel em sua formulação, para realizar a preparação das misturas necessárias para os ensaios (B20 e B50) foi formulado por dedução matemática das proporções necessárias o equacionamento a seguir:

$$Q_{bd} = \frac{Q_L}{0,90} * (\%bd - 0,1) \quad (\text{Eq 5.1})$$

$$Q_d = Q_L - Q_{bd} \quad (\text{Eq 5.2})$$

Onde:

Q_{bd} : Quantidade de B100 que deve ser acrescentada

Q_L : Quantidade em litros da mistura desejada de biodiesel

$\%bd$: Porcentagem que deseja obter de biodiesel

Q_d : Quantidade de óleo Diesel (B10) utilizada na mistura

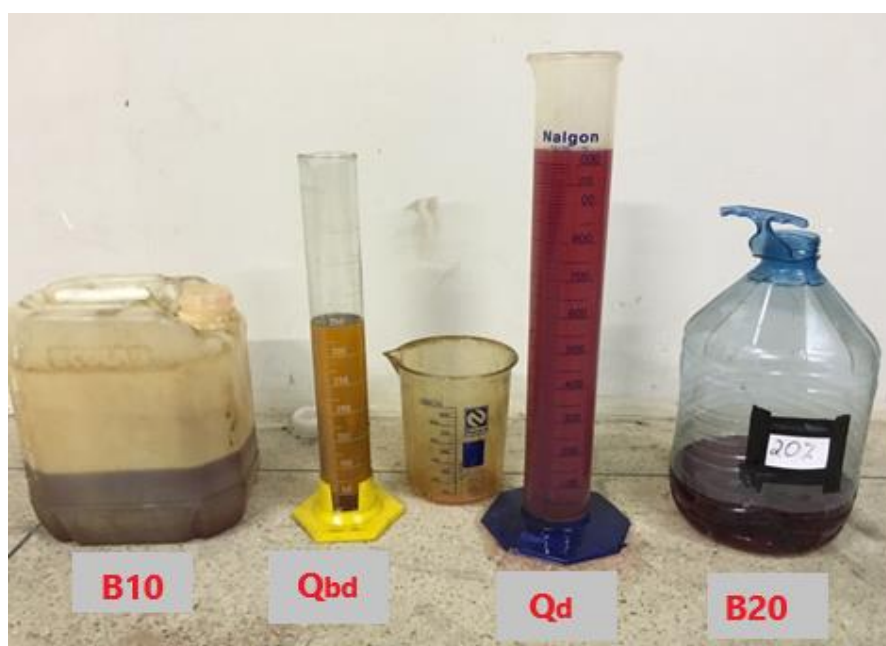


Figura 27 - Preparação das misturas de combustíveis

Fonte: Autor

Por exemplo, para se obter a quantidade de 1,5L de biodiesel B20, temos:

$Q_L = 1,5 \text{ L}$

$\%bd = 0,20$

Aplicando os valores desejados, obtêm-se:

$$Q_{bd} = 0,166 \text{ L} = 166 \text{ ml}$$

Então,

$$Q_d = Q_L - Q_{bd}$$

$$Q_d = 1500\text{ml} - 166 \text{ ml} = 1334 \text{ ml}$$

Sendo assim, é necessário em 1334 ml de óleo diesel (B10) acrescentar 166 ml de biodiesel B100 para se ter 1,5 L de biodiesel B20.

Partindo dessa metodologia foram formuladas as misturas de biodiesel B20 e B50 aplicadas nesse experimento.

5.3 ENSAIOS DINAMOMÉTRICOS.

Para o levantamento das curvas de torque e potência foram realizados ensaios com o dinamômetro LOGS elétrico de corrente de Foucault. A metodologia aplicada aos testes foi de acordo com as recomendações fornecidas pelo fabricante.

O motor é acionado e aguarda-se alcançar a temperatura para entrar em regime de operação, então com o dinamômetro no modo manual é feita a aceleração do motor pelo operador até que a rotação fique pelo menos 400 rpm acima da rotação alvo. Após estabilizar na rotação, no mínimo 400 rpm acima da rotação alvo que se deseja realizar os testes, é colocado o dinamômetro no modo automático e escolhida a rotação alvo no painel mostrador. O sistema do dinamômetro vai ajustando a aceleração e a carga de forma automática. Com o aumento da carga a rotação vai caindo até alcançar a rotação alvo. Há uma barra indicadora no painel que fica oscilando até chegar no centro onde indica que a rotação alvo foi atingida.

A partir do momento que a rotação alvo é alcançada, verifica se os valores de torque e potência que permanecem mais tempo dentro da faixa de rotação alvo (rotação alvo $\pm$ 10 rpm). O teste é realizado por 180s, onde ao mesmo tempo também é mensurado o consumo de combustível.

Existe uma limitação para abranger rotações mais elevadas nos testes com o dinamômetro, já que para fazer o teste na rotação de 2200 rpm, primeiro é necessário

alcançar a rotação de no mínimo 2600 rpm e, nessa faixa de rotação é gerado um ruído e vibração muito elevado.

5.4 MEDIÇÃO DOS GASES DE EXAUSTÃO E OPACIDADE.

Concomitante aos ensaios dinamométricos foi feita a medição dos gases de exaustão do motor MWM 4.07 TCE utilizando as diferentes misturas de biodiesel e biodiesel + GNV.

Para efetuar a medição dos gases o motor foi estabilizado nas rotações dentro da faixa de 1000 a 2200 rpm a cada 200 rpm e utilizando o equipamento PC-MULTIGÁS para analisar os gases através do método infravermelho de alta tecnologia para CO, CO₂, HC, O₂, NO_x, Lambda e AFR.



Figura 28 - PC Multigás analisador de gases

Fonte: Autor

A sonda de amostragem do equipamento é colocada ao ar livre e através do software do equipamento é inicializado o processo de medição e feito o procedimento de zeragem, o qual consiste em ter o ar ambiente como referência para as medições. Em seguida a sonda de amostragem é inserida no escapamento da exaustão do motor após entrar em regime de operação, então é iniciada a medição. Ao término de cada determinação, realizou-se a

drenagem completa do sistema de alimentação, evitando, com isso, a contaminação do ensaio seguinte. Além disso, depois da troca do combustível, o motor ficou em funcionamento em torno de 10 minutos antes do início de cada novo teste.

Devido a medição do equipamento ser feita instantaneamente, ver Figura 29, foram feitas 5 medições dos gases a cada 10 segundos, e depois feita as médias dos valores para CO, CO₂, O₂, HC E NO_x obtidos na queima das misturas de B10, B20, B50, B10 + GNV, B20 + GNV e B50 + GNV. Posteriormente no capítulo VI, que trata dos resultados e análises experimentais, será mostrado os gráficos indicativos das emissões analisadas.

NAPRO ELETRÔNICA INDUSTRIAL LTDA DIADEMA - SÃO PAULO - BR Telefone : 0 XX 11 4066-6677 Fera em Tecnologia			
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor R.E.F.
84429	5.129	5.4	0,090
RPM (Rotação do Motor)	:	0	rpm
Temperatura do Óleo	:		°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,06	% vol
CO₂ (Dióxido de Carbono)	:	2,8	% vol
O₂ (Oxigênio)	:	24,0	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	35	ppm vol
NO_x (Óxido de Nitrogênio)	:	99	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	0,31	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	183	ppm vol
Fator de Diluição	:	5,24	
Diluição	:	2,86	% vol
λ. Lambda	:	2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	27,56	
Data : 28/02/20 Napro Eletrônica Industrial Ltda 11.06/11C			

Figura 29 - Relatório das emissões de poluentes instantânea para B20 a 2000rpm.

Fonte: Autor

Com analisador de opacidade NA-9000T, opacímetro de fluxo parcial, instrumento utilizado para determinar a opacidade da fumaça gerada por um motor de ignição por

compressão, captando parte da fumaça expelida através do cano de descarga, ver Figura 30, foi possível determinar os valores da opacidade do motor MWM 4.07 TCE em estudo.

Sendo a opacidade medida igual a fração da luz emitida pela fonte de luz do opacímetro que não atinge o receptor, e o coeficiente de absorção de luz (k) definido pela lei de Beer-Lambert com base na opacidade.

Seguiu-se a metodologia aplicada para medição dos gases poluentes, aguardava-se o motor entrar em regime de operação em seguida estabilizar na rotação para início da medição, concomitante ao aquecimento do motor foi esperado o tempo de aquecimento do equipamento, tempo decorrido entre o momento em que o opacímetro é ligado e o momento em que ele fica apto a satisfazer as exigências metrológicas, e então inserida a sonda de amostragem no cano de exaustão do motor. Assim foram feitas 5 medições em intervalos de 10 segundos do nível de opacidade nos gases de exaustão do motor.



Figura 30 – Analisador de opacidade NA-9000T da Napro Eletrônica

Fonte: Autor

Após a realização da medição de opacidade para a faixa de rotação escolhida e com diferentes porcentagens de biodiesel e biodiesel + GNV, um laudo de emissões é emitido pelo referido equipamento. A amostra das medições e os valores medidos são mostrados a seguir:



UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
RECOGAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL
Telefone : 0 XX 83 3216-7872
JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL

Medição Instantânea
Impressão de Valores :

Valores Instantâneos :

RPM (Rotação do Motor) : 1010 rpm
Temperatura do Tubo : 75 °C
Temperatura do Gás : 46 °C
% Opacidade : 4,6 %
K (Coeficiente de Absorção da Luz): 0,11 m⁻¹

Valores Confirmados:

Medição 1:	Rotação: 1060 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,12 m ⁻¹
Medição 2:	Rotação: 1050 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,11 m ⁻¹
Medição 3:	Rotação: 1050 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,11 m ⁻¹
Medição 4:	Rotação: 1050 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,10 m ⁻¹
Medição 5:	Rotação: 1050 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,11 m ⁻¹
Medição 6:	Rotação: 1060 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,11 m ⁻¹
Medição 7:	Rotação: 1070 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,10 m ⁻¹
Medição 8:	Rotação: 1060 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,11 m ⁻¹
Medição 9:	Rotação: 1030 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,11 m ⁻¹
Medição 10:	Rotação: 1040 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,11 m ⁻¹

Média Calculada: 0,10 m⁻¹

Data 04/03/20

Versão : 1.59/12J
Napro Eletrônica Industrial Ltda

Figura 31 – Relatório da opacidade dos gases e coeficiente de absorção da luz para B20 a 1000rpm.

Fonte: Autor

5.5 MEDIÇÃO DO CONSUMO DAS MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS ENSAIADAS.

A medição do consumo de combustível foi realizada utilizando um recipiente com capacidade de 2 litros de óleo e uma balança da marca Balmak ELC-25 com capacidade de 25 quilogramas e precisão de 2 gramas, ver Figura 32.



Figura 32 - Recipiente e balança para medição de consumo

Fonte: Autor

Utilizando um suporte para o reservatório de vidro transparente e com graduação, foi possível verificar o consumo de óleo em volume.

O consumo de combustível em massa, que é o mais interessante para fins de quantificar a energia consumida, foi medido através da balança interligada por um cabo serial a um notebook com software criado no próprio LEME – UFPB para aquisição dos valores lidos na balança de acordo com a configuração desejada.

A medição foi realizada de 1000 a 2200 rpm, a cada 200 rpm, onde foi estabilizado o motor em cada rotação desejada para ensaio. Ao estabilizar o motor na rotação requerida é configurado no software da balança os dados de entrada, sendo o tempo de medição que se deseja e o intervalo entre amostras coletadas.

Foi utilizado o tempo de medição total do consumo de 180 segundos com intervalo de aquisição do consumo do biodiesel de 20 segundos, totalizando 9 amostras de medição.

É feita a média das amostras de consumo e tem-se o valor do consumo a cada 180s de operação do motor estabilizado a dada rotação conforme as Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Média de consumo da massa de combustível com diesel/biodiesel

RPM	B10 (180s) g	B20 (180s) g	B50 (180s) g
1000	81	90	92
1200	99	83	78
1400	90	90	80
1600	99	110	90
1800	110	118	103,5
2000	175,5	162	139,5
2200	252	202,5	171

Tabela 16 - Média de consumo de massa de combustível dual (diesel/biodiesel + GNV)

	Consumo 180 S			Consumo 180 s			Consumo 180 s		
	B10	GNV	B10 + GNV	B20	GNV	B20 + GNV	B50	GNV	B50 + GNV
1000	56	70	126	62	77	139	62	77	139
1200	70	75	145	44	48	92	50	55	105
1400	65	62	127	65	62	127	49	47	96
1600	63	62	125	75	73	148	57	56	113
1800	57	54	111	61	59	120	58	55	113
2000	105	108	213	97	100	197	84	88	172
2200	165	146	311	132	117	249	112	100	212

CAPÍTULO VI - RESULTADOS E ANALISES

Os resultados experimentais e suas análises relacionadas com o objetivo do estudo em questão são considerados no presente capítulo e apresentados divididos nos seguintes tópicos.

6.1 CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS ENSAIADOS.

Os testes experimentais foram realizados e adquiridos os resultados vindos do dinamômetro após a utilização dos combustíveis no motor MWM nas proporções B10, B20, B50, B10 + GNV, B20 + GNV e B50 + GNV.

As curvas de torque e potência foram geradas a partir dos dados fornecidos pelo dinamômetro seguindo a metodologia descrita pelo fornecedor do equipamento.

A Figura 33 esboça as curvas de torque e potência com a utilização dos combustíveis B10, B20 e B50. Analisando as curvas geradas é possível verificar que há uma indicação de perda de torque e potência com o acréscimo da porcentagem de biodiesel nos combustíveis ensaiados. Assim, quanto maior o acréscimo de biodiesel no óleo diesel mais houve perda de torque e potência, realçando uma notável diferença entre os valores das curvas com a aplicação de B10 e B50.

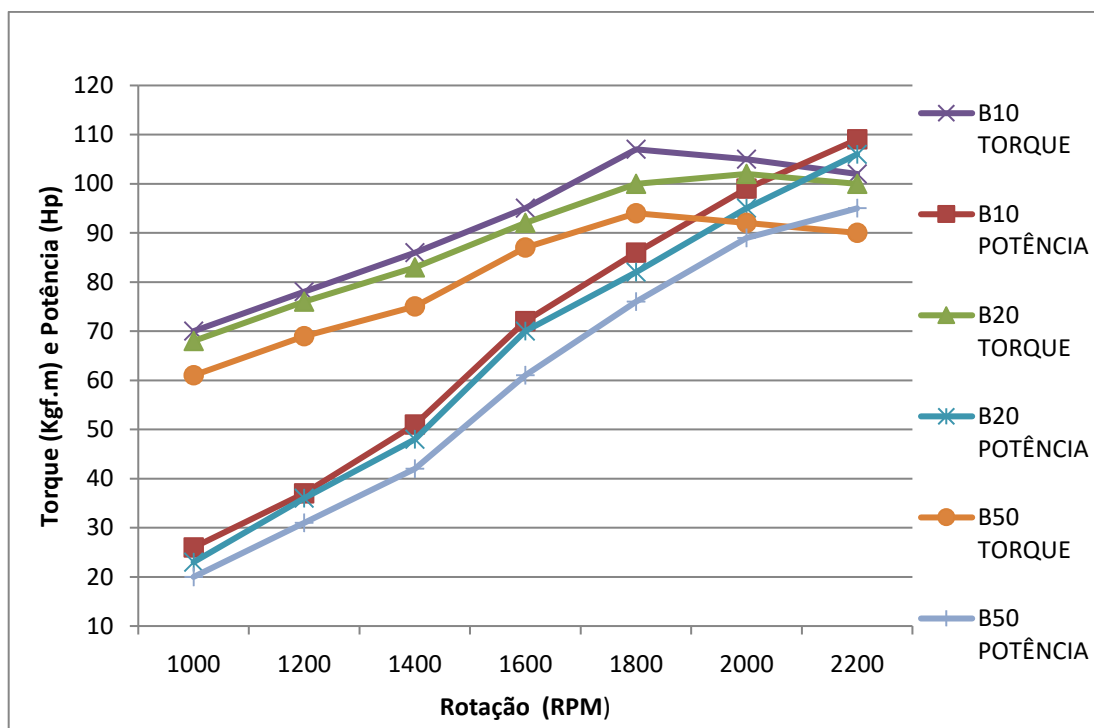


Figura 33 - Curvas de torque e potência com a utilização de B10, B20 e B50

A Figura 34 mostra as curvas de torque e potência com a utilização dos combustíveis B10 + GNV, B20 + GNV e B50 + GNV.

As curvas com utilização de diesel/biodiesel + GNV apresentaram menor valor de torque e potência em relação a utilização apenas de diesel/biodiesel, chegando a em determinados pontos ter cerca de 17% de perda, como por exemplo na comparação entre a aplicação B10 + GNV e a aplicação do B50 + GNV. Tal fato pode estar relacionado a um excesso de injeção GNV que torna a mistura muito rica, isso causa alterações na qualidade da queima, acarretando uma taxa de compressão baixa e que não gera a potência ideal possível de ser obtida pelo motor. Sabe-se também que o B50 possui um PCI menor que o do combustível B10, ou seja, tem menor energia disponível no combustível, acarretando em uma sensível perda de energia disponível.

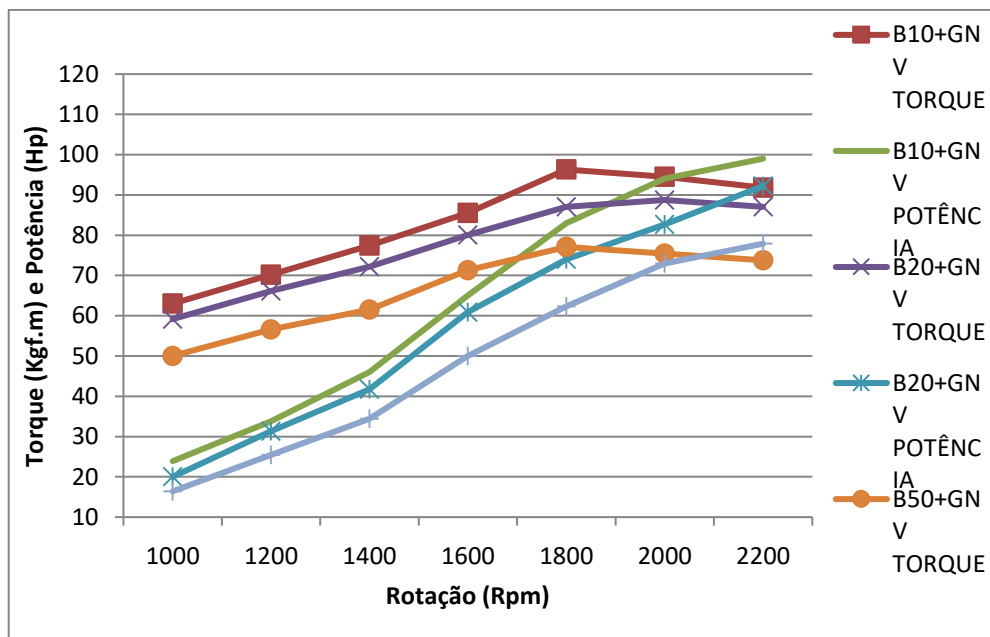


Figura 34- Curvas de torque e potência com a utilização de B10+GNV, B20+GNV e B50+GNV.

A Figura 35 mostra as curvas de torque de todos os combustíveis ensaiados. Fazendo uma comparação, temos que o combustível que apresentou a curva de maior torque foi o B10. É possível verificar uma tendência de queda das curvas após 2000rpm, indicando que o valor máximo de torque é alcançado por volta de 1800 a 2000 rpm.

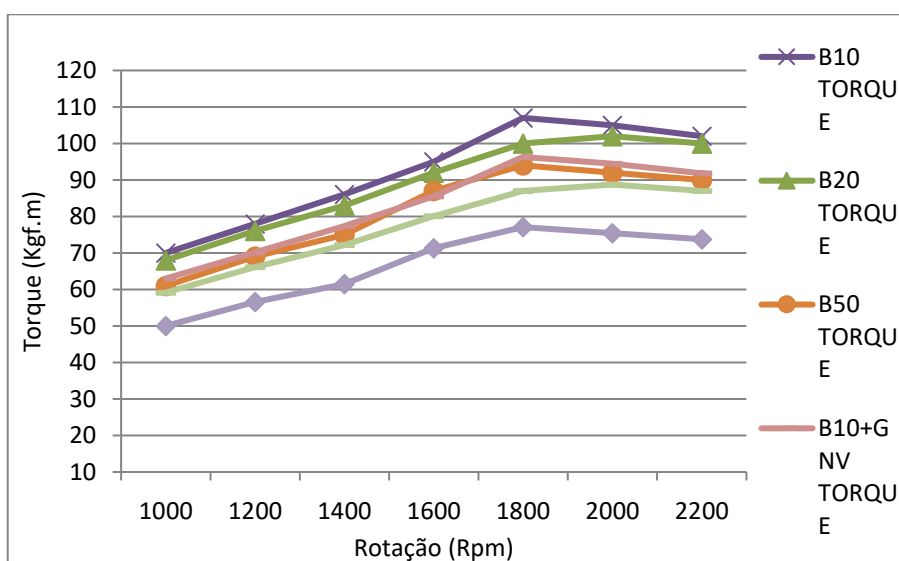


Figura 35 - Comparação entre as curvas de torque dos combustíveis ensaiados

No gráfico abaixo estão traçadas as curvas de potência para cada combustível ensaiado, ver Figura 36.

Analisando as curvas temos uma indicação de que a potência máxima ainda não é atingida dentro da faixa de rotação que foram realizados os testes, onde a rotação máxima alcançada no experimento foi de 2200 rpm. A curva com maior valor de potência foi referente ao ensaio com o combustível B10.

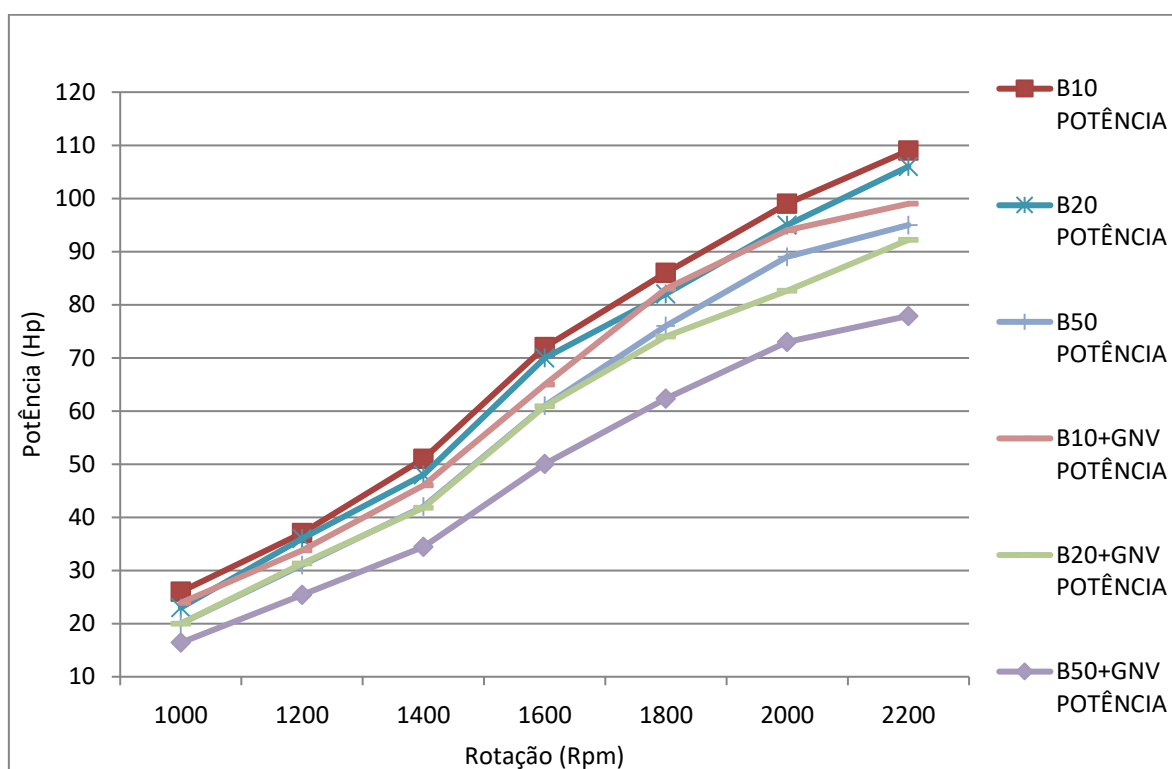


Figura 36 - Comparação entre as curvas de potência dos combustíveis ensaiados

6.2 CURVAS DE EMISSÕES DOS GASES DOS COMBUSTÍVEIS ENSAIADOS.

Nesse tópico aborda-se os resultados obtidos das emissões dos gases fazendo uma análise entre as curvas utilizando apenas diesel/biodiesel e diesel/biodiesel + GNV.

Conforme demonstrado no capítulo V, o qual trata da metodologia experimental, as curvas dos gases de exaustão analisados foram obtidas através das médias de medições instantâneas realizadas pelos equipamentos.

Os gases analisados foram o CO, CO₂, O₂, HC e NO_x resultantes da queima dos combustíveis B10, B20, B50, B10 + GNV, B20 + GNV e B50 + GNV.

A Figura 37, mostra as médias dos valores medidos de monóxido de carbono (CO) em porcentagem de volume por faixa de rotação ensaiada.

Fazendo a análise da Figura 37, observa-se que as emissões de CO aumentam conforme a rotação sobe para cada combustível ensaiado, sendo o combustível B10 o que emitiu a menor porcentagem média de CO. É possível notar que com o aumento da porcentagem de biodiesel na mistura diesel/biodiesel, há um leve acréscimo de emissão de CO. Já com a aplicação do diesel/biodiesel + GNV ocorre um aumento considerável na porcentagem média, no qual em algumas faixas de rotação chega a quase o dobro do valor em comparação com a utilização apenas do combustível diesel/biodiesel. O combustível B50 + GNV foi responsável pela maior emissão média de CO.

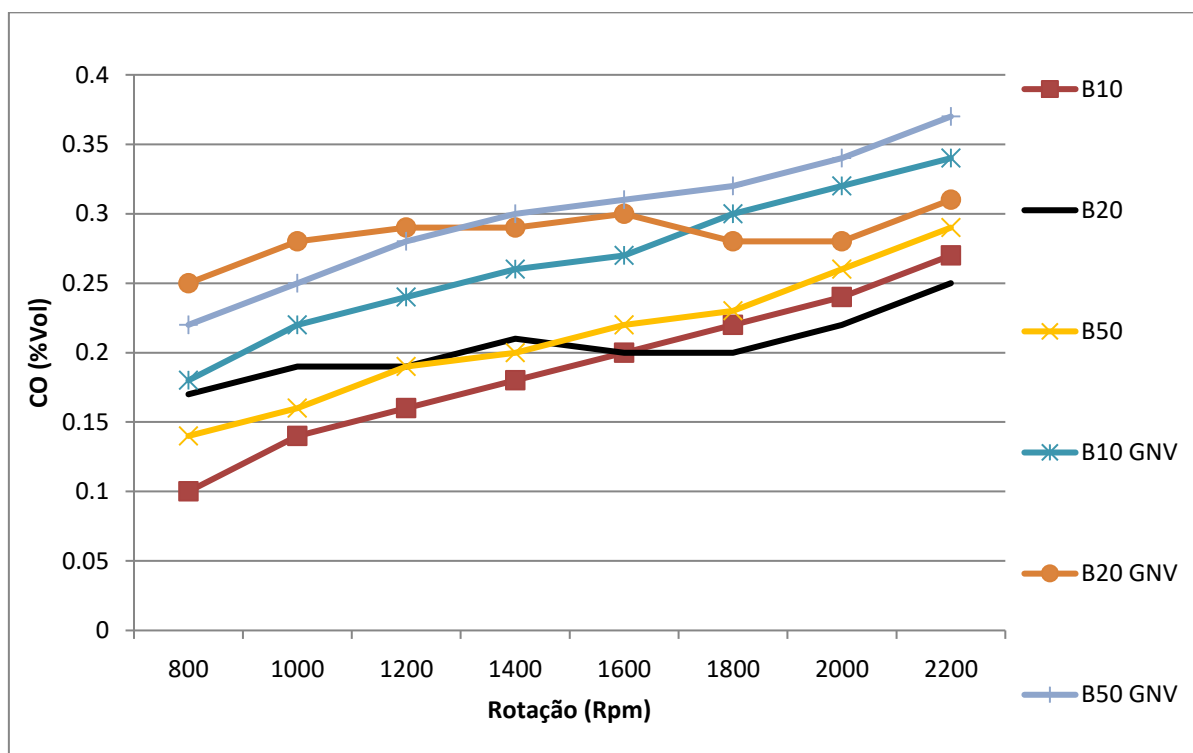


Figura 37 - Comparação das curvas de CO dos combustíveis ensaiados

As médias de concentrações de dióxido de carbono (CO₂) para cada combustível experimentado estão ilustradas na Figura 38, sendo medidas em porcentagem de volume em cada rotação.

Pode-se verificar o acréscimo da porcentagem de emissão de CO₂ com o aumento da rotação do motor em todos os combustíveis ensaiados. Dentre os combustíveis os de aplicação apenas de diesel/biodiesel obtiveram o maior nível de emissão de CO₂, no qual entre eles há uma leve diferença de emissões. Em relação as curvas com a utilização de diesel/biodiesel e GNV, houve uma queda considerável na emissão em comparação com os valores da aplicação apenas com diesel/biodiesel chegando a redução do dobro do valor.

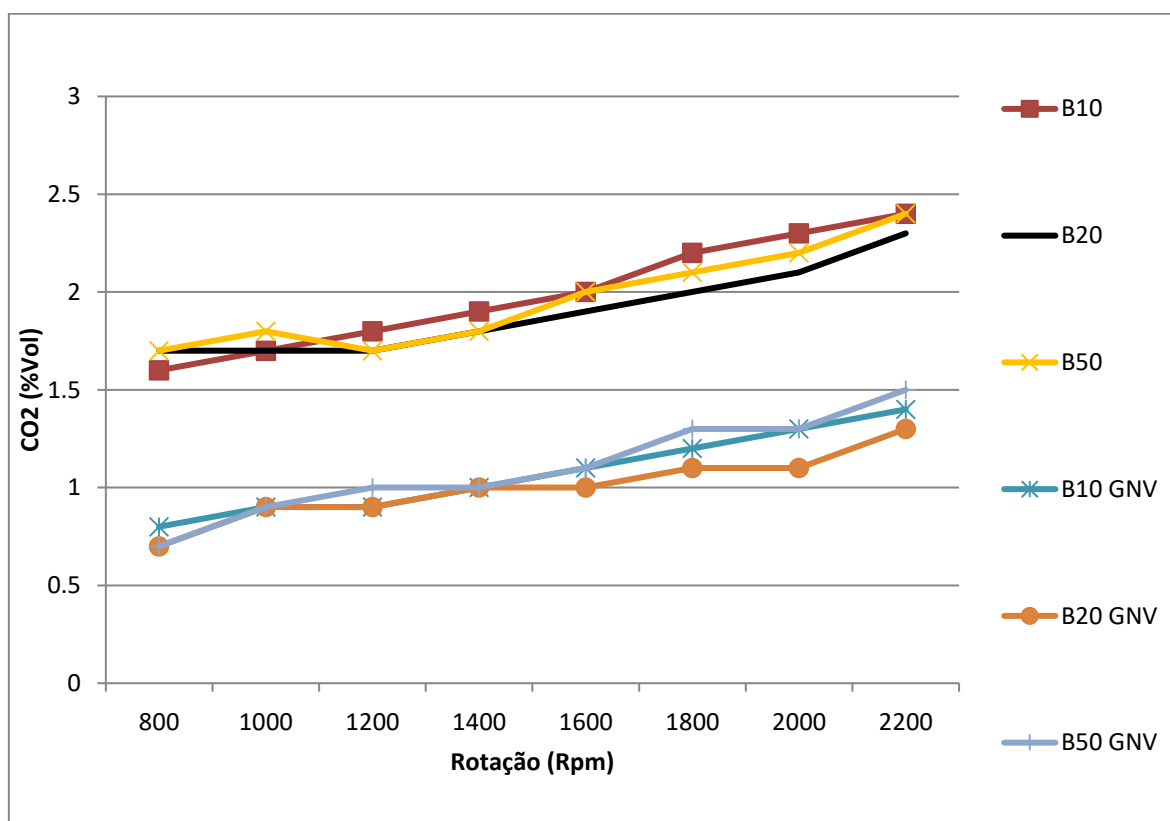


Figura 38 – Comparação das curvas de CO dos combustíveis ensaiados.

A Figura 39, demonstra para cada combustível ensaiado a média das concentrações de oxigênio medida em porcentagem de volume por faixa de rotação do motor experimentada.

Verifica-se uma tendência dos combustíveis ensaiados apenas com diesel/biodiesel de um leve acréscimo das concentrações de O₂ de acordo com aumento da rotação do motor, já os combustíveis diesel/biodiesel + GNV apresentam uma tendência de leve decréscimo com o aumento da rotação.

O combustível B20 apresenta menor curva de concentração de O_2 e o combustível B10 + GNV apresenta maior curva. Com a utilização do diesel/biodiesel + GNV ocorreu um aumento da concentração de O_2 em todas as curvas em relação a aplicação apenas com diesel/biodiesel.

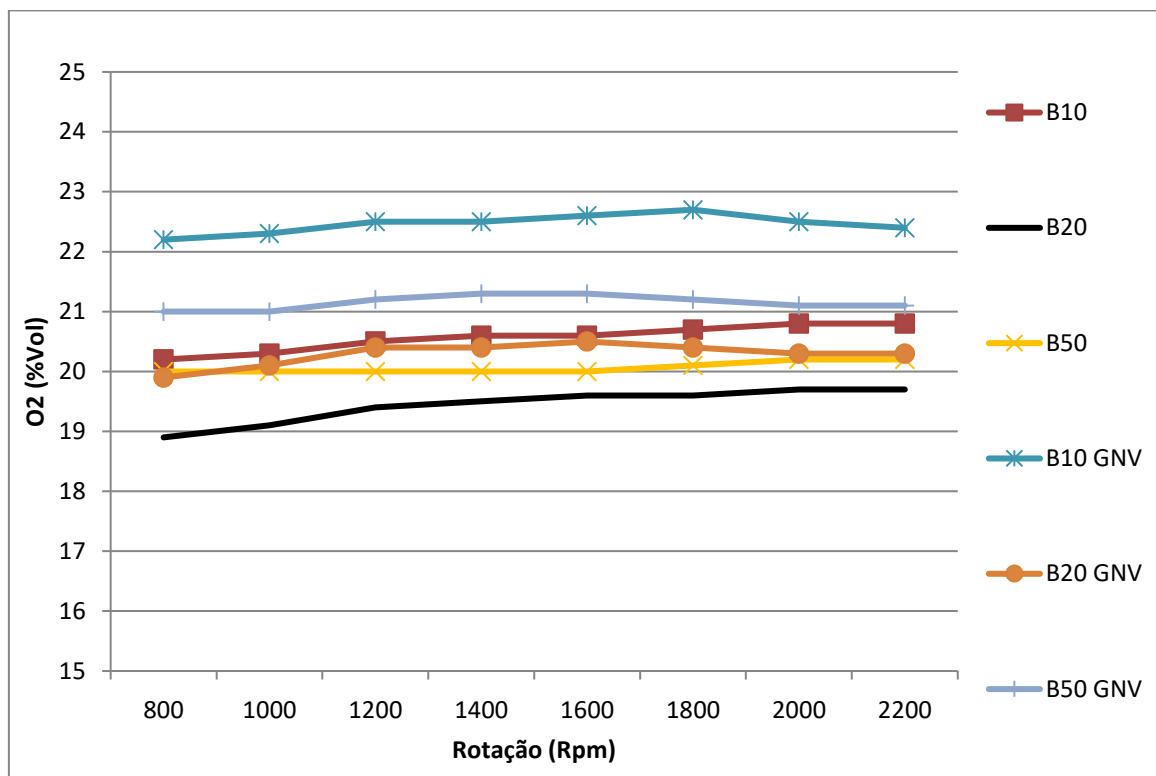


Figura 39 – Comparação das curvas de O_2 dos combustíveis ensaiados

A Figura 40, mostra as médias dos valores medidos da concentração de hidrocarbonetos (HC) em partes por milhão (PPM) para cada rotação ensaiada.

Analisando a Figura 40, nota-se que o maior nível de emissão de hidrocarbonetos ocorre com o ensaio do combustível B10 + GNV e o menor nível foi com o combustível B50, o qual a curva pouco teve alteração ao decorrer da faixa de rotação ensaiada. De acordo com (MANAVELLA, 2009), os motores Diesel trabalham com misturas pobres com relação ar/combustível entre 16,5:1 a 22:1/24:1. Neles o tempo para a formação da mistura é menor, pelo que, para assegurar uma combustão completa, deve existir excesso de ar. A falta deste excesso provoca a emissão de fuligem, monóxido de carbono (CO), e hidrocarbonetos (HC), devido à combustão incompleta. Sendo assim, pode-se afirmar que as misturas contendo

GNV emitiram maior quantidade de CO e HC por estarem trabalhando com misturas ricas e, portanto o processo de combustão foi incompleto.

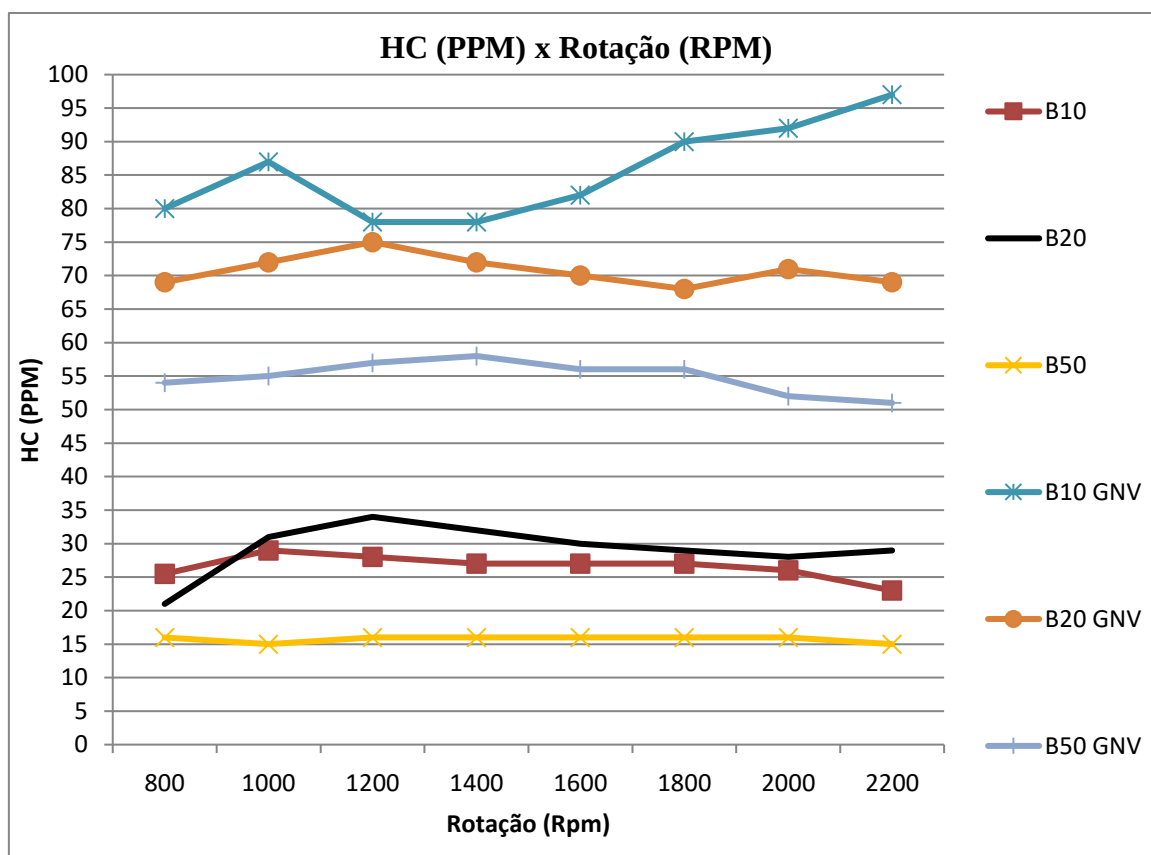


Figura 40 - Comparação das curvas de HC dos combustíveis ensaiados

A Figura 41, mostra o gráfico das médias dos valores medidos de óxidos de nitrogênio (NO_x) em partes por milhão (PPM) relacionado a cada rotação experimental.

É possível verificar que com a utilização das misturas de combustíveis com GNV houve um decréscimo considerável da emissão de NO_x. O B10 apresentou a curva com maior nível de NO_x e o combustível B50 + GNV apresentou o menor valor médio de NO_x.

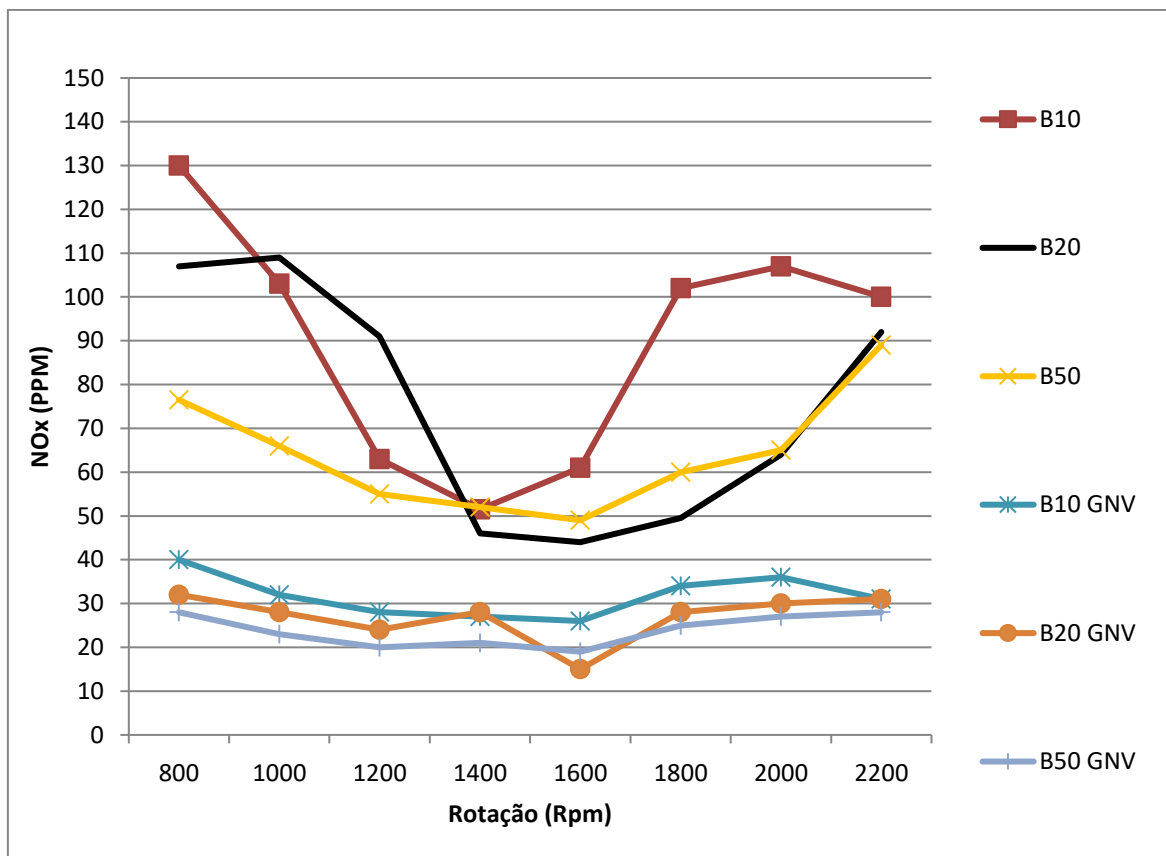


Figura 41 – Comparação das curvas de NOx dos combustíveis ensaiados.

6.3 OPACIDADE NOS GASES DE EXAUSTÃO.

As figuras abaixo indicam de duas formas a opacidade medida no escapamento de exaustão do motor em estudo. Sendo mensurado na Figura 42 em porcentagem, $N (\%)$ = porcentagem de enegrecimento por rotação (RPM) e, na Figura 43 em coeficiente de absorção da luz – $K (m^{-1})$ por cada ponto de rotação do motor testado (RPM).

Na Figura 42, ilustra-se o gráfico no qual a menor curva referente a opacidade é do combustível B10, já a maior curva de opacidade é referente a queima do combustível B50 + GNV. Percebe-se uma tendência do aumento da opacidade a partir do aumento da porcentagem de biodiesel, bem como com a utilização de GNV tem se a tendência do aumento em relação a utilização apenas de diesel/biodiesel.

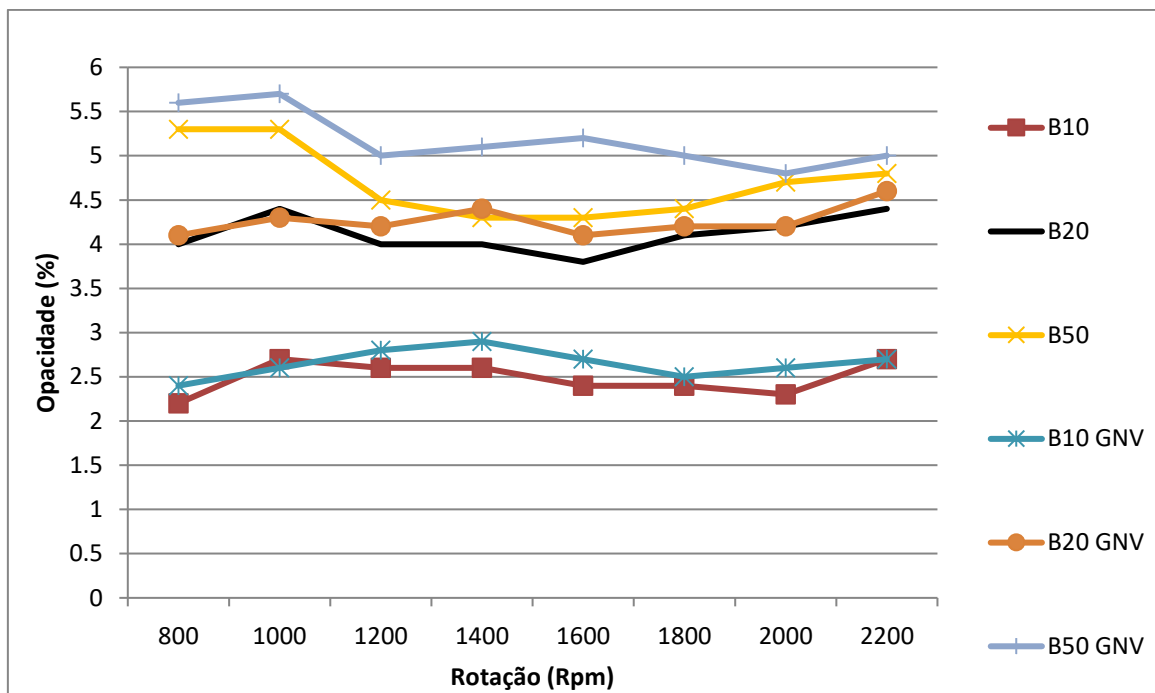


Figura 42 – Comparação das curvas de opacidade dos combustíveis ensaiados.

Na Figura 43, tem-se a menor média do coeficiente de absorção da luz com o uso do combustível B10, verifica-se uma semelhança entre os resultados obtidos da Figura 42 e 43.

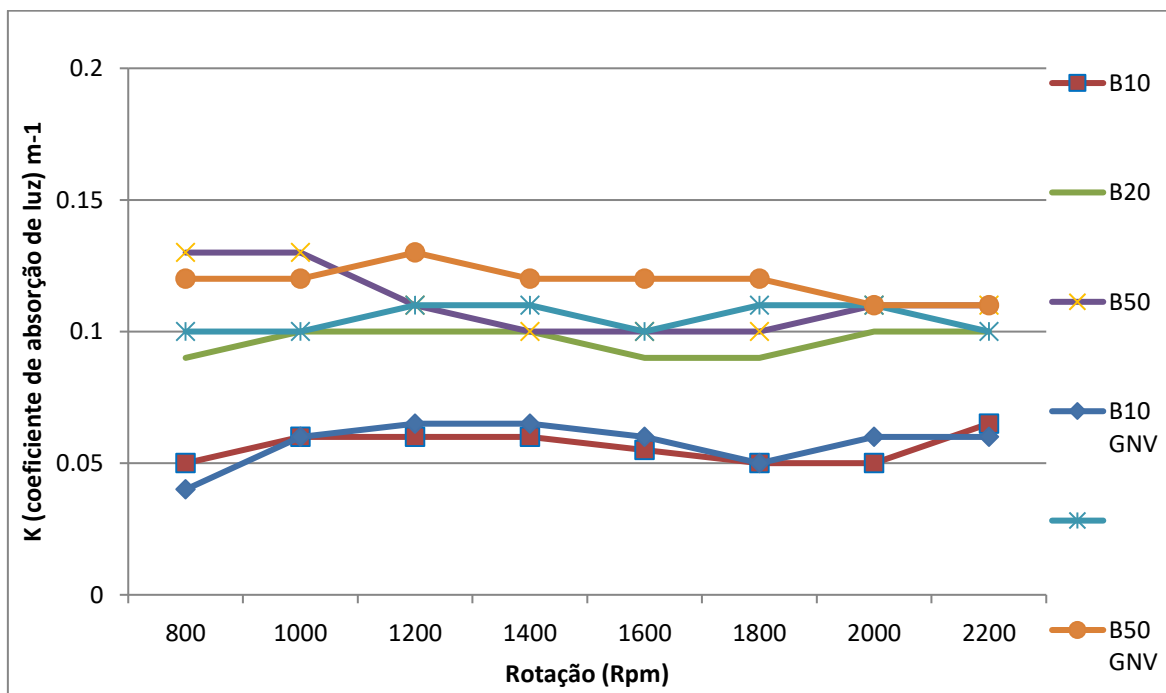


Figura 43 – Comparação das curvas de coeficiente de absorção da luz dos combustíveis ensaiado.

6.4 CURVAS DE CONSUMO DOS COMBUSTÍVEIS ENSAIADOS.

De acordo com a Figura 44 a curva que apresentou o maior consumo de combustível em 180 segundos de medição foi a do combustível B10 + GNV. Já o menor consumo ficou demonstrado pela curva do combustível B50.

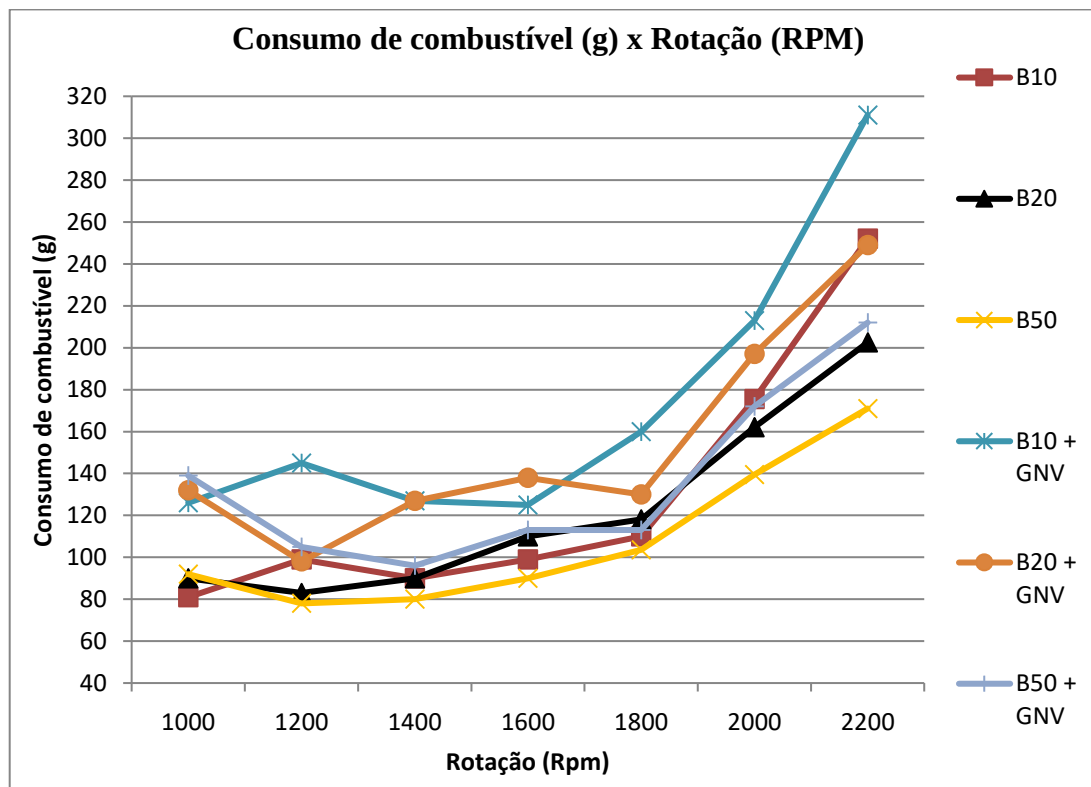


Figura 44 - Curvas de consumo de combustíveis ensaiados x Rotação

Um parâmetro importante para avaliar o desempenho de um motor é o consumo específico de combustível (CEC). Da Figura 45, verifica-se um menor CEC para a curva de combustível B10, com uma leve diferença entre a curva de B20 e B50. O maior consumo específico pode ser visto na curva para combustível B50 + GNV.

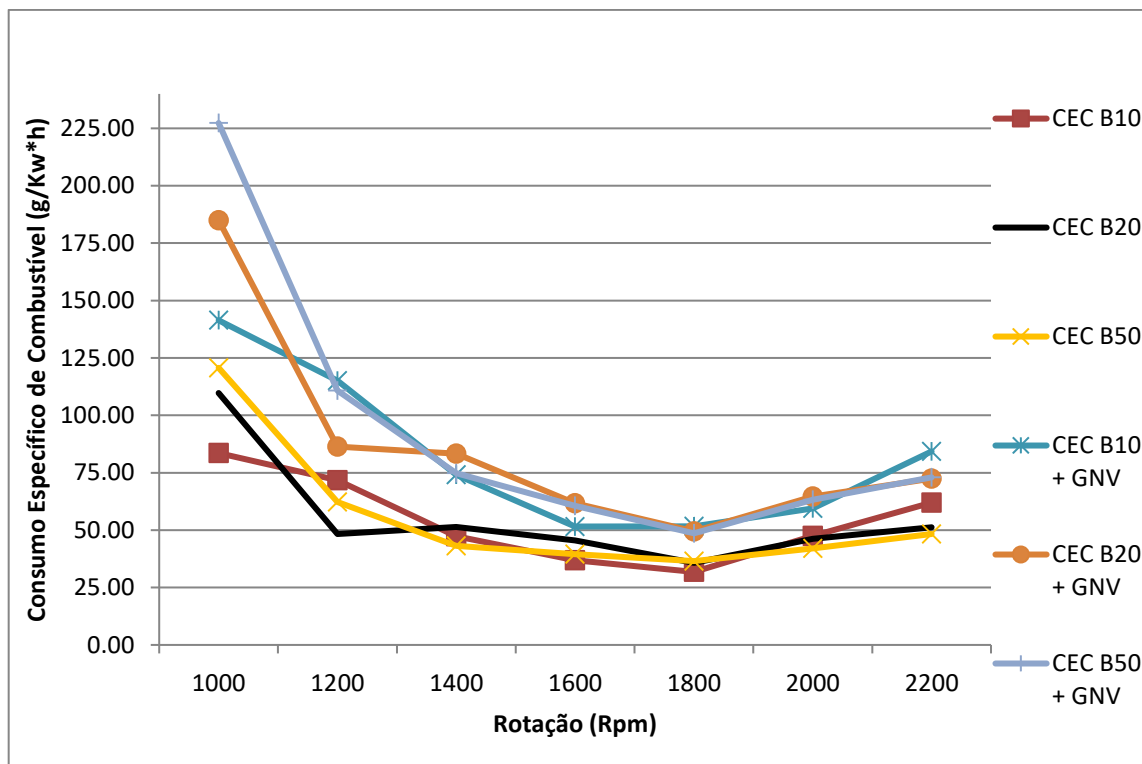


Figura 45 – Curvas de CEC dos combustíveis ensaiados x rotação.

A Figura 46 demonstra as curvas originais de potência e torque do motor MWM 4.07 TCA.

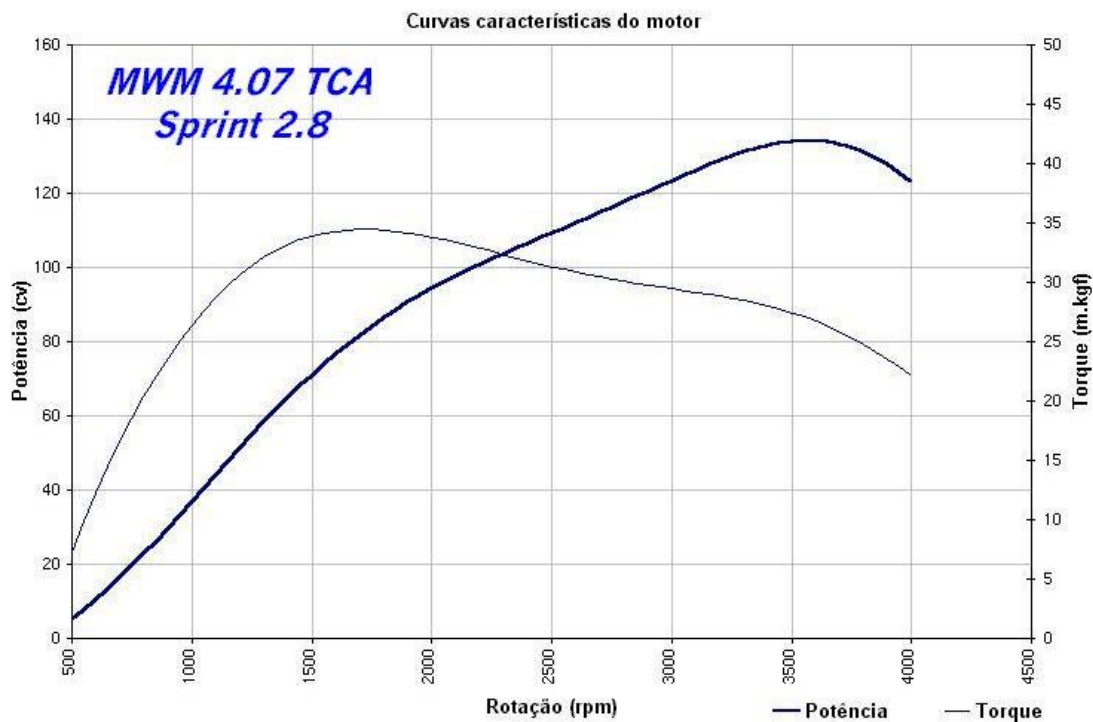


Figura 46 – Curvas características do motor MWM 4.07 TCA

Foi gerada a Tabela 17 com o intuito de facilitar a visualização dos parâmetros analisados e demonstrar dentre os parâmetros analisados qual combustível teve o maior e menor valor médio para cada parâmetro. A porcentagem mensurada é em relação ao valor de referência podendo ser o maior ou menor de acordo com o parâmetro analisado.

Tabela 17 – Comparativo dos parâmetros analisados entre os combustíveis ensaiados.

PARÂMETROS	COMBUSTÍVEIS ANALISADOS					
	B10	B20	B50	B10 + GNV	B20 + GNV	B50 + GNV
TORQUE	MAIOR	3% menor	13% menor	11% menor	17% menor	30% menor
POTÊNCIA	MAIOR	4% menor	14% menor	7% menor	19% menor	33% menor
CONSUMO	17% maior	12% maior	MENOR	37% maior	30% maior	21% maior
CEC	MENOR	2% maior	3% maior	34% maior	37% maior	42% maior
CO	MENOR	7% maior	10% maior	29% maior	34% maior	55% maior
CO2	49% maior	46% maior	48% maior	7% maior	MENOR	10% maior
O2	5,5 % maior	MENOR	3% maior	13,5% maior	4% maior	8% maior
HC	40% maior	46% maior	MENOR	80% maior	76% maior	71% maior
NOX	72% maior	68% maior	63% maior	24,5% maior	11,5% maior	MENOR
OPACIDADE	MENOR	60% maior	67% maior	7% maior	42% maior	52% maior

CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são feitas as conclusões sobre as análises dos resultados apresentados nos ensaios realizados com os combustíveis em estudo.

7.1 CONCLUSÕES

Sobre os resultados dos testes realizados em relação ao torque e potência, dentre os combustíveis analisados com as proporções de B10, B20, B50, B10 + GNV, B20 + GNV e B50 + GNV, é possível concluir que o aumento da proporção de biodiesel no óleo diesel traz uma diminuição dos valores de torque e potência alcançados. Também é notório que com a aplicação do GNV em substituição parcial do diesel/biodiesel injetado houve uma diminuição dos valores gerados de torque e potência em relação a aplicação apenas com diesel/biodiesel. O combustível que trouxe o melhor resultado analisando o parâmetro de torque e potência foi o B10. Bem como foi o combustível que alcançou os maiores valores de torque e potência durante os ensaios e também apresentou melhor estabilização do motor na faixa de rotação ensaiada (1000 a 2200 rpm).

Ao que se refere ao consumo dos combustíveis, foram traçadas as curvas com as médias dos valores obtidos no tempo de medição de 180 segundos com o intervalo de medição a cada 20 segundos, dentro da faixa de rotação entre 1000 e 2200rpm a cada 200 rpm, com aplicação de carga de forma automática pelo dinamômetro. Após análise dos dados foi possível concluir que o combustível que apresentou a curva indicando menor consumo nesse intervalo de tempo foi o B50 e o que apresentou maior consumo foi o combustível B10 + GNV.

Como o sistema de controle permite a injeção do combustível GNV a partir de uma janela de tempo pré-programada, que para esse estudo foi de 4 microsegundos, o tempo de abertura dos bicos de injeção do GNV se torna constante, porém com o aumento da rotação se tem mais ciclos motor, fazendo com que seja injetado mais combustível de acordo com o aumento da rotação, isso implica em um provável enriquecimento na mistura de combustível/ar devido a injeção de combustível GNV em demasia, resultando em maior consumo de combustível e perda de eficiência na combustão.

Faz-se necessário uma regulação do tempo de injeção do GNV a partir das condições impostas ao motor. Condições essas que irão variar com a rotação, carga, temperatura de trabalho do motor, pressão no coletor de admissão, dentre outras variáveis. Tal regulação é definida com calibração.

Em relação ao consumo específico de combustível (CEC), o qual é um parâmetro de comparação muito usado para mostrar quão eficientemente um motor está transformando combustível em trabalho, a curva do combustível B10 apresentou o menor resultado médio, demonstrando que o combustível B10 permite alcançar maior torque e potência com um menor consumo de combustível.

É possível concluir sobre a quantidade de massa injetada de GNV necessária para substituir parcialmente a injeção de diesel/biodiesel, que com a utilização de combustível com menor proporção de biodiesel na mistura, por exemplo como o B10, necessita-se de uma maior quantidade de GNV para ser injetada, devido a quantidade de energia presente no combustível B10 ser maior que nas outras amostras.

Vale salientar que os dados levantados através da metodologia empregada nesse estudo servem de base para aprimoramento do tempo de injeção de GNV aplicado ao motor em análise, para cada mistura de combustível ensaiada, afim de conseguir melhor rendimento da combustão com proporções mais acertadas de combustíveis através de uma programação que possibilite o ajuste da injeção do GNV de forma automática. Para tanto, é necessário desenvolver uma espécie de “sonda lambda” para tal aplicação e, assim ter uma retroalimentação referente a queima das misturas de combustíveis.

Dessa forma possibilitaria o operador ou o próprio algoritmo ajustarem a injeção de GNV para aquela proporção de diesel/biodiesel utilizado bem como para a condição do motor naquele momento. Sendo possível ter um aprimoramento da mistura de combustível permitindo uma queima com maior eficiência na combustão, menor consumo e menor nível de emissões. Tal sistema é semelhante ao sistema de retroalimentação que se tem na tecnologia com os veículos flex.

Sobre as emissões de gases poluentes na exaustão do motor em estudo, analisando em toda faixa de rotação, conclui-se que: Em relação ao Monóxido de carbono (CO): B50 + GNV apresentou maior nível de emissão e B10 menor nível de emissão. Quanto ao Dióxido de carbono (CO₂): B10 apresentou maior nível de emissão e B20 + GNV menor nível de emissão. Analisando a concentração de Oxigênio (O₂): B10 + GNV apresentou maior nível de emissão e B20 + GNV menor nível de emissão. Tendo em vista os

Hidrocarbonetos (HC): B10 + GNV apresentou maior nível de emissão e B50 menor nível de emissão. Referindo-se aos Óxidos de nitrogênio (NO_x): B10 apresentou maior nível de emissão e maior pico e B50 + GNV menor nível de emissão.

Sobre a opacidade medida nos gases de exaustão e o coeficiente de absorção da luz (K), analisando em toda faixa de rotação, conclui-se que: A Opacidade (%): apresentou maior nível com utilização do combustível B50 + GNV, já com B10 houve menor nível de opacidade. O Coeficiente de absorção da luz (K): B50 + GNV apresentou maior nível e B10 apresentou menor nível. Tal fato se dá devido ao biodiesel aumentar o nível de material particulado e o excesso de GNV causar um enriquecimento na mistura havendo uma ineficiência na queima, gerando um aumento no material particulado.

7.2 SUGESTÕES

Como sugestão para os trabalhos futuro, seria relevante o desenvolvimento de uma programação capaz de modificar automaticamente o tempo de injeção de GNV de acordo com um sinal de retroalimentação que trouxesse uma resposta mais robusta do sistema ou, se caso não for possível, através da rotação do motor. Para tanto, se faz necessário um levantamento experimental da curva de tempo da injeção de GNV e desenvolver um equipamento capaz de captar o fator lambda da mistura.

Através do estudo realizado nesse trabalho é possível ter base para modificar o tempo de injeção do GNV e realizar experimentos para proporções maiores ou menores de GNV na mistura. Tendo como referência o consumo de GNV durante determinado período de tempo e analisando os resultados de potência, torque e emissões geradas, é possível se ter uma base em relação se a mistura está ficando rica ou pobre.

Com uma programação capaz de alterar o tempo de injeção de GNV de forma instantânea, durante a experimentação, é possível analisar instantaneamente os resultados que o dinamômetro indica de potência e torque, como também o equipamento de medição de emissões, e tornar possível a variação do tempo de injeção de GNV para ir analisando os resultados indicados pelos equipamentos e conseguir o levantamento da curva de tempo de injeção que traria melhor proporção de GNV para cada mistura de biodiesel/diesel buscando maior eficiência.

Também se faz importante um sistema de acoplamento que permita realizar os testes de forma mais ampla por toda faixa de rotação do motor. Com o sistema atual, que foi adaptado para conseguir realizar esse trabalho, não é possível realizar os testes em rotações mais elevadas (acima de 2200 rpm) e em rotações baixas (abaixo de 1000 rpm) devido ao nível de vibração e ruído que o sistema começa a apresentar ao se trabalhar nessas faixas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. V., AVELINO, M. **Análise Energética da Eficiência do Motor de Combustão Interna Utilizando como Combustível o Biogás.** VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM 2012. São Luiz - MA, 2012.
- ALMEIDA, S. C. A., NIRENBERG, H., BELCHIOR C. R. P. **Adaptações no Motor para Operar com Biogás.** VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM 2012. São Luiz - MA, 2012.
- AMAYA, ANDRÉS F. D.; TORRES, ADALBERTO G. D. & ACOSTA, DIEGO A.. **Control of emissions in an internal combustion engine: first approach for sustainable design.** International Journal Interact Des Manuf (DOI 10.1007/s12008-016-0307-6), 2016
- AVILA, P. L., PAMPLONA, E. O. **Aplicação do Modelo Binomial para Avaliação da Opção Troca de Insumos na Aquisição de Ônibus para Transporte Coletivo Urbano Movido por Combustíveis Alternativo.** XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP. Rio de Janeiro-RJ, 2008.
- BEM: **Balanco Energético Nacional.** Ministério das Minas e Energia, 2015.
- BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Automotiva.** São Paulo, SP; Edgar Blucher; 2005.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna volume I.** São paulo, SP, Edgard Blucher, 2013.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna volume II.** São paulo, SP, Edgard Blucher, 2013.
- ÇENGEL, Y.A., Boles, M. A. **Termodinâmica.** São Paulo, SP; McGraw-Hill, 2006.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2005) Relatório Anual de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo - 2004. São Paulo, SP.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 403, Nova Fase do programa de controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE Para Veiculo Pesados Novos,** 2008.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 415, Nova Fase do programa de controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE Para Veiculo Leves Novos,** 2009.

- CONPET. **Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural**. Disponível em <http://www.conpet.gov.br/>. Acesso em: 07/2016
- COSTA, Y. J. R. **Análise Energética e Exergética de um Motor de Combustão interna Operando com Mistura de Diesel e Gás Natural**. UFCG, Tese de doutorado. Campina Grande-PB, 2007.
- COSTA, Y. J. R., Grilo, M. B.; Lima, a. G. B., Filho, C. R. B., Lima, A. M. N. **Motor Dual Diesel e GNV: Testes Experimentais para Caracterização do Sistema**. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM. Recife-PE, 2006.
- COSTA, Y. J. S., COSTA, Y. J. R. **Análises de Emissões e Eficiência Energética em um Motor de Combustão Interna do Ciclo Diesel Operando com Biodiesel e Gás**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM 2012. São Luiz - MA, 2012.
- CTGÀS, SENAI. **Apostila de Treinamento Gás Natural Veicular / Técnicas de Instalação**. Rio Grande do Norte, RN; SENAI, 2007.
- FAVERI, F. L., FILHO, L. P. G., CITTADIN, A. RITTA, C. O. **A Viabilidade Econômico-financeira de Instalação de Kit GNV: Um Estudo de**. XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP. Salvador-BA, 2013.
- FERRAZ, F. B., JAGUARIBE, E. F., FERRAZ, F. B., BEZERRA, A. F., RUMÃO, A. S. **Conversão de um Motor Diesel OM 366 para Gás**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM 2012. São Luiz - MA, 2012.
- FERREIRA, V. P., TORRES, E. A., SILVA, J. P. **Avaliação do Desempenho de um Motor de Ignição por Compressão Operando com uma Mistura Diesel/Biodiesel(B-5) e Resíduo de Óleo**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM 2012. São Luiz - MA, 2012.
- FERREIRA, V. P., TORRES, E. A., SILVA, L. F., PEPE, I. M. **Análises Energética e Exergética de uma Bomba Centrífuga Acionada por um Motor Diesel Alimentado com diesel, Biodiesel e Misturas Binárias e Ternárias de Diesel, Biodiesel e Alcool Anidro**. CIBEM 10. Porto - Portugal, 2011.
- FERREIRA, V. P., TORRES, E. A., SILVA, L. F., PEPE, I. M. **Análises do Desempenho de um Grupo Gerador Alimentado com Diesel, Biodiesel e uma Mistura Ternária de Diesel, Biodiesel e Álcool**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM 2012. São Luiz - MA, 2012.

- FILHO, J. E. B., ARRUDA, J. B. F. **Metodologia de Análise de Demanda por Gás Natural Veicular com dados de Preferência declarada e Revelada**. V Encontro Brasileiro dos Profissionais do Mercado do Gás. São Paulo-SP, 2004.
- GARCIA, Roberto. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Engenho Novo, RJ; Interciência; 2002.
- GUIMARÃES, A. A. **Eletrônica Embarcada Automotiva**. São Paulo, SP; Érica, 2007.
- HOLANDA, Ariosto. **Biodiesel e Inclusão Social**. Brasília; Camara dos Deputados, 2006.
- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores**, 2004.
- JUNIOR, A. G. M., Fagá, M. T. W. **Substituição de Motores Elétricos por Motores de Combustão Interna de Ciclo Otto a Gás Natural em Instalações de Bombeamento de Petróleo e Seus Derivados**. Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Salvador-BA, 2005.
- KNOTE, Gerhard; Gerpen J. V., Krah J., Ramos L. P. **Manual de Biodiesel**. São Paulo, SP; Edgard Blucher, 2006.
- LOPES, Gustavo Santos & FERREIRA, Janito Vaqueiro. **Análise Termodinâmica, Cinemática e Dinâmica de um Motor com Taxa de Compressão Variável**. XXII Simpósio de Internacional de Engenharia Automobilística – SIMEA 2014. Blucher Engineering Proceedings, Agosto de 2014, Nº 2, Vol.1.
- MANAVELLA, H. J. **Diagnóstico Automotivo Avançado**. São Paulo, SP; Printed in Brazil, 2009.
- MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. Porto, Portugal; Publindústria; 2013.
- MCCARTHY, P., RASUL, M.G., & MOAZZEM S.. **Analysis and comparison of performance and emissions of an internal combustion engine fuelled with petroleum diesel and different bio-diesels**. Journal ELSEVIER FUEL 90, 2011, p. 2147–2157.
- MORAN, M. J., Shapiro, H. N. **Principios de Termodinâmica para Engenharia**. Rio de Janeiro, RJ; LTC, 2002.
- MWM, Motores. **Apostila de Treinamento Motores Serie Sprint Electronic**. São Paulo, SP; MWM, 2006.

- PAMPLONA, E. O., AVILA, P. L., RICCI, M. T. R. **Avaliação Econômica e de Risco do Uso (Gás Natural Veicular) em Frotas de ônibus Urbano.** XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP. Fortaleza-CE, 2006.
- PEREIRA, R. H. M., BRAGA, S. L., BRAGA C. V. M. **Substituição Parcial do Óleo Diesel pelo Gás Natural em Motores.** V Encontro Brasileiro dos Profissionais do Mercado do Gás. São Paulo-SP, 2004.
- SANTOS, Lessor Benedito dos . **Análise e desenvolvimento de técnica e controle eletrônico na utilização conjunta de biodiesel - gnv em motores do ciclo diesel.** Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica/UFPB, Tese de doutorado. João Pessoa, 2015.
- SILVA, Edson. **Injeção Eletrônica de Motores Diesel.** São Paulo, SP; Ensino Profissional, 2006.
- VILLANUEVA, L. Z. D. **Uso de Gás Natural em Veículos Leves e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Contexto Brasileiro.** PIPGE/USP, Tese de doutorado. São Paulo-SP, 2002.

APÊNDICE I-

Tabela AI - Dados técnicos do motor MWM 4.07 TCE

Aspiração	Turboalimentado Pós-Arrefecido
Tipo de Construção	4 tempos - Injeção Eletrônica Direta
Camisas	Secas e substituíveis
Cabeçote	Único, fluxo cruzado, c/ 2 dutos p/ admissão: espiral e tangencial
Quantidade de Cilindros	4 em linha
Válvulas de admissão / cil.	2
Válvulas de escape / cil.	1
Quantidade de válvulas	12
Diâmetro X Curso	93 X 103 mm
Cilindrada Unitária	0,700 litros
Cilindrada Total	2,8 litros
Primeiro Cilindro	Lado do Volante
Ordem de Ignição	1-3-4-2
Sentido de Rotação	Anti-Horário (Visto do Volante)
Peso Seco	198 kg
Taxa de Compressão	17,2 : 1
Pressão de Compressão	Valor Mínimo (medido na rotação mínima de 200 rpm e temperatura de funcionamento)
• motor novo	28 bar
• motor usado	23 bar
Folga de Válvulas	0,2 mm $\pm$ 0,1
Sistema de Lubrificação	
Pressão de óleo (quente)	
• Marcha-lenta	0,7 bar
• Rotação Máxima	4,9 ba
Temperatura Normal do Óleo no Cáter	106 a 115 °C

Temperatura Máx. do Óleo no Cárter	125 °C
Volume de óleo	
• Máxima	8 litros (sem filtro)
• Rotação Máxima	5 litros (sem filtro)
Volume do Filtro	1,0 litro
Consumo Máx. de Óleo	0,3% do consumo de Diesel
Sistema de Arrefecimento	
Volume de água (s/ radiador)	4,25 litros
Temperatura da água	
• Nominal	80 - 85 °C
• Máxima	110 °C
Válvulas termostáticas	
• Início de abertura	79 °C ± 2
• Abertura total	94 °C ± 2
• Curso mínimo	8 mm
Diferença de temperatura entre entrada e saída do motor	7 °C
Proporção do aditivo	50% ± 10%
Sistema de Combustível	
Restrição máxima de entrada de combustível (para bomba de engrenagens)	0,6 a 1,2 bar
Pressão da galeria (Rail)	350 a 1400 bar
Faixa de pressão de combustível na saída do filtro de combustível (na rotação de partida)	9,7 a 12,8 bar
Faixa de pressão de combustível na entrada do filtro de combustível (na rotação de funcionamento)	10,5 a 13 bar
Queda máxima de pressão no filtro de combustível	≤0,8 bar