



ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE BIODIESEL DE CANA-DE-AÇÚCAR (2ª GERAÇÃO) EM MOTORES DIESEL

Marcelo Bernardini Martinez

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

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

Rio de Janeiro

Março de 2014

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE BIODIESEL DE CANA-DE-AÇÚCAR (2ª GERAÇÃO)
EM MOTORES DIESEL

Marcelo Bernardini Martinez

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

Examinado por:

Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior, D.Sc

Prof. Silvio Carlos Anibal de Almeida, D.Sc

Prof. Manuel Ernani de Carvalho Cruz, PhD

Prof. Thiago Gamboa Ritto, DSc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2014

Martinez, Marcelo Bernardini

Estudo da Utilização de Biodiesel de Cana-de-Açúcar (2ª Geração) em Motores Diesel / Marcelo Bernardini Martinez. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

VIII, 55 p.: il.; 29,7 cm.

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

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 46-47.

1. Motor Diesel. 2. Biocombustíveis. 3. Biodiesel. 4. Cana-de-açúcar. 5. Análise de Performance. 6. Análise de Emissões. I. Belchior, Carlos Rodrigues Pereira. De Almeida, Silvio Carlos Anibal II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Estudo da utilização de biodiesel de cana-de-açúcar (2ª geração) em motores diesel.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos Professores Manuel Ernani e Vitor Romano por terem sido os primeiros a me dar oportunidades de trabalho em Engenharia.

Agradeço ao meu orientador Carlos Rodrigues Pereira Belchior pela escolha desse tema relevante, pelas trocas de idéias na orientação e pela confiança depositada em mim.

Agradecimentos ao engenheiro Gilberto pelo apoio e ajuda no preparo do motor, infraestrutura e operação dos ensaios, além da logística dos preparativos dos experimentos.

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

Agradeço a Technip Engenharia por ter me proporcionado a flexibilidade de horário necessária para a elaboração e defesa do meu projeto.

Agradecimentos aos meus amigos, à minha namorada, aos meus pais e outros tantos que se não tiveram influência direta no trabalho, mas que me apoiaram e ajudaram a superar todos os obstáculos no decorrer do curso de Engenharia Mecânica.

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

Estudo da utilização de biodiesel de cana-de-açúcar (2ª geração) em motores diesel

Marcelo Bernardini Martinez

Março/2014

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

Curso: Engenharia Mecânica

Este trabalho propõe a avaliação operacional da utilização do biodiesel de melaço e vinhaça de cana-de-açúcar como combustível em motores diesel. No Brasil, a utilização da mistura entre biodiesel e diesel mineral em motores é permitida para veículos terrestres.

Entretanto, a principal fonte de biodiesel ainda é a soja o que gera conflitos de interesses já que a soja também é um alimento. Buscando contornar esse problema sempre se procurou diferentes fontes de óleo para substituir o uso de fontes de óleo que também servem como alimento. É inegável a importância dos motores ciclo diesel na matriz energética do Brasil, e do biodiesel como alternativa à substituição parcial do óleo diesel. Porém, ensaios em motores de combustão interna são necessários para validação do uso de misturas de biodiesel ao diesel de origem mineral.

Palavras-chave: Motor diesel, Cana-de-açúcar, Biocombustível, Biodiesel, Análise de Performance, Análise de Emissões.

ÍNDICE

Lista de Figuras	vii
Nomenclatura.....	viii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Biocombustíveis - O biodiesel.....	1
1.2. Motivação	1
1.3. Objetivo	3
Capítulo 2 - Revisão da Literatura.....	4
2.1. Biodiesel em Motores Diesel.....	4
2.2. Biodiesel de Melão e Vinhaça de Cana-de-Açúcar	5
Capítulo 3 - Aparato Experimental.....	10
3.1. Motor Utilizado	10
3.2. Instrumentação da Bancada de Testes e Variáveis Medidas	10
3.3. Dinamômetro e Sensores de Temperatura.....	13
3.4. Medição da Massa de Combustível Utilizada por Ciclo	14
3.5. Medição dos Gases de Descarga	15
3.6. Cálculo das Incertezas	17
Capítulo 4 - Metodologia dos Testes.....	18
4.1. Combustíveis Utilizados.....	18
4.1.1. Óleo Diesel Comercial.....	18
4.1.2. Biodiesel de 2ª Geração de Cana-De-Açúcar	18
4.1.3. Misturas do B5 ao B100	19
4.2. Procedimento de Ensaio	20
Capítulo 5 - Resultados e Discussões.....	21
5.1. Aspectos Gerais	21

5.2. Ensaio para Definição de Curvas de Performance.....	21
5.3. Ensaio com o B5	24
5.4. Ensaio com o B20	25
5.5. Comparações entre os Resultados Encontrados para a Potência, Rotação e Torque	26
5.6. Comparações entre os Resultados Encontrados para a Temperatura de Exaustão e Temperatura da Água	28
5.7. Comparações entre os Resultados Encontrados para o Consumo e Consumo Específico de Combustível	31
5.8. Comparações entre os Resultados Encontrados para os Gases de Descarga.....	33
5.8.1. Emissões de CO ₂	33
5.8.2. Emissões de CO.....	35
5.8.3. Emissões de O ₂	37
5.8.4. Emissões de NO _x	39
5.8.5. Emissões de HC.....	41
Capítulo 6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	45
Capítulo 7 - Referências Bibliográficas	46
Apêndice A - Principais Variáveis Medidas no Trabalho	48
Apêndice B - Tabelas dos Testes de Emissões Antes do Trato de Dados	50
Apêndice C - Tabelas dos Resultados da Referência Após o Tratamento de Dados	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Rota Convencional de Obtenção de Biodiesel	6
Figura 2-2 – Equação Química do Processo de Transesterificação.....	7
Figura 2-3 – Equação Simplificada do Processo de Transesterificação	7
Figura 2-4 – Rota Convencional de Produção de Etanol.....	8
Figura 3-1 - Esquema simplificado das medições no experimento	11
Figura 3-2 - Aparato Físico	12
Figura 3-3 - Foto da Localização dos Sensores de Temperatura.....	13
Figura 3-4 - Foto da tela do sistema de aquisição de dados DinMon.....	14
Figura 3-5 - Foto da Balança de Precisão.....	15
Figura 3-6 - Foto do Medidor de Gases de Descarga.....	16
Figura 3-7 - Foto da Tela do Sistema de Aquisição de Dados MMV2000	16
Figura 4-1 - Características Físico-Químicas do Combustível.....	19
Figura 5-1- Torque x RPM funcionando com B5 e B20 nos testes de Desempenho	23
Figura 5-2 - Potência x RPM funcionando com B5 e B20 nos testes de Desempenho.....	23
Figura 5-3- Potência x RPM funcionando com B5 e B20.....	27
Figura 5-4- Torque x RPM funcionando com B5 e B20.....	27
Figura 5-5- Torque x Potência funcionando com B5 e B20.....	28
Figura 5-6 – Gráfico Comparativo T. Exaustão x Potência	29
Figura 5-7 – Gráfico de Colunas de T. Exaustão	29
Figura 5-8 – Gráfico Comparativo T. Água x Potência	30
Figura 5-9 – Gráfico de Colunas de T. Exaustão	31
Figura 5-10 – Gráfico Comparativo Consumo x Potência	32
Figura 5-11 – Gráfico Comparativo Consumo Específico x Potência	33
Figura 5-12 – Gráfico Comparativo CO ₂ x Potência.....	34
Figura 5-13 – Gráfico de Colunas Comparativo CO ₂ x Potência.....	35
Figura 5-14 – Gráfico Comparativo CO x Potência.....	36
Figura 5-15 – Gráfico de Colunas Comparativo CO x Potência	37
Figura 5-16 – Gráfico Comparativo O ₂ x Potência	38
Figura 5-17 – Gráfico de Colunas Comparativo O ₂ x Potência	39
Figura 5-18 – Gráfico Comparativo NO _x x Potência	40

Figura 5-19 – Gráfico de Colunas Comparativo NO _x x Potência.....	41
Figura 5-20 – Gráfico Comparativo HC x Potência.....	42
Figura 5-21 – Gráfico de Colunas Comparativo CO ₂ x Potência.....	43
Figura 5-22 - Variação dos moles dos produtos da combustão com a relação combustível-ar	44

Nomenclatura

CEC	Consumo Específico de Combustível. [g / kWh]
PCI	Poder Calorífico Inferior. [kJ/kg]
PCI_v	Poder Calorífico Inferior em base volumétrica. [GJ/m ³]
PCS	Poder Calorífico Superior. [kJ/kg]
P_e	Potência no eixo do motor. [kW]
P_{atm}	Pressão atmosférica. [bar]
Rot	Rotação do motor. [rpm]
T_{atm}	Temperatura do ar atmosférico. [°C]
T_{adm}	Temperatura de admissão. [°C]
T_e	Temperatura dos gases de exaustão. [°C]
$Torque$	Torque do motor. [Nm]
V_c	Vazão mássica de combustível. [kg/s]
ρ	Massa específica. [kg/m ³]

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Biocombustíveis - O biodiesel

A maior parte da energia consumida no mundo é obtida a partir da queima de carvão e de derivados de petróleo, como a gasolina, o querosene e o óleo diesel, este último amplamente utilizado para movimentar ônibus, caminhões e embarcações. Considerando-se que há previsões de escassez das reservas petrolíferas, os altos preços do barril de petróleo no mercado internacional e a necessidade de redução da emissão de gases de efeito estufa e poluentes, torna-se imprescindível a diversificação da matriz energética brasileira e a utilização em maior quantidade de combustíveis que não sejam de origem fóssil, como os biocombustíveis. Conforme Lei n.º. 9478/97, biocombustível é o combustível derivado de biomassa renovável, para uso em motores a combustão interna ou conforme regulamento, para outro tipo de geração de energia, que possa substituir, parcial ou totalmente, combustíveis de origem fóssil.

Atualmente, um dos biocombustíveis mais pesquisados é o biodiesel. Segundo a ANP [1] (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), o biodiesel é um combustível composto de mono-ésteres alquílicos de ácidos graxos de cadeia longa derivados de óleos vegetais ou gorduras animais. Ele é produzido através da reação de um óleo vegetal ou gordura animal com um álcool (etanol ou metanol) na presença de um catalisador. Tal reação gera glicerina além do biodiesel. Dessa forma, o biodiesel é um combustível renovável derivado de óleos vegetais, como girassol, mamona, soja, dendê e demais oleaginosas ou de gorduras animais. É biodegradável, e substitui total ou parcialmente o óleo diesel nos motores de ciclo diesel, com a vantagem de não requererem adaptações mecânicas dependendo da proporção de biodiesel misturado ao óleo diesel.

1.2. Motivação

O estudo de possíveis combustíveis alternativos derivados de biomassa não é um novo tópico em nosso país. Podendo ser observado que no Brasil há algumas décadas foram feitos esforços e leis foram criadas para incentivar a mistura de biodiesel no óleo diesel da frota de veículos terrestres, e álcool do bagaço da cana na gasolina. O

biodiesel foi introduzido na matriz energética brasileira com a publicação da lei 11.097/2005. A partir da publicação dessa lei, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) foi elaborado através de uma parceria entre um grupo de trabalho interministerial, encarregado de apresentar estudos sobre a viabilidade de utilização de óleo vegetal para produção de biodiesel. Os estudos de viabilidade foram coordenados pelo Ministério de Ciência e Tecnologia, e em janeiro de 2008 iniciou-se a obrigatoriedade da adição de 2% de biodiesel ao óleo diesel. Essa proporção foi aumentada em janeiro de 2010 para 5% de biodiesel, fazendo que os veículos abastecidos em território brasileiro utilizem um combustível com 95% de óleo diesel e 5% de biodiesel. Entretanto, a maior fonte de produção de biodiesel no Brasil é a soja que também é fonte de alimento. Essa dupla função da soja gera muitas discussões acerca do uso desta para a produção de combustível. Somando-se a esse fato a demanda cada vez maior por combustíveis renováveis, a busca por novas fontes de óleo para a produção de biodiesel é cada vez maior.

Além disso, algumas características conferem ao biodiesel importância técnica, ambiental e econômica, são elas [1]:

- O biodiesel é energia renovável. As terras cultiváveis podem produzir uma enorme variedade de oleaginosas como fonte de matéria-prima para o biodiesel. Segundo ANP um dos princípios do marco regulatório para produção de biodiesel é o aproveitamento das oleaginosas de acordo com as diversidades regionais, fortalecendo as potencialidades de cada região para produção da matéria-prima. Gera estímulo ao crescimento da economia em áreas rurais.
- É constituído por carbono neutro, ou seja, o combustível tem origem renovável ao invés da fóssil. Desta forma, sua obtenção e queima contribuem menos para o aumento das emissões de CO₂ na atmosfera.
- Apresenta excelente lubricidade, fato que vem ganhando importância com a utilização do diesel de baixo teor de enxofre, cuja lubricidade é parcialmente perdida durante o processo de produção.
- Possui um alto ponto de fulgor, conferindo ao biodiesel manuseio e armazenamento mais seguros.
- Nenhuma modificação nos atuais motores do tipo ciclo diesel faz-se necessária para misturas de biodiesel com diesel de até 20% (B20), sendo

que percentuais acima de 20% requerem avaliações mais elaboradas do desempenho do motor.

- É importante para a balança comercial já que cofere segurança energética ao país. Ou seja, diminui a dependência do diesel externo.

1.3. Objetivo

É inegável a importância dos motores ciclo diesel na matriz energética brasileira, e do biodiesel como alternativa à substituição parcial do óleo diesel. Contudo, ensaios em motores de combustão interna são necessários para validação do uso de misturas de biodiesel ao diesel de origem mineral. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é pesquisar e estudar a viabilidade operacional da utilização de biodiesel de melão e vinhaça de cana-de-açúcar em motores diesel.

Capítulo 2 - Revisão da Literatura

2.1. Biodiesel em Motores Diesel

Os principais produtores e consumidores do biodiesel são a Alemanha, França e Itália, possuindo subsídios para incentivar as plantações de matérias-primas oleaginosas em áreas não exploradas, mais isenção de 90% de impostos. Já no Brasil, de acordo com o Ministério das Minas e Energia, cerca de 800 milhões de litros de biodiesel devem ser produzidos por ano, o que contribuiria para reduzir as importações de diesel de petróleo, estimados em 4 bilhões de litros. Portanto, a produção de biodiesel atinge positivamente a balança comercial brasileira, visto que cerca de 20% do óleo diesel consumido no país é importado.

Segundo Grando et al. [2], a crescente demanda por combustíveis renováveis como alternativa aos combustíveis fósseis e a maior preocupação internacional com o aquecimento global, amplificada com a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto em 2005, evidencia os benefícios dos biocombustíveis. O biodiesel contribuirá para melhorar as condições ambientais a partir da redução da emissão de gases poluentes e particulados.

A utilização de óleos vegetais em motores já ocorre há alguns anos no Brasil, em Curitiba testes com Biodiesel foram realizados no sistema de transporte coletivo da cidade na proporção de 20% de biodiesel para 80% de óleo diesel, e o ônibus circulou em condições normais de trabalho, apresentando desempenho semelhante ao do uso do diesel convencional (Zagonel et al. [4]). Grotta [3] testou a mistura de óleo vegetal em um motor ciclo diesel de um trator agrícola, e observou que o uso de biodiesel até a proporção de 50% de mistura não alterou substancialmente o consumo específico, porém, quando o motor funcionou com 100% de biodiesel o consumo aumentou em 11%, devido ao menor poder calorífico do biodiesel.

O estudo do uso de diferentes tipos de combustíveis alternativos, produzidos pela mistura de óleos vegetais com óleo diesel B2 (2% de biodiesel e 98% de óleo diesel), em um motor diesel, foi realizado por Ali et al. [5] em bancada dinamométrica. Os testes mostraram que o desempenho do motor foi similar ao obtido com o óleo diesel indicando que não haveria efeito no desempenho do motor após 200 horas do funcionamento do dinamômetro. Para confirmar isso, Ali & Hanna [6] estudaram o

efeito à longo prazo de uma mistura de óleo diesel e biodiesel (B20) em relação ao desempenho e desgaste de um motor diesel. Constataram que o motor operou satisfatoriamente por 148 horas, e a potência, o torque e o consumo específico mantiveram-se constantes. A análise do óleo do motor a intervalos de 45 horas mostrou que a redução na necessidade após 100 horas de operação foi típica de uma operação normal com diesel. O desgaste do motor, avaliado com base na concentração de metais no óleo lubrificante, permaneceu dentro do limite normal recomendado para aquele tipo de motor.

Barbosa et al. [7] avaliando o desempenho de um motor alimentado com óleo diesel e misturas deste com biodiesel nas proporções equivalentes a B2 (98% de óleo diesel e 2% de biodiesel), B5(95% de óleo diesel e 5% de biodiesel), B20 (80% de óleo diesel e 20% de biodiesel) e B100 (100% de biodiesel), concluíram que a potência do motor com o uso de biodiesel em 100% ou, em misturas com diesel, foi pouco inferior à potência apresentada com o óleo diesel comercial.

A condução de trabalhos nessa linha de pesquisa auxiliará a identificar e solucionar problemas que possam vir a ocorrer em decorrência da utilização, breve ou prolongada, de maiores porcentagens de biodiesel misturado ao óleo diesel.

2.2. Biodiesel de Melaço e Vinhaça de Cana-de-Açúcar

O biodiesel utilizado neste estudo foi o fornecido pela empresa Ouro Fino Participacoes e Empreendimentos S/A. O processo de obtenção deste se inicia com a extração de leveduras alimentadas com melaço e vinhaça de cana-de-açúcar. De posse do óleo se segue a rota convencional de transesterificação [8] para se produzir o biodiesel como representado na Figura 2-1.

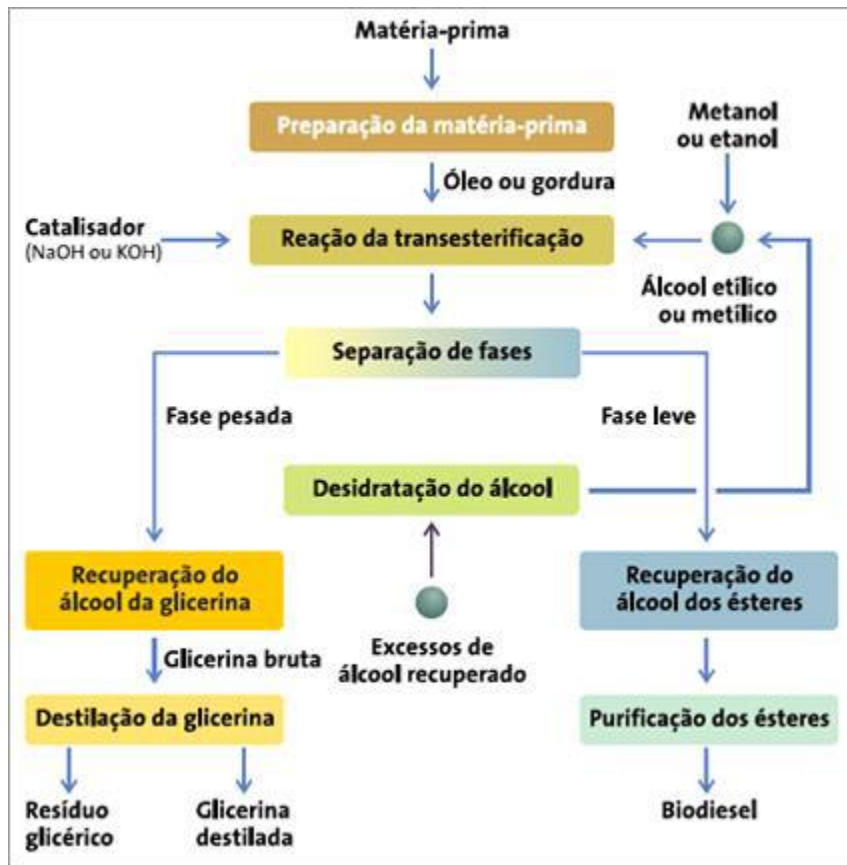


Figura 2-1 - Rota Convencional de Obtenção de Biodiesel

Há pouca literatura relacionada a produção de biodiesel a partir desta matéria-prima e menos ainda ensaios de emissões e eficiência deste em motores diesel, porém muito se produziu na literatura a respeito do uso de biocombustíveis de segunda geração e da importância destes atualmente.

A rota convencional de transesterificação, citada a cima, também chamada de alcoólise (ou até metanólise caso utilizado o metanol) é reação química entre um éster e um álcool da qual resulta um novo éster e um álcool, mostrada na Figura 2-2. Este processo tem sido largamente usado para reduzir a viscosidade elevada de triglicéridos como afirma Lobo et al [9]. A reação de transesterificação é representada também de forma simplificada na Figura 2-3 [10].

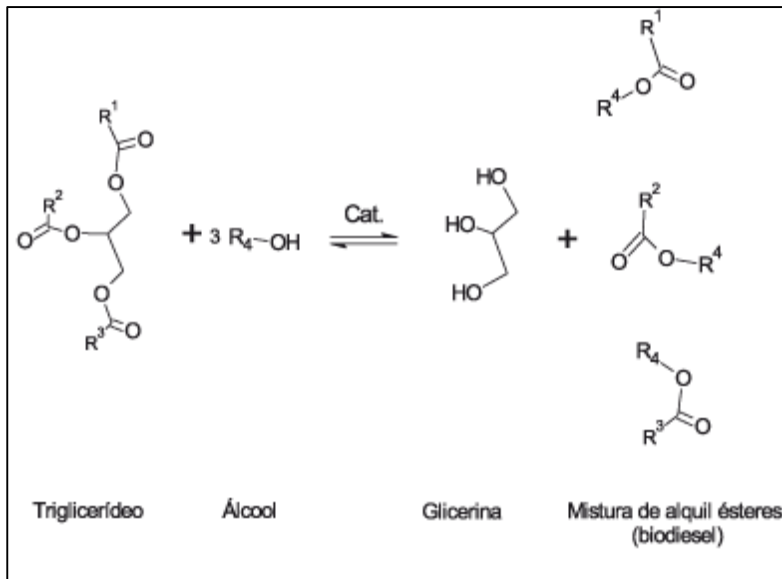


Figura 2-2 – Equação Química do Processo de Transesterificação

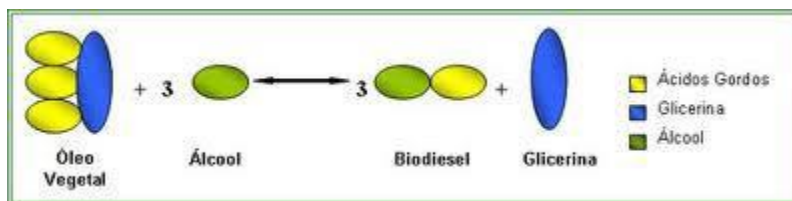


Figura 2-3 – Equação Simplificada do Processo de Transesterificação

A cana-de-açúcar, matéria prima do biodiesel em estudo, é largamente explorada no país devido a forte política nacional de incentivo a produção de bioetanol. A produção do bioetanol baseia-se na fermentação do mosto obtido a partir do caldo e do melão da cana-de-açúcar por leveduras como apresentado por Paulillo et al [11]. Rendimentos industriais acima de 90% têm sido obtidos por várias destilarias brasileiras, o que em parte justifica o sucesso da produção e utilização do bioetanol no país. Este processo gera enormes quantidades de bagaço e a vinhaça. Os valores estimados destes resíduos produzidos no Brasil, só em 2011/12, são de 154 milhões de toneladas de bagaço (50% umidade) e 300 bilhões de litros de vinhaça. O bagaço é utilizado principalmente para produção de energia e eletricidade através da queima em caldeiras. Quanto à vinhaça, seu uso principal tem sido a ferti-irrigação das áreas cultivadas com cana-de-açúcar. De qualquer forma, o transporte de grandes volumes de vinhaça representa um custo elevado para a indústria. Tecnologias para reduzir o

volume de vinhaça têm sido desenvolvidas, como é o caso das fermentações com alto teor alcoólico.

A transformação da vinhaça em produtos de alto valor agregado representa um desafio científico e tecnológico para o setor sucroalcooleiro. Para vencer estes desafios é necessário identificar oportunidades para a indústria reduzir seus custos de produção com menor impacto na natureza. Além disso, estas soluções devem ainda ser de fácil aplicabilidade para o setor sucroalcooleiro. Dentre as oportunidades vislumbradas estão a produção de biodiesel a partir da vinhaça. O excesso de vinhaça associado ao melaço, produzido também a partir do caldo (Figura 2-4), pode ser usado para produzir lipídeos e posterior produção de biodiesel, reduzindo o consumo de óleo diesel como demonstrado pelo BNDES [12]. Isso é possível através da elaboração de um processo de biorefinaria integrada à produção do etanol. Para isso, é necessário selecionar leveduras que sejam capazes de crescer em um ou em ambos os substratos.

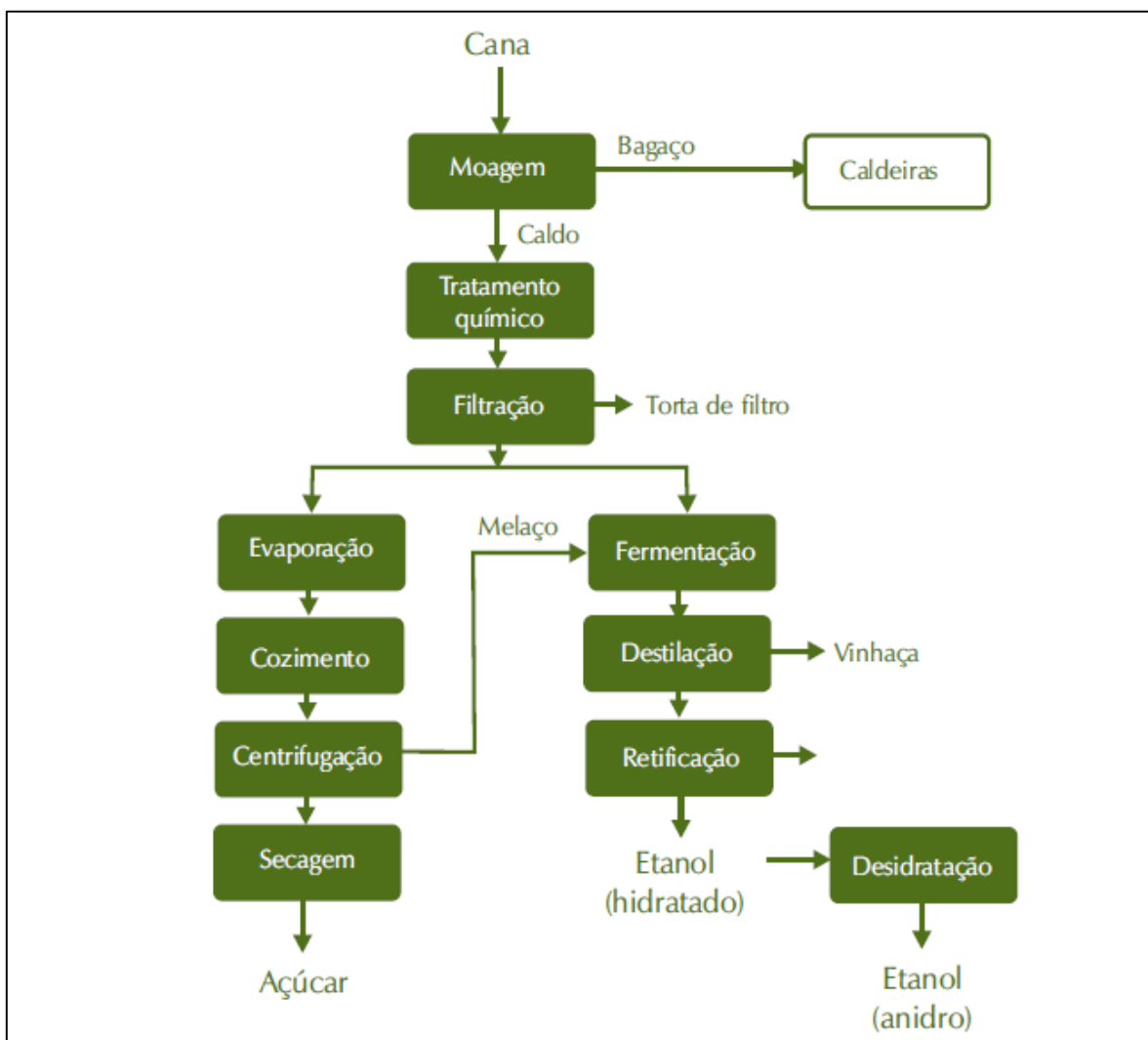


Figura 2-4 – Rota Convencional de Produção de Etanol

Os lipídeos produzidos serão extraídos das células e usados na produção de biodiesel. A produção do biodiesel é realizada através de da rota convencional de transesterificação.

Desta forma, a vinhaça passa a ter um destino a mais por ser tratado como uma matéria-prima geradora de riqueza adicional, já que a sua utilização não implica a redução da produção de etanol.

Capítulo 3 - Aparato Experimental

3.1. Motor Utilizado

Conforme mencionado anteriormente, para a obtenção dos valores experimentais foi utilizado um motor monocilíndrico de injeção direta. A Tabela 3-1 mostra as informações mais relevantes do motor utilizado nos experimentos:

Tabela 3-1– Principais informações do motor utilizado

Tipo de Motor	04 tempos – Diesel
Marca/Modelo	AGRALE/M95W
Número de Cilindros e Tipo	01 cilindro – vertical
Tipo de Injeção	Direta
Diâmetro do Cilindro	95 mm
Curso do Pistão	105 mm
Comprimento da Biela	170 mm
Diâmetro da Válvula de Admissão	42 mm
Curso da Válvula de Admissão	10,5 mm
Cilindrada	744 cm ³
Relação Biela/Manivela	3,24
Razão de Compressão	21:1
Ângulo de Injeção	- 17° (17° antes do PMS)
Ângulo de Fechamento da Válvula de Admissão	- 150° (150° antes do PMS)
Ângulo de Abertura da Válvula de Descarga	160° (160° depois do PMS)

3.2. Instrumentação da Bancada de Testes e Variáveis Medidas

Todos os instrumentos de medição que serão apresentados nesta seção, bem como seus modelos, faixa de medição e incertezas de medição associadas, estão descritos no Apêndice A.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra, resumidamente, o esquema do aparato experimental. Basicamente, a aquisição de dados foi realizada por dois grandes grupos de equipamentos de medição. São eles:

- o sistema de medição relacionado ao torque, potência e rotação e ao controle de temperaturas (em várias partes do motor);
- o sistema de medição da percentagem dos gases de descarga.

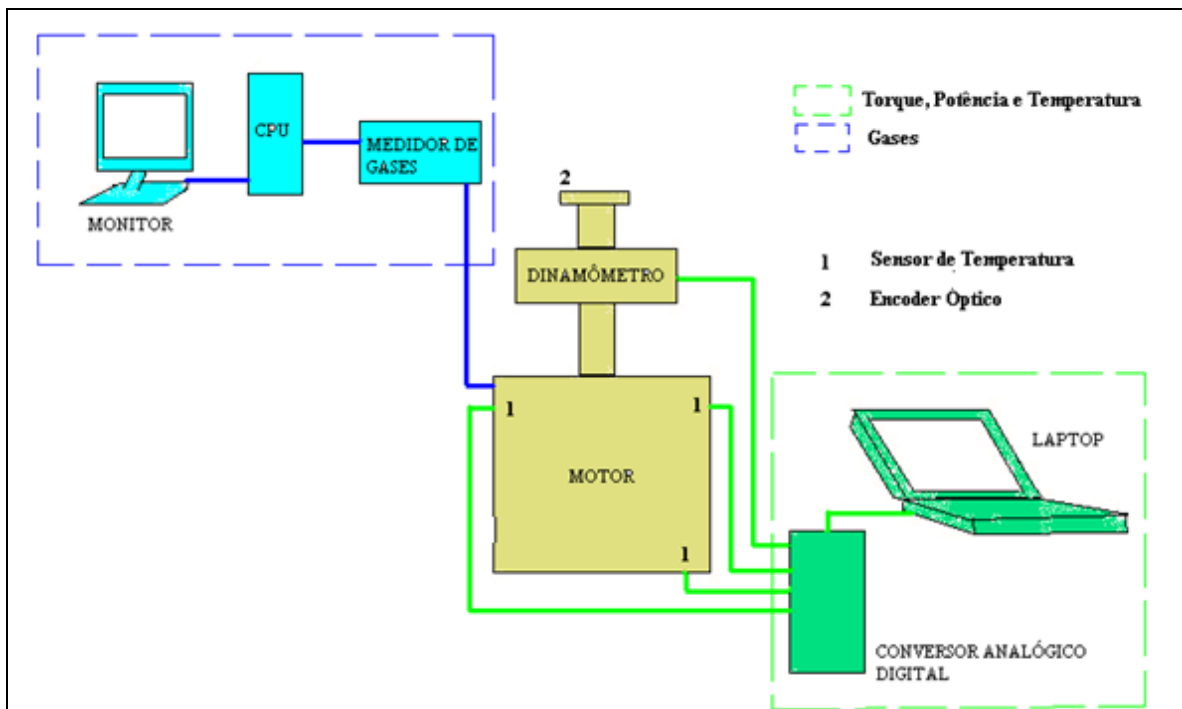


Figura 3-1 - Esquema simplificado das medições no experimento

Fisicamente o aparato utilizado foi disposto como mostrado na Figura 3-2.

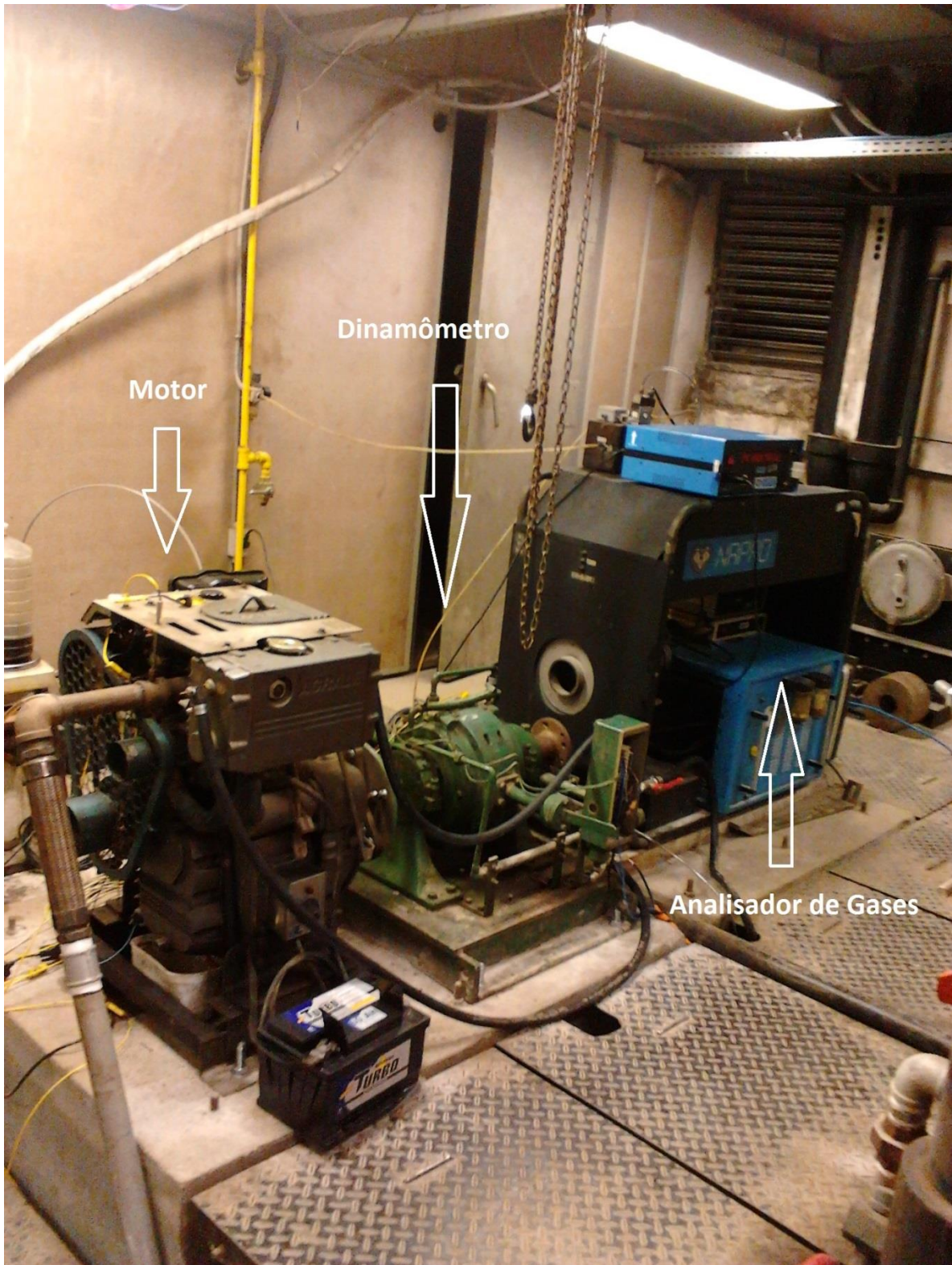


Figura 3-2 - Aparato Físico

3.3. Dinamômetro e Sensores de Temperatura

O dinamômetro utilizado é da marca DINAMATIC, do tipo corrente parasita (ou de absorção), onde o usuário pode simular o torque desejado através do sistema de aquisição de dados utilizado (DinMon).

O software do sistema DinMon possui dois canais de saída analógica, um para controle da rotação e outro para controle do torque. Ainda possui oito canais de temperatura compatíveis com termopar tipo K. Através deste sistema foram medidas: rotação, torque, potência e temperaturas (água de resfriamento do motor, ar de admissão e gases de descarga).

A Figura 3-3 e Figura 3-4 mostram os sensores de temperatura instalados no motor e a tela do sistema de aquisição de dados DinMon:

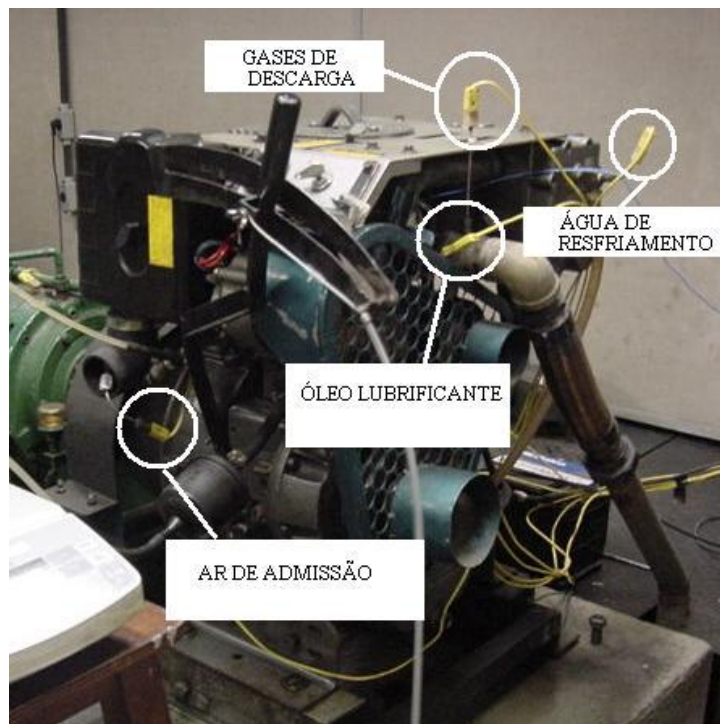


Figura 3-3 - Foto da Localização dos Sensores de Temperatura



Figura 3-4 - Foto da tela do sistema de aquisição de dados DinMon

3.4. Medição da Massa de Combustível Utilizada por Ciclo

A massa de combustível utilizada em cada ciclo é obtida através do consumo do motor, em gramas por segundo (g/s). O reservatório de combustível é colocado sobre uma balança de precisão (Figura 3-5) e a cada minuto é anotada a leitura da balança, até que se completem três minutos, obtendo-se assim, por diferença entre as anotações, a vazão de combustível (\dot{m}_{comb}) em g/s.

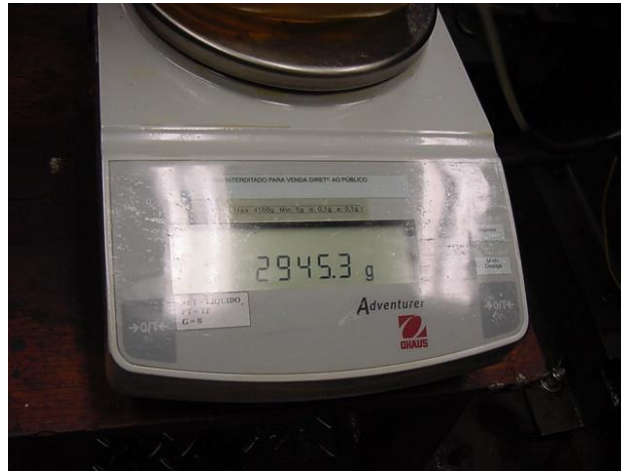


Figura 3-5 - Foto da Balança de Precisão

Considerando-se que o ciclo do motor é realizado a cada duas rotações completas do eixo de manivelas, chega-se a expressão da massa de combustível (em kg) utilizada em cada ciclo:

$$m_{comb} = \frac{m_{comb} \cdot 0.001 \cdot 60 \cdot 2}{Rot} \quad (3.1)$$

3.5. Medição dos Gases de Descarga

Os gases provenientes da descarga do motor são analisados no medidor de gases, marca NAPRO (Figura 3-6), o qual utiliza sistema de medição na “base seca”, ou seja, ocorre a condensação da água para medição dos demais produtos da combustão. O medidor é capaz de medir os seguintes gases: O₂, CO₂, CO, NO_x e HC (hidrocarbonetos não queimados), sendo estes dois últimos medidos em partes por milhão (ppm), e os demais em percentagens do total (sem a água).

3.6. Cálculo das Incertezas

Para o cálculo das incertezas de medição dos vários equipamentos, consideraram-se as principais fontes de incertezas. Segundo KLINE & MCCLINTOCK et. al [13], a incerteza total (I_{yT}) associada da variável y a ser medida é dada por:

$$I_{yT} = \sqrt{I_{yL}^2 + I_{yR}^2 + \sigma_y^2} \quad (5.1)$$

onde:

I_{yL} : incerteza associada ao erro de leitura

I_{yR} : incerteza associada à resolução de leitura das medições

σ_y : desvio padrão das leituras realizadas

O desvio padrão é dado pela seguinte expressão:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad (5.6)$$

onde n é a quantidade de vezes em que a variável foi medida e \bar{y} é a média aritmética.

Capítulo 4 - Metodologia dos Testes

4.1. Combustíveis Utilizados

Os testes foram realizados com combustíveis que foram fabricados a partir de duas matrizes: B5 óleo diesel comercial, e o B100 biodiesel de 2ª geração de cana-de-açúcar. A partir da mistura destes foi obtido o B20 utilizado nos ensaios. A proporção utilizada na mistura segue no seção 4.1.3.

4.1.1. Óleo Diesel Comercial

O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo, constituído basicamente por hidrocarbonetos, apresentando também enxofre, nitrogênio e oxigênio em pequeníssimas proporções.

O diesel utilizado neste teste foi um diesel comercial de um posto de gasolina qualificado pelo ANP. Vale a ressalva de que, com mencionado acima, o diesel comercial no país já contém 5% de biodiesel (B5).

4.1.2. Biodiesel de 2ª Geração de Cana-De-Açúcar

O biodiesel fornecido pela Empresa Ouro Fino Participações e Empreendimentos S/A foi produzido a partir de óleo extraído de leveduras alimentadas por vinhaça e melão de cana-de-açúcar e posterior processamento através da transesterificação como citado anteriormente. O Certificado de Qualidade do B100, mostrado a seguir, atestando as propriedades físico-química foi definido a partir de testes realizados pelo Laboratório GreenTec (Escola de Química/UFRJ). Observa-se que todas as propriedades medidas atenderam aos valores limites estabelecidos pela ANP.



ESCOLA DE QUÍMICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO



CERTIFICADO DE QUALIDADE DE B-100

Empresa: OUROFINO

Amostra: HEDF 2012/01

CARACTERÍSTICAS	RESULTADO	MÉTODO	UNIDADE	Resolução N°7 - ANP	
				Min.	Máx.
Aspecto	Claro 2 (25°C) / Isento de impurezas	NBR 16048	-	LII	LII
Massa específica a 20° C	857,7	ASTM D4052	kg/m ³	850	900
Viscosidade Cinemática a 40°C	5,24	ASTM D445	mm ² /s	3	6
Teor de Água, máx.	350	EN 12937	mg/kg		380
Contaminação Total, máx.	22	EN 12662	mg/kg		24
Ponto de fulgor, mín.	172,0	ASTM D93	°C	100	
Teor de éster, mín	96,6	EN 14108	% massa	96,5	
Resíduo de carbono, máx.	0,019	ASTM D4580	% massa		0,050
Cinzas sulfatadas, máx.	<0,01	ASTM D874	% massa		0,02
Enxofre total, máx.	<0,01	NBR 15867	mg/kg		50
Sódio + Potássio, máx.	<0,01	NBR 15558	mg/kg		5
Cálcio + Magnésio, máx.	<0,01	NBR 15558	mg/kg		5
Fósforo, máx.	<0,01	NBR 15558	mg/kg		10
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	1	ASTM D180	-		1
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	6	ASTM D6871	°C		19
Índice de acidez, máx.	0,38	ASTM D664	mg KOH/g		0,5
Glicerol livre, máx.	0,02	ASTM D6584	% massa		0,02
Glicerol total, máx.	0,242	ASTM D6584	% massa		0,25
Monoacilglicerol	0,429	ASTM D6584	% massa		0,80
Diacilglicerol	0,129	ASTM D6584	% massa		0,20
Triacilglicerol	0	ASTM D6584	% massa		0,20
Metanol ou Etanol, máx.	0,02	EN 14110	% massa		0,2
Índice de Iodo	61,7	EN 14111	g/100g	Anotar	Anotar
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.	6,3	EN 14112	h	6	

Rio de Janeiro, 24 de outubro de 2012

Donato Aranda

Prof. Donato A. G. Aranda

(AC Certisign RFB G3 ICP Brasil - a8 96 9f 4e 8c 23 c4 ee 23 64 19 65 d0 2c 25 10 95 4a 2f 3b)

Escola de Química/UFRJ

CRQ 03314401, 3ª. Região

E-mail: donato@eq.ufrj.br

Registro N° 001 OUT 2012

Figura 4-1 - Características Físico-Químicas do Combustível

4.1.3. Misturas do B5 ao B100

A mistura foi feita a partir das seguintes proporções:

Combustível Final (1000 ml)	B5 (ml)	B100 (ml)
B20	842	158

4.2. Procedimento de Ensaio

Os testes foram realizados de acordo com a seguinte metodologia:

- Preparação dos combustíveis com rede de alimentação para o motor
- Ensaio de desempenho do motor funcionando com cada um dos combustíveis, nos pontos de operação correspondentes a 100%, 75%, 50% e 25% da potência máxima contínua do motor.
- Determinação das curvas de Potência x RPM do motor
- Determinação do consumo de combustível, nestes pontos de operação
- Cálculo do consumo específico de combustível, nestes pontos de operação
- Determinação das variáveis de operação do motor, como temperatura dos gases de descarga, de entrada do ar, do combustível e etc
- Ensaio de emissões, determinando-se nos pontos de operação o teor de NO_x, CO, HC e O₂
- Determinação dos resultados comparativos do motor utilizando os combustíveis, B20 e B5 e apresentação em tabelas ou gráficos

Os valores apresentados nas tabelas e gráfico dos ensaios de desempenho e emissões mostram um valor médio entre as medidas obtidas em cada ponto de operação.

Capítulo 5 - Resultados e Discussões

5.1. Aspectos Gerais

Os resultados que serão apresentados a seguir foram obtidos dos ensaios experimentais que duraram cerca de dez dias. Para o teste de emissões de gases, foram repetidos 3 ensaios para cada um dos pontos de operação de cada combustível, totalizando 24 medições. Para o teste para definição de curvas de performance do motor apenas uma tomada de dados por ponto de operação medido por combustível, totalizando 34 medições.

Serão apresentadas tabelas com as resultados medidos no motor e na análise dos gases de descarga (e suas respectivas incertezas). Como os pontos de potência e rotação foram pré-estabelecidos, estes não irão variar de combustível para combustível (considerar erro de medição para este aspecto), entretanto serão verificadas diferenças, principalmente no consumo e na descarga dos gases. As medições, assim como as incertezas de medição das principais variáveis, também são mostradas, para cada combustível. As incertezas foram calculadas de acordo com o descrito no seção 4.2.

Para se ter referência de comparação foram utilizadas curvas do estudo de Souza Junior. Essas curvas foram obtidas utilizando o mesmo conjunto motor-dinamômetro, entretanto houve diferenças nos pontos de operação escolhidos para análise. Essa diferença resultou na necessidade de um trato prévio dos dados. Foram necessárias interpolações dos dados e das incertezas para que chegassemos nos pontos de operação utilizados no atual trabalho. O resultados do tratamento está no Apêndice C.

5.2. Ensaio para Definição de Curvas de Performance

Com os resultados mostrados na Tabela 5-3 e Tabela 5-4, foram obtidos os gráficos comparando os resultados dos combustíveis B5 e B20.

Tabela 5-1 - Tabela de Resultados de Desempenho mostrando os Valores RPM x Torque

RPM x Torque		
RPM	Torque (Nm)	
	B5	B20
1400	31.9	32.6
1500	32.8	33.6
1600	33.8	33.9
1700	34.2	34.5
1800	34.6	34.8
1900	34.4	34.5
2000	34.4	34.1
2100	34.1	33.7
2200	34.4	33.3
2300	34.8	33.9
2400	34.2	34.7
2500	34	34.2
2600	32.8	32.7
2700	31.2	31.5
2800	31.6	31.4
2900	31.7	31.1
3000	31.3	30

Tabela 5-2 - Tabela de Resultados de Desempenho mostrando os Valores RPM x Potencia

RPM x Potência		
RPM	Potência (Nm)	
	B5	B20
1400	4.7	4.7
1500	5.1	5.2
1600	5.6	5.6
1700	6	6.1
1800	6.5	6.5
1900	6.8	6.8
2000	7.2	7.1
2100	7.5	7.4
2200	7.9	7.6
2300	8.3	8.1
2400	8.6	8.7
2500	8.9	8.9
2600	8.9	8.9
2700	8.8	8.9
2800	9.2	9.1
2900	9.6	9.4
3000	9.8	9.4

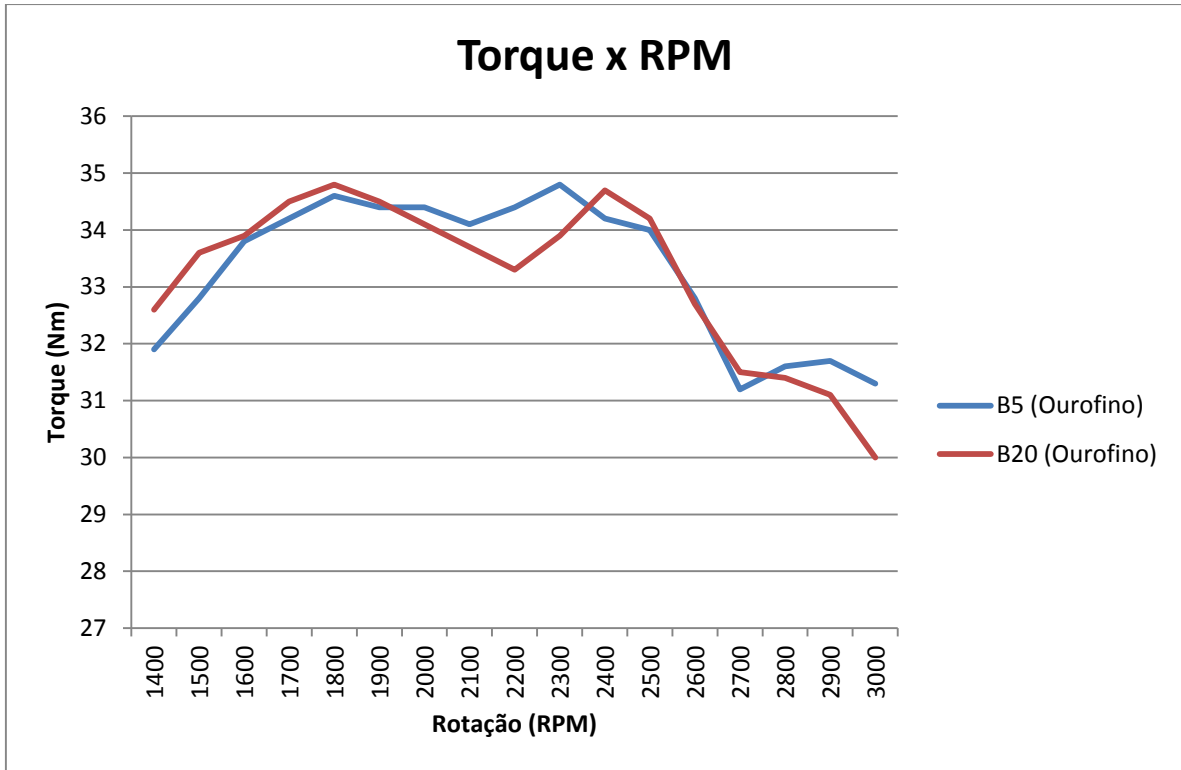


Figura 5-1- Torque x RPM funcionando com B5 e B20 nos testes de Desempenho

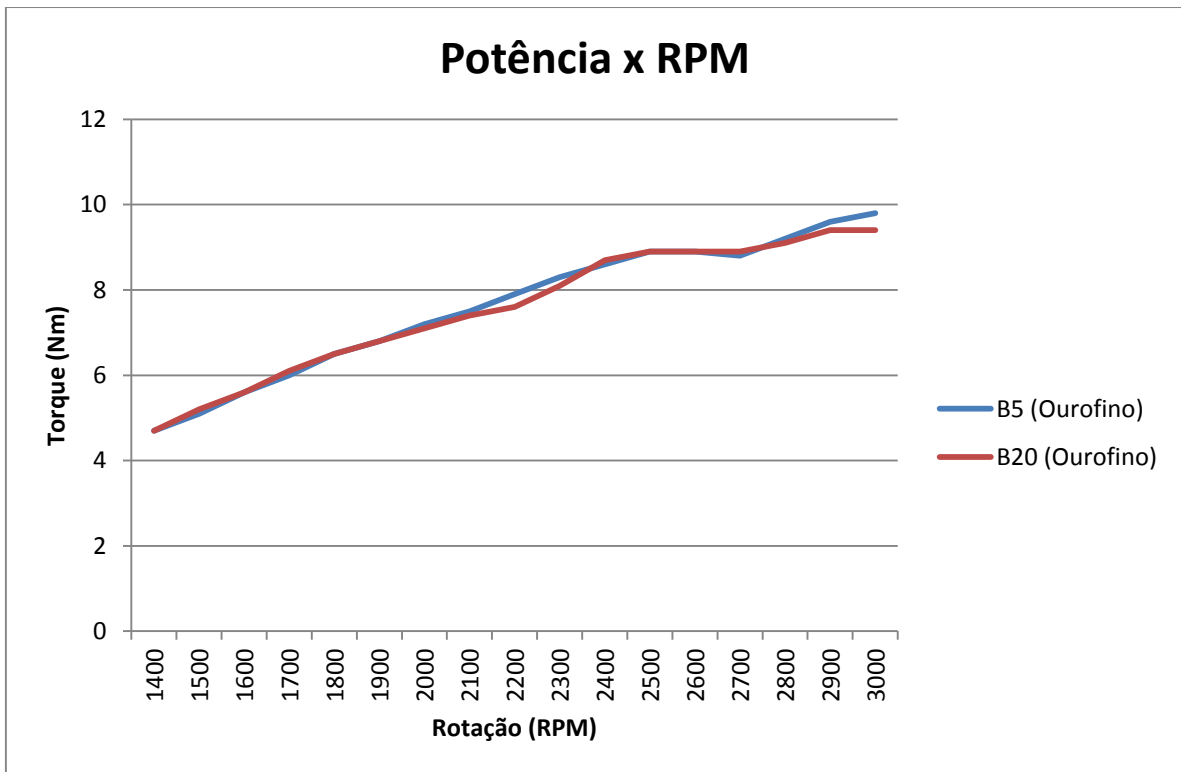


Figura 5-2 - Potência x RPM funcionando com B5 e B20 nos testes de Desempenho

5.3. Ensaio com o B5

A Tabela 5-3 e Tabela 5-4 abaixo apresentam os valores das variáveis medidas, com o combustível B5:

Tabela 5-3 - Resultados dos ensaios do motor para o B5

Potência (kW)	Rotação (RPM)	Torque (N.m)	Tempertura de Exaustão (°C)	Temperatura da Água(°C)	Consumo (g/s)
2.5	1501	16.2	238.0	88.7	0.20
5.0	2002	23.9	335.3	90.3	0.37
7.5	2497	28.7	449.0	89.7	0.56
8.8	2799	30.2	501.7	88.7	0.71

Tabela 5-4 - Resultados dos gases de descarga para o B5

Potência (kW)	Rotação (RPM)	CO ₂ (%)	CO (%)	O ₂ (%)	NOx (ppm)	HC (ppm)
2.5	1501	1.80	0.020	19.6	504	3
5.0	2002	1.10	0.020	20.7	254	0
7.5	2497	2.73	0.087	18.5	472	2
8.8	2799	3.47	0.150	17.3	479	1

As incertezas de medição para as variáveis medidas acima são apresentadas nas tabelas a seguir, utilizando as equações da seção 3.6:

Tabela 5-5 – Incerteza dos resultados dos ensaios do motor para o B5

Incert. Potência (kW)	Incert. Rotação (RPM)	Incert. Torque (N.m)	Incert. Tempertura de Exaustão (°C)	Incert. Temperatura da Água(°C)	Incert. Consumo (g/s)
0.5	16	0.6	5.6	1.3	0.00
0.5	21	0.6	16.9	1.5	0.00
0.5	26	0.7	11.6	1.3	0.01
0.5	29	0.7	8.3	1.3	0.01

Tabela 5-6 – Incerteza dos resultados dos ensaios do motor para o B5

Incert. Potência (kW)	Incert. Rotação (RPM)	Incert. CO₂ (%)	Incert. CO (%)	Incert. O₂ (%)	Incert. NOx (ppm)	Incert. HC (ppm)
0.5	16	0.05	0.005	0.3	7	2
0.5	21	0.10	0.005	0.3	14	2
0.5	26	0.07	0.007	0.3	12	2
0.5	29	0.18	0.029	0.4	10	2

5.4. Ensaio com o B20

As Tabelas 5-7 e 5-8 abaixo apresentam os valores das variáveis medidas, com o combustível B20:

Tabela 5-7 - Resultados dos ensaios do motor para o B20

Potência (kW)	Rotação (RPM)	Torque (N.m)	Temperatura de Exaustão (°C)	Temperatura da Água (°C)	Consumo (g/s)
2.5	1498	16.0	240.7	87.0	0.20
5.0	2005	23.9	347.0	89.7	0.40
7.5	2496	28.8	444.0	90.0	0.58
9.6	2801	32.6	535.7	88.7	0.76

Tabela 5-8 - Resultados dos gases de descarga para o B20

Potência (kW)	Rotação (RPM)	CO₂ (%)	CO (%)	O₂ (%)	NOx (ppm)	HC (ppm)
2.5	16	1.60	0.020	19.1	439	0
5.0	24	0.90	0.020	20.2	186	0
7.5	29	1.60	0.050	19.2	263	0
9.6	33	3.40	0.210	16.7	439	0

As incertezas de medição para as variáveis medidas acima são apresentadas nas tabelas a seguir, utilizando as equações da seção 3.6:

Tabela 5-9 – Incerteza dos resultados dos ensaios do motor para o B20

Incert. Potência (kW)	Incert. Rotação (RPM)	Incert. Torque (N.m)	Incert. Tempertura de Exaustão (°C)	Incert. Temperatura da Água(°C)	Incert. Consumo (g/s)
0.5	16	0.6	4.8	2.5	0.00
0.5	21	0.6	8.6	1.3	0.00
0.5	26	0.7	5.7	1.2	0.00
0.5	29	0.7	5.6	1.7	0.01

Tabela 5-10 – Incerteza dos resultados dos ensaios do motor para o B20

Incert. Potência (kW)	Incert. Rotação (RPM)	Incert. CO₂ (%)	Incert. CO (%)	Incert. O₂ (%)	Incert. NOx (ppm)	Incert. HC (ppm)
0.5	16	0.05	0.005	0.3	9	2
0.5	21	0.05	0.005	0.3	6	2
0.5	26	0.17	0.005	0.3	25	2
0.5	29	0.15	0.017	0.3	27	2

5.5. Comparações entre os Resultados Encontrados para a Potência, Rotação e Torque

Os gráficos a seguir tiveram como objetivo de comprovar a comparabilidade dos resultados entre os testes da Ouro Fino, entre os testes da referência e entre os testes da Ouro Fino e da referência.

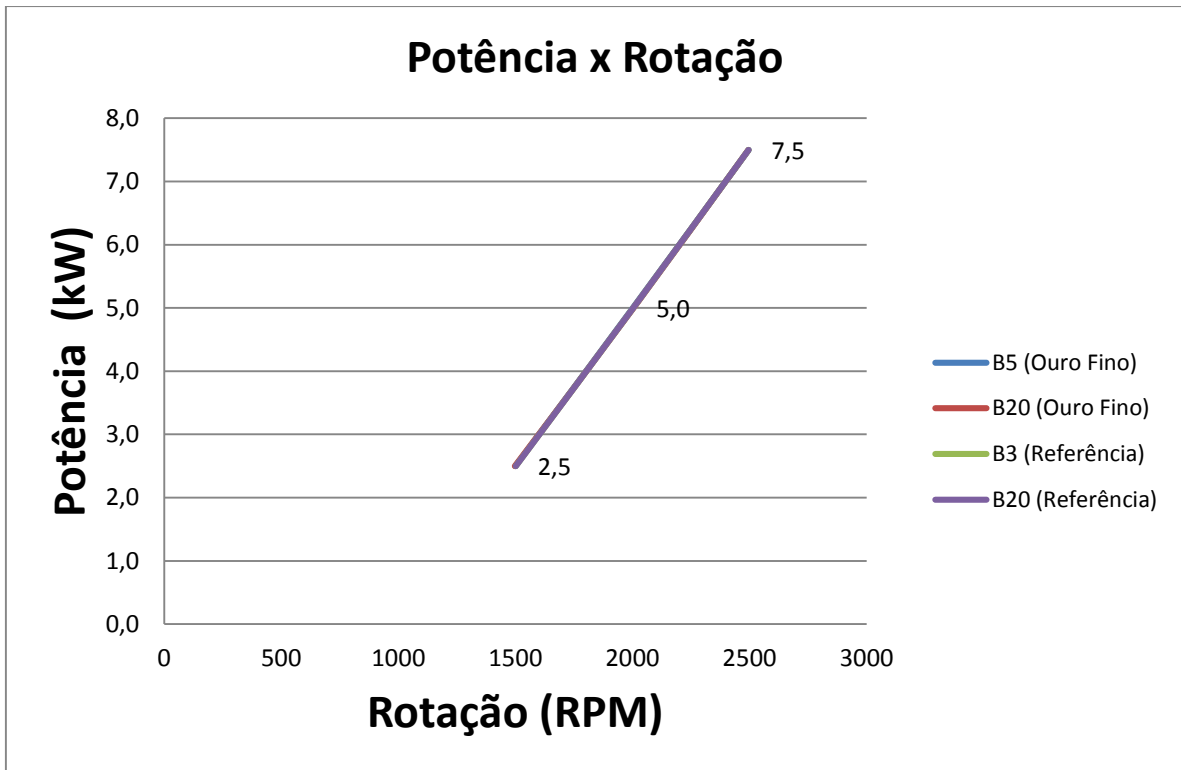


Figura 5-3- Potência x RPM funcionando com B5 e B20

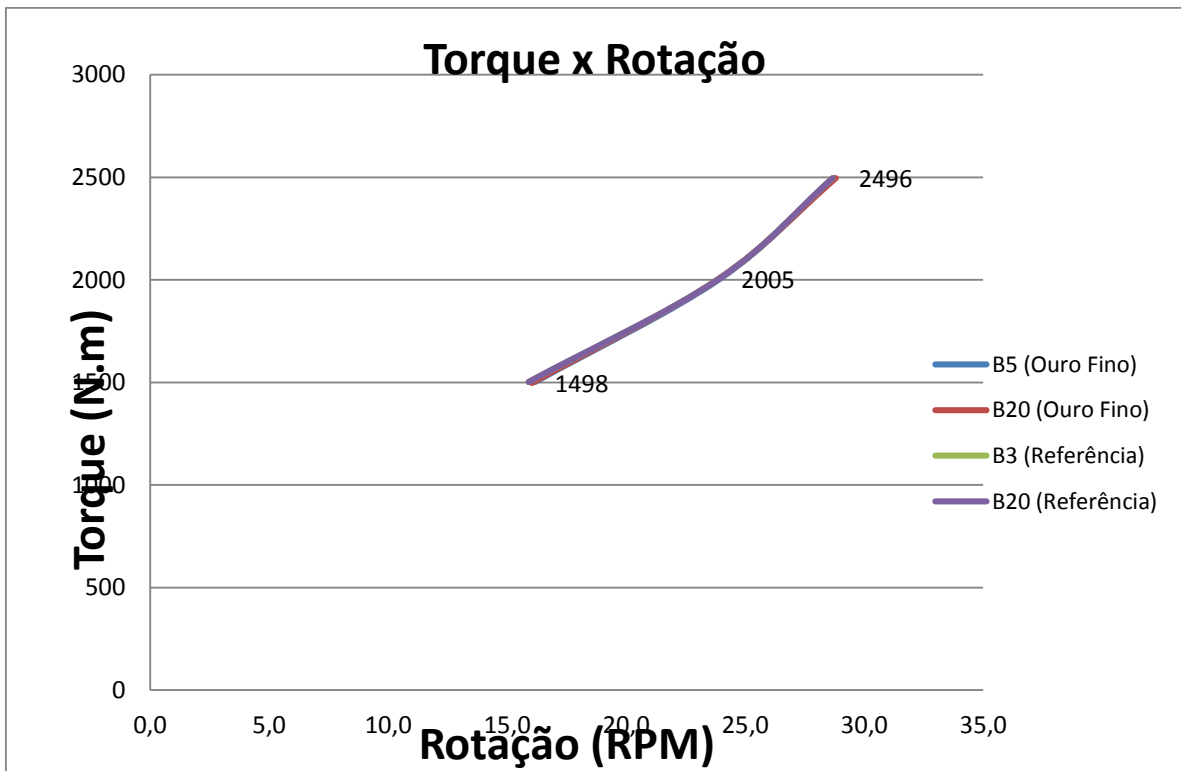


Figura 5-4- Torque x RPM funcionando com B5 e B20

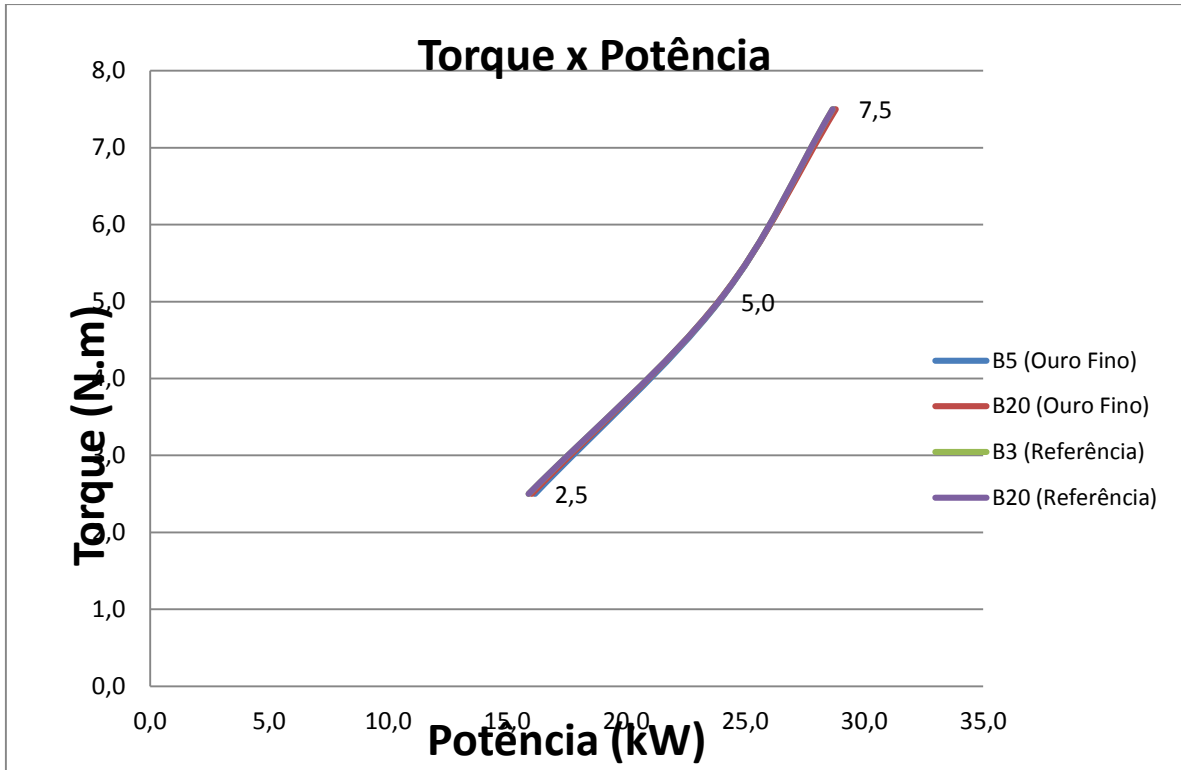


Figura 5-5- Torque x Potência funcionando com B5 e B20

5.6. Comparações entre os Resultados Encontrados para a Temperatura de Exaustão e Temperatura da Água

A Figura 5-6 e Figura 5-7 a seguir indicam os resultados para a temperatura de exaustão dos testes.

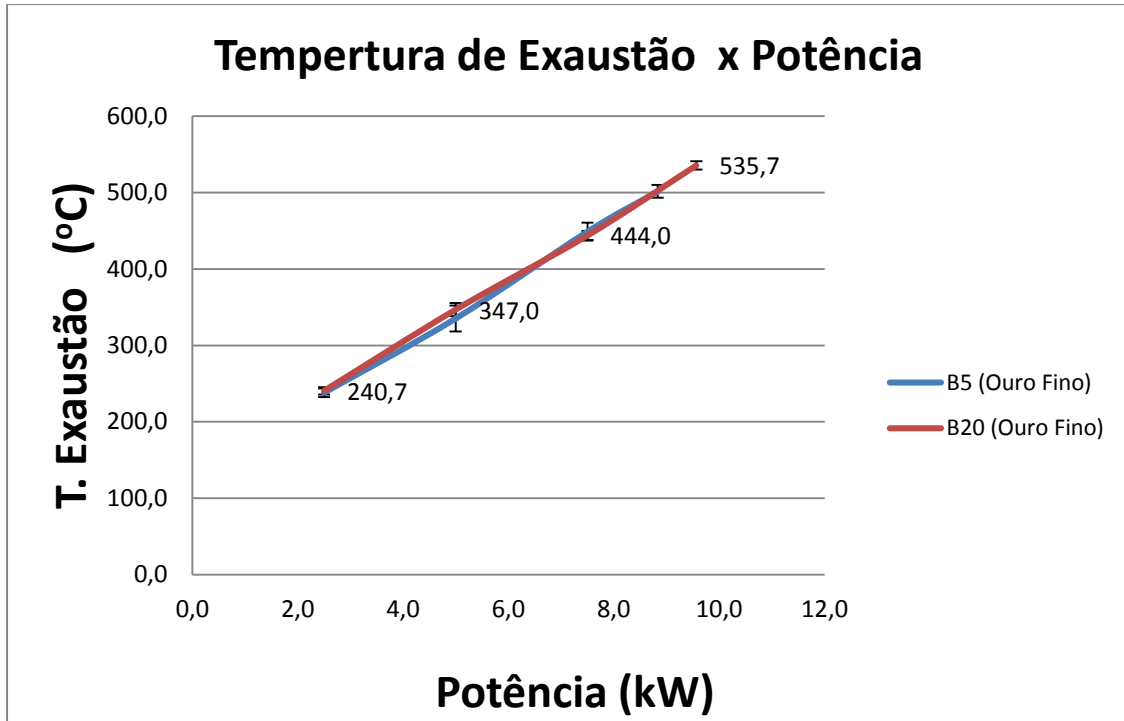


Figura 5-6 – Gráfico Comparativo T. Exaustão x Potência

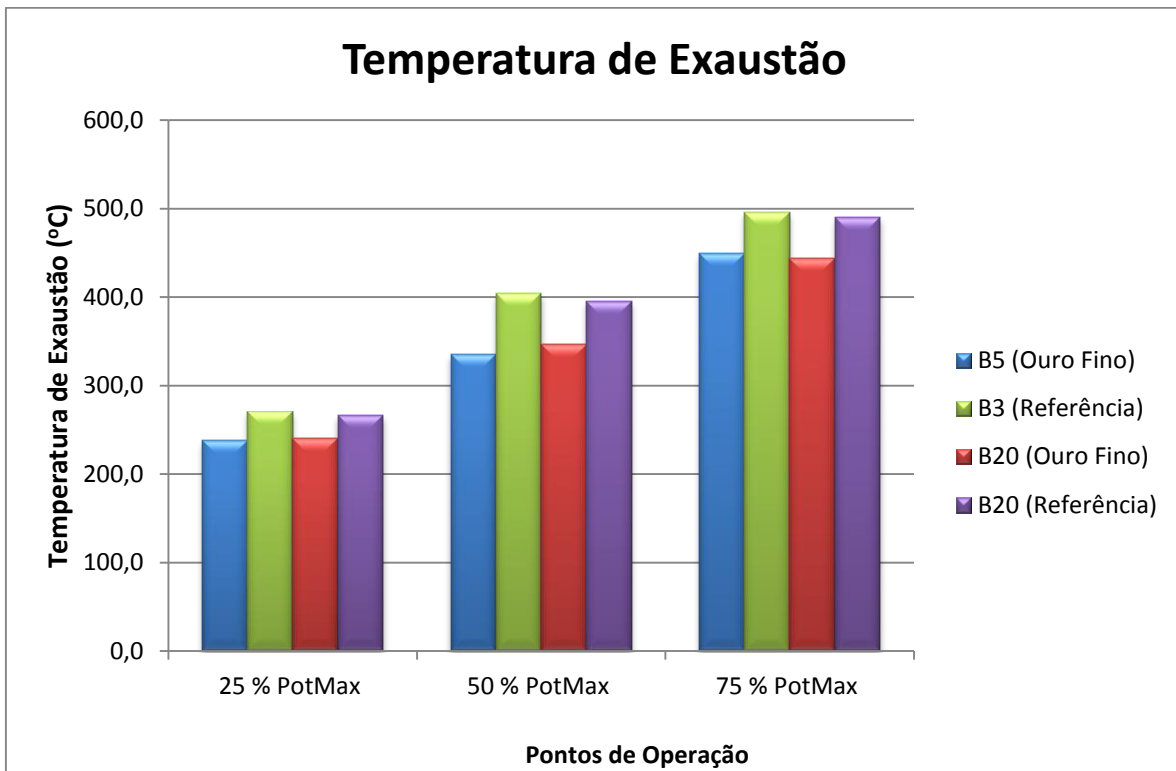


Figura 5-7 – Gráfico de Colunas de T. Exaustão

O resultado para a temperatura de exaustão nos ensaios foi satisfatório. Para os dois combustíveis não houve muita diferença apenas se percebeu que o B5 que ficou ligeiramente maior. Esse resultado já era esperado já que o poder calorífico do diesel é maior que o biodiesel fazendo com que a temperatura na descarga tenda a ser maior.

Em relação a comparação com a referência, se pode perceber que os resultados para o biodiesel de 2ª geração para todos os pontos de operação foi inferior aos resultados da referência.

A Figura 5-6 e Figura 5-7 a seguir indicam os resultados para a temperatura de exaustão dos testes.

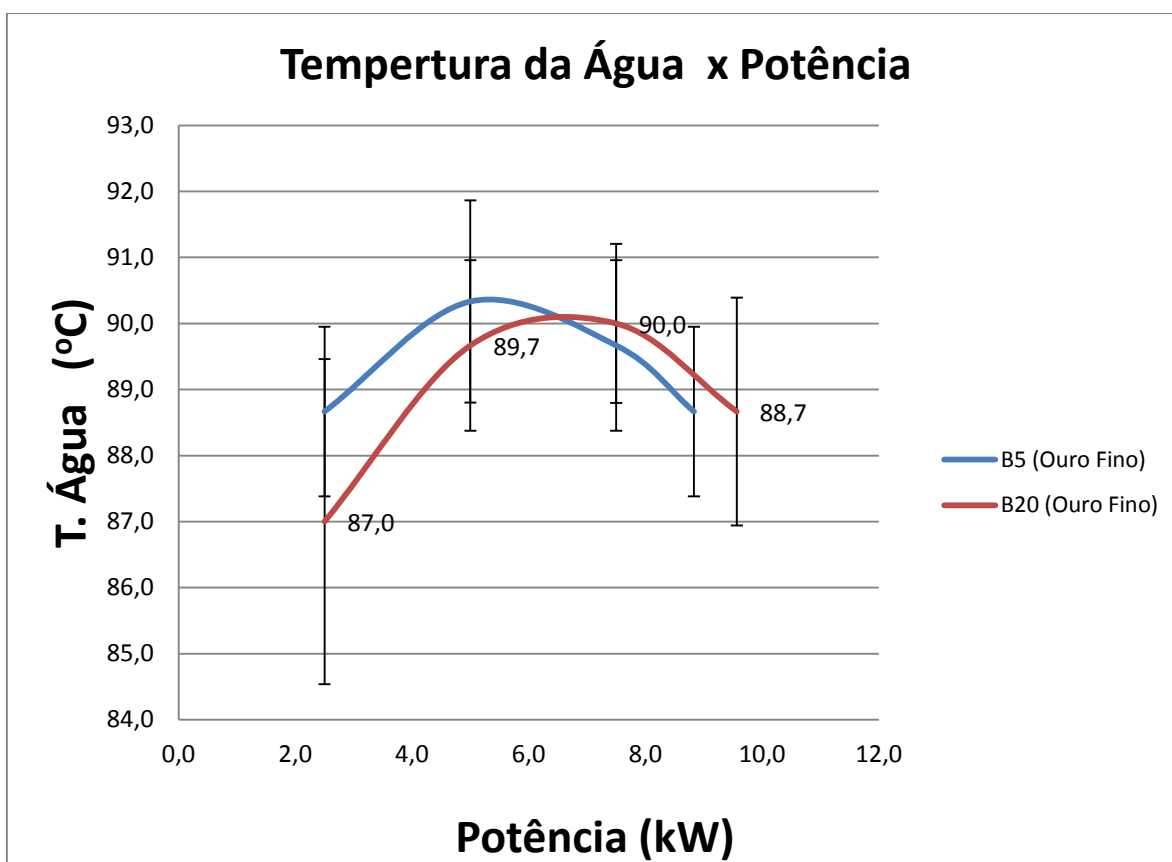


Figura 5-8 – Gráfico Comparativo T. Água x Potência

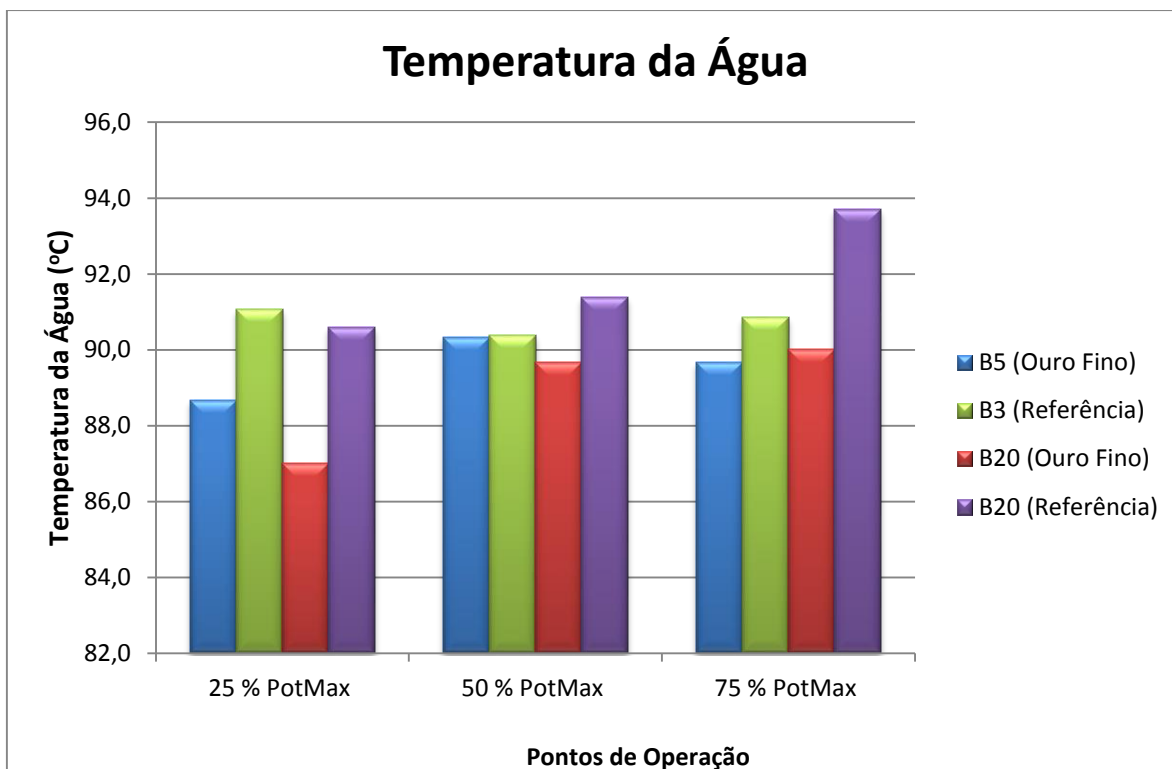


Figura 5-9 – Gráfico de Colunas de T. Exaustão

O resultado dos ensaios para a temperatura também foi satisfatório. Houve um leve deslocamento do pico de temperatura de um combustível em relação ao outro porém ambos se localizaram próximos da potência ótima (menor consumo específico) .

Em relação a comparação com a referência, se pode perceber que os resultados para o B5 da Ourofino e o B3 da referência tiveram comportamentos opostos. Enquanto o B5 teve seu pico a 50% da Potência Nominal Máxima, o B3 teve seu ponto mais inferior a 50% da Potência Máxima. A comparação entre os combustíveis B20 foi mais igual. Para ambos os resultados, houve a mesma tendência de aumentar gradualmente com o aumento da potência.

5.7. Comparações entre os Resultados Encontrados para o Consumo e Consumo Específico de Combustível

Os gráficos a seguir mostram a variação do consumo e consumo específico de combustível nas cargas utilizadas nos testes.

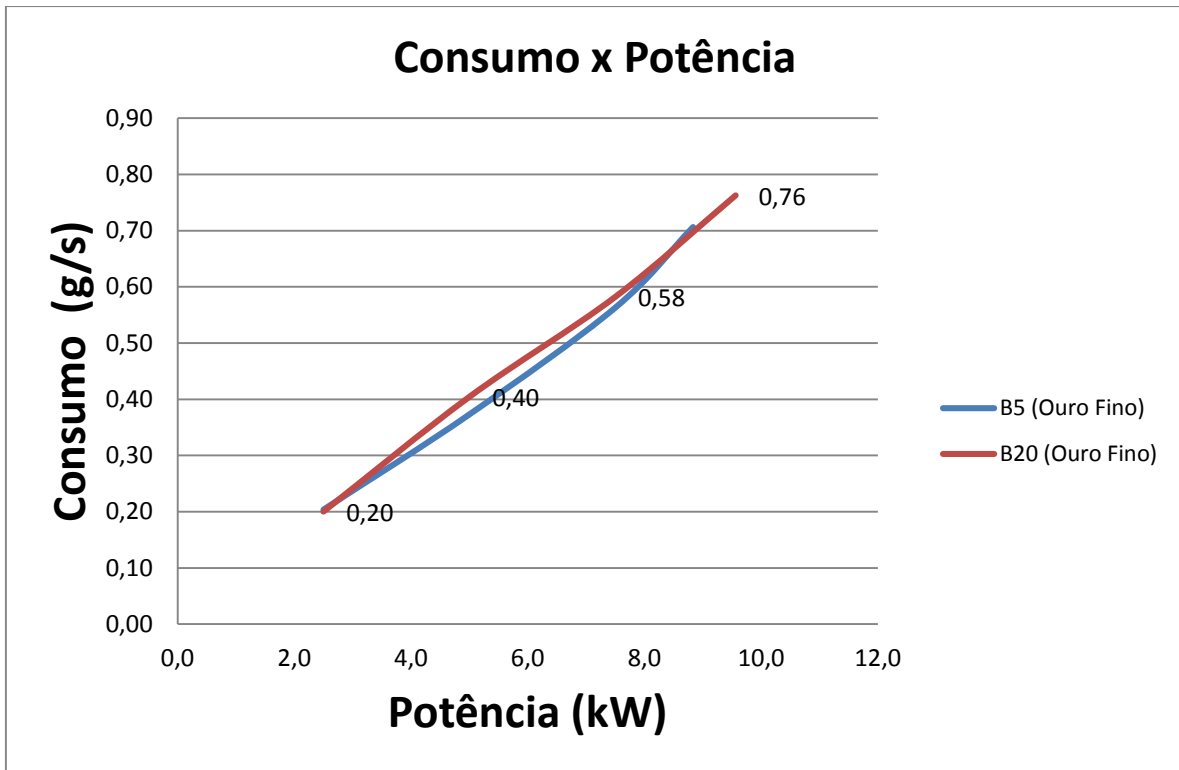


Figura 5-10 – Gráfico Comparativo Consumo x Potência

Como esperado, o consumo de combustível aumentou com o aumento da potência. A seguir mostra-se o gráfico de consumo específico.

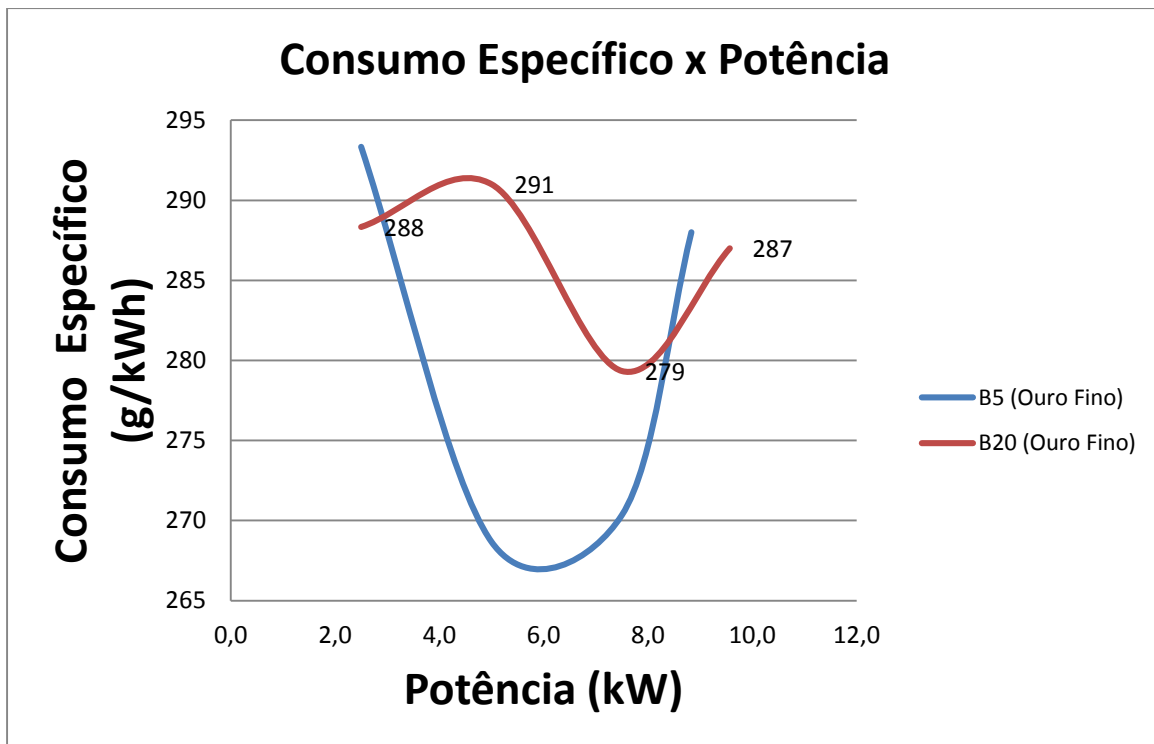


Figura 5-11 – Gráfico Comparativo Consumo Específico x Potência

Devido ao menor poder calorífico do biodiesel em relação ao óleo diesel, espera-se que o consumo específico dos combustíveis com maior percentagem do biodiesel seja maior. Entretanto, dependendo do ponto de operação do motor, isto realmente não se verifica.

5.8. Comparações entre os Resultados Encontrados para os Gases de Descarga

5.8.1. Emissões de CO₂

A quantidade de CO₂ emitido na exaustão indica o quanto a combustão é completa. É esperado que a emissão de CO₂ cresça com o aumento da carga, pois o aumento da carga e temperatura dos gases no interior do cilindro contribui para oxidação do CO e maior taxa de formação de CO₂. Entretanto foram obtidas, para 25% de carga, maiores do que o esperado. Dessa forma, conclui-se que houve uma combustão mais completa nesse primeiro ponto.

A quantidade de dióxido de carbono emitido não apresentou diferenças significativas entre os combustíveis B5 e B20. Isso se deve pois os motores diesel operam com excesso de ar, contribuindo para a oxidação do combustível.

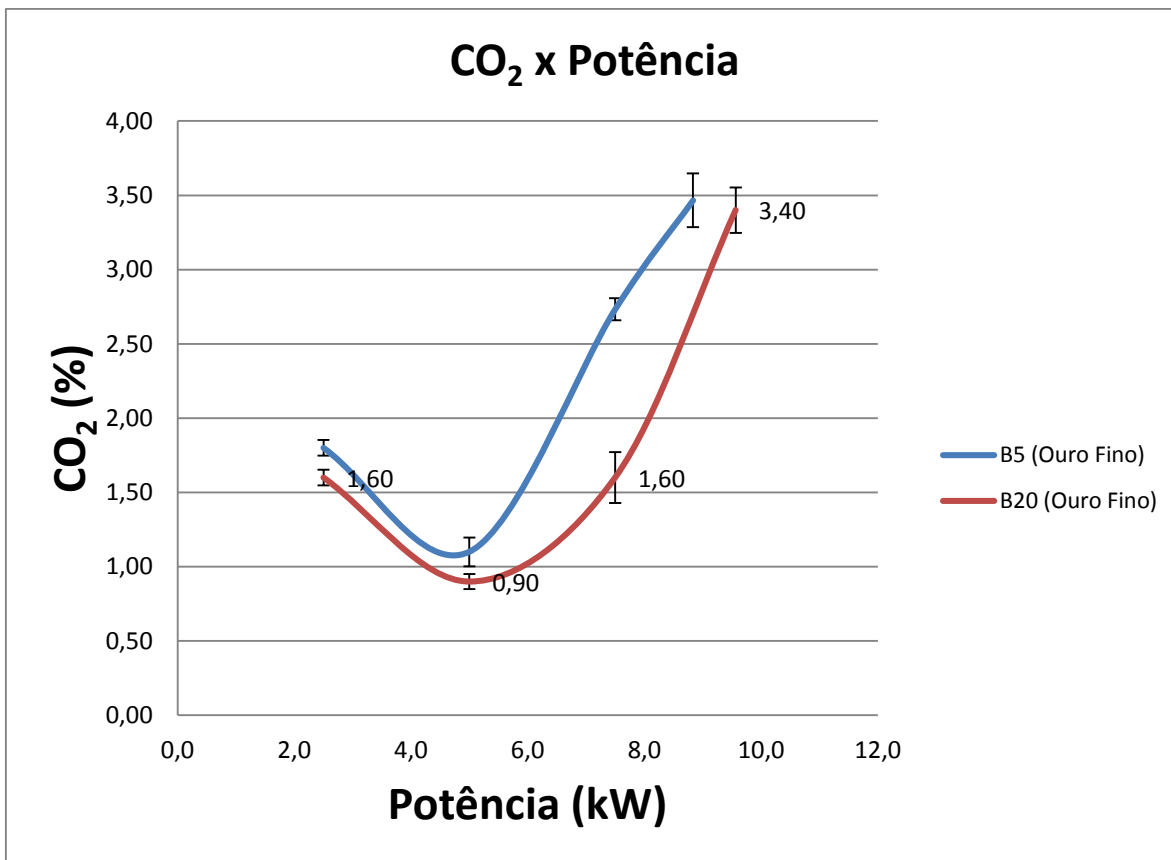


Figura 5-12 – Gráfico Comparativo CO₂ x Potência

Apesar de obtidos resultados inferiores aos resultados da referência, estes estiveram na mesma ordem de grandeza e portanto considerados válidos.

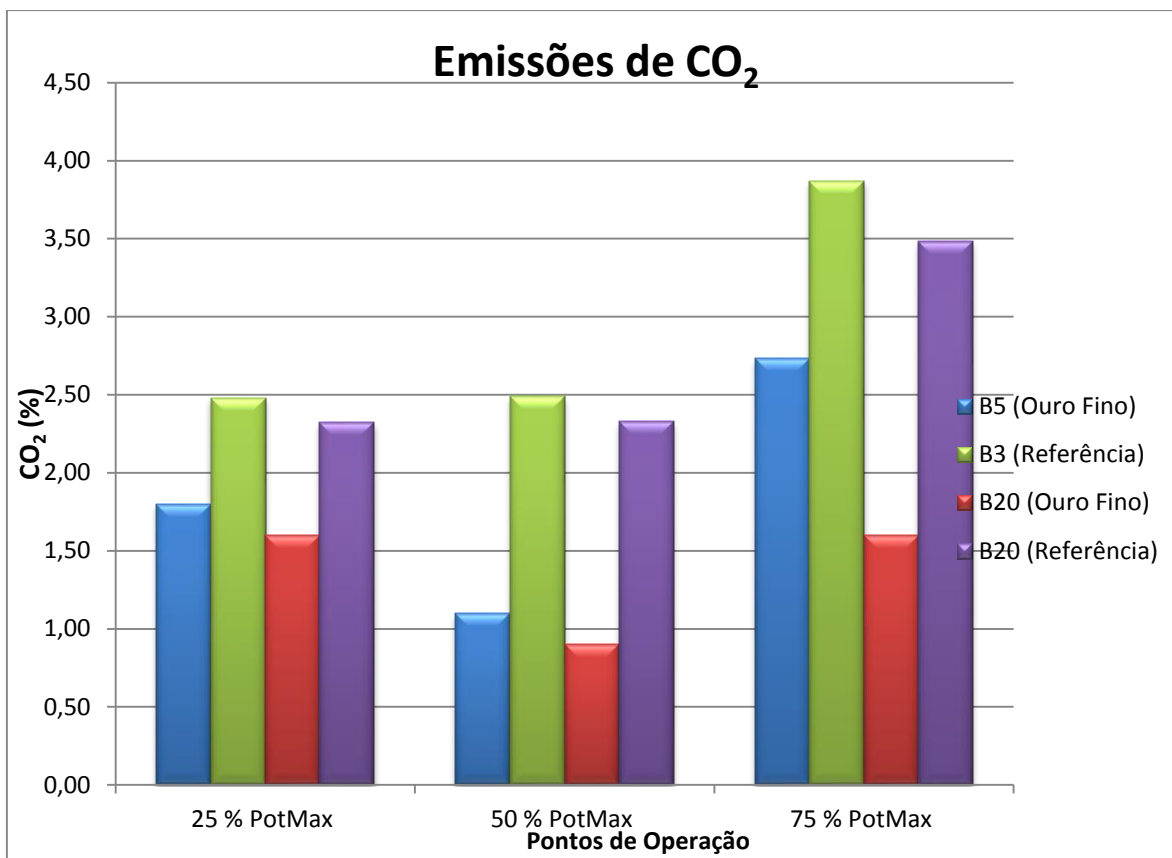


Figura 5-13 – Gráfico de Colunas Comparativo CO₂ x Potência

5.8.2. Emissões de CO

A quantidade de CO emitido na exaustão, assim como a de CO₂, está diretamente relacionado a combustão. Dessa forma, era esperado que este aumentasse com o aumento de carga, porém o que foi observado foi a mesma tendência dos resultados para as emissões de CO₂, levando a um resultado mais elevado que o esperado no primeiro ponto de operação.

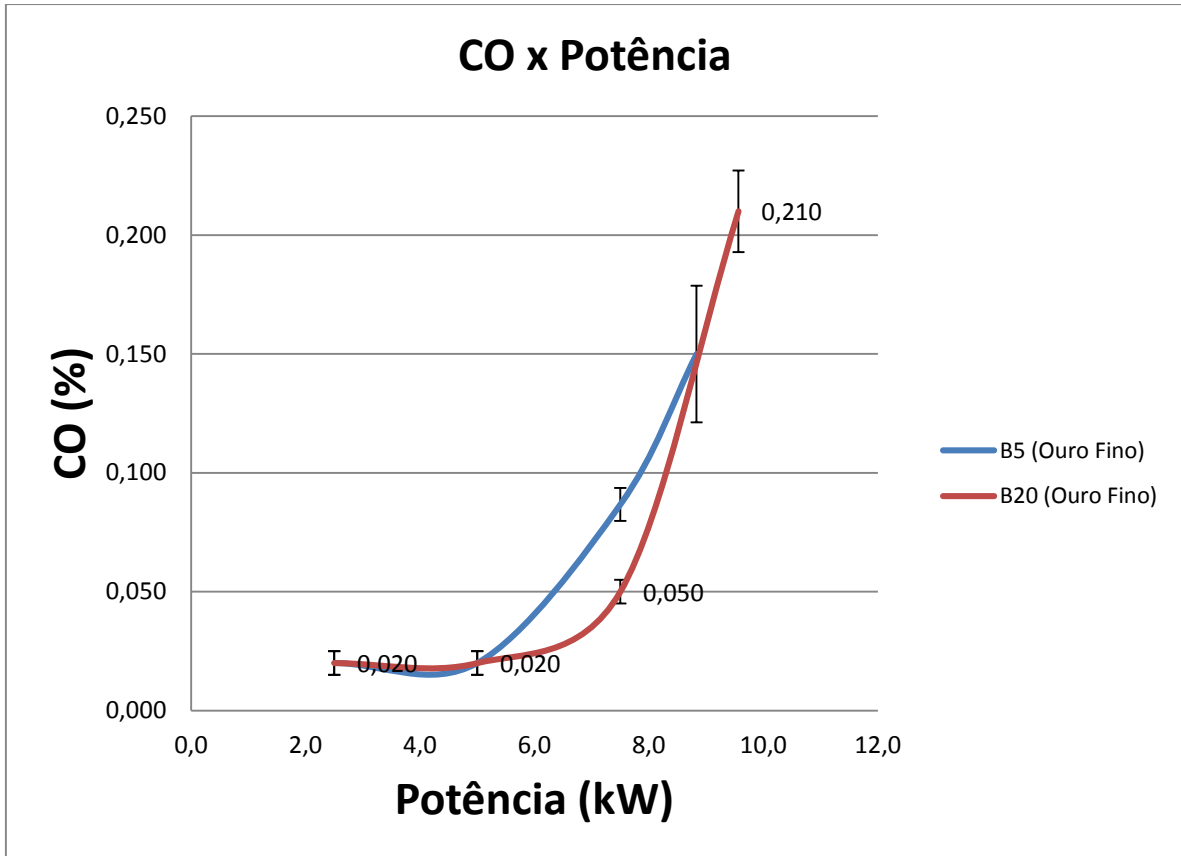


Figura 5-14 – Gráfico Comparativo CO x Potência

Apesar de obtidos resultados inferiores aos resultados da referência, estes estiveram na mesma ordem de grandeza e portanto considerados válidos.

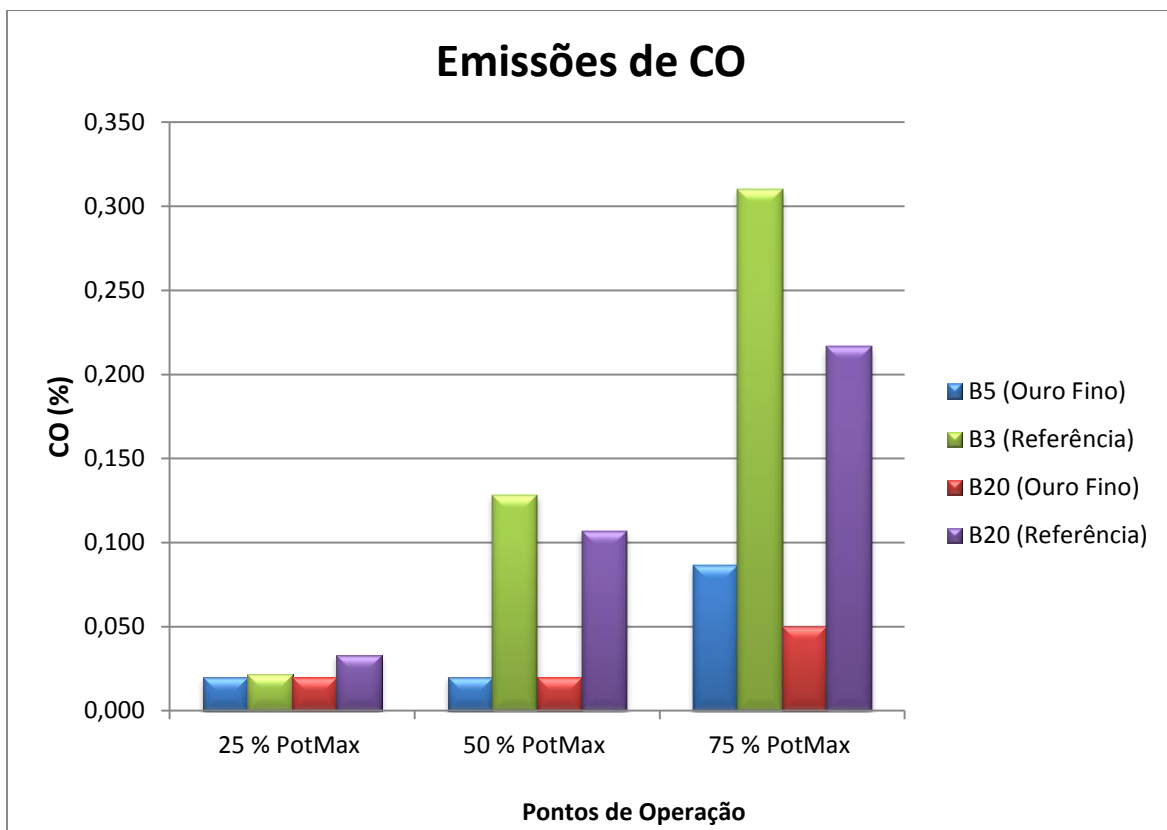


Figura 5-15 – Gráfico de Colunas Comparativo CO x Potência

5.8.3. Emissões de O₂

Teoricamente, conforme a carga aumenta, a oxidação do combustível aumenta formando mais CO, CO₂ e NO_x, e diminuindo as emissões de O₂. Entretanto essa tendência somente foi observada a partir dos Pontos de Operação de 50% da Potência Máxima. Comparativamente, os combustíveis utilizados não implicaram significativas diferenças na emissão de oxigênio, sendo a diferença máxima entre as emissões atingindo 3%. Apesar do biodiesel ter oxigênio em sua composição os motores diesel operam com excesso de ar, e por isso a razão ar/combustível é mais relevante na análise da emissão do oxigênio [12].

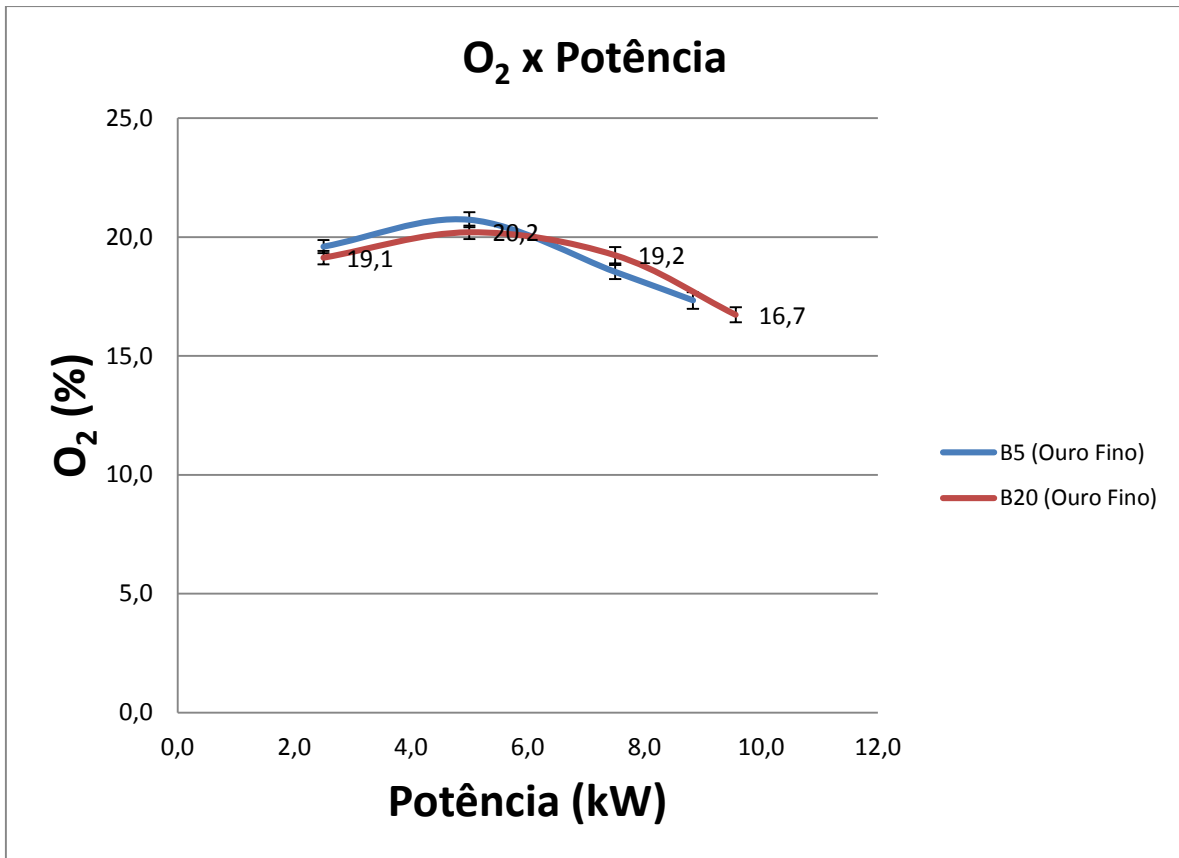


Figura 5-16 – Gráfico Comparativo O₂ x Potência

Comparados com a referência, os resultados se demonstraram satisfatórios pois mesmo não mantendo a tendência de diminuição do O₂ com o aumento da carga entre os dois primeiros pontos de operação essa tendência se manteve posteriormente e a ordem de grandeza dos resultados coincidiu.

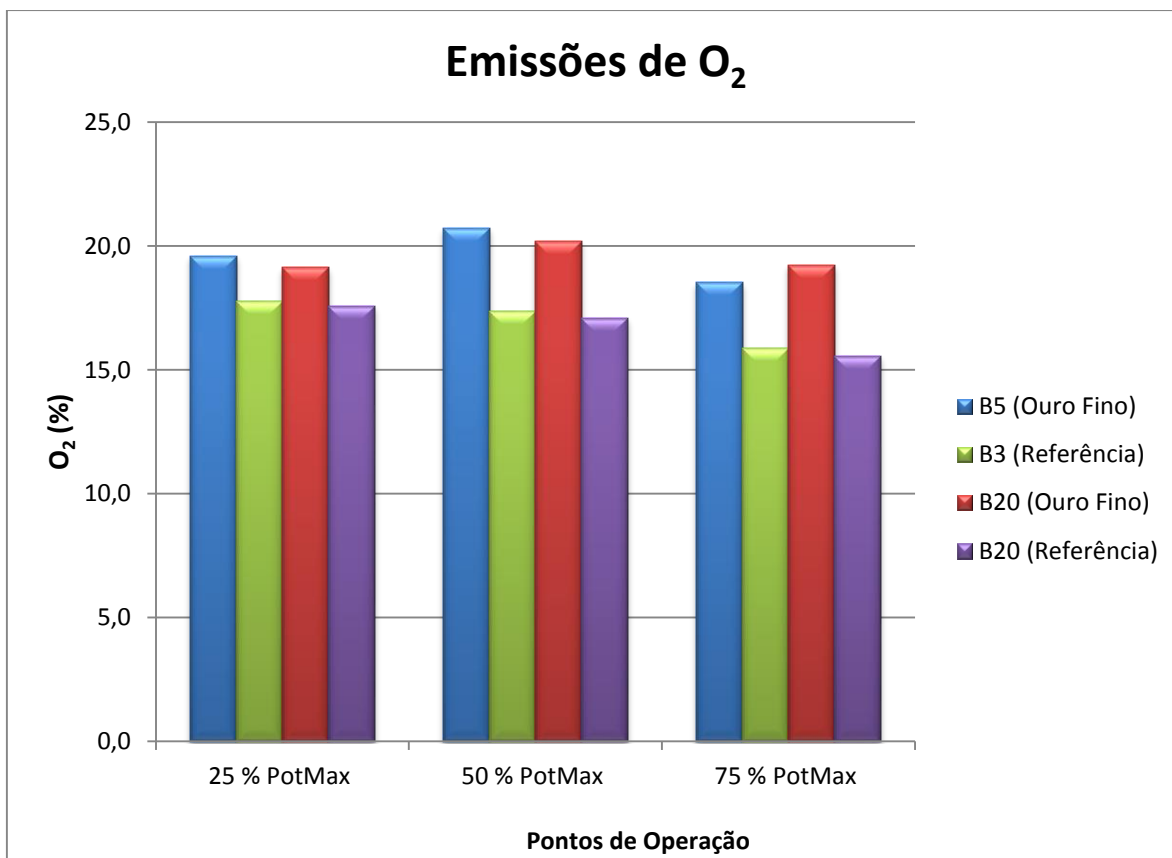


Figura 5-17 – Gráfico de Colunas Comparativo O₂ x Potência

5.8.4. Emissões de NO_x

Os óxidos de nitrogênio são formados na reação de combustão devido à presença do nitrogênio no ar e do oxigênio na mistura. Analisando a cinética química da produção de NO_x, mostra-se que a taxa de formação desses óxidos aumenta com a concentração de oxigênio na mistura e principalmente quanto maior for a temperatura no processo de combustão [17]. Muitas pesquisas divergem sobre qual combustível emite maior quantidade de NO_x, o biodiesel ou o diesel mineral.

Os resultados para emissões de NO_x para B5 e B20 foram muito próximos apesar de as emissões para o B5 serem sempre superiores. De qualquer forma, sendo nocivo ao meio ambiente, o resultado foi positivo para a validação do biodiesel experimentado como um biodiesel limpo.

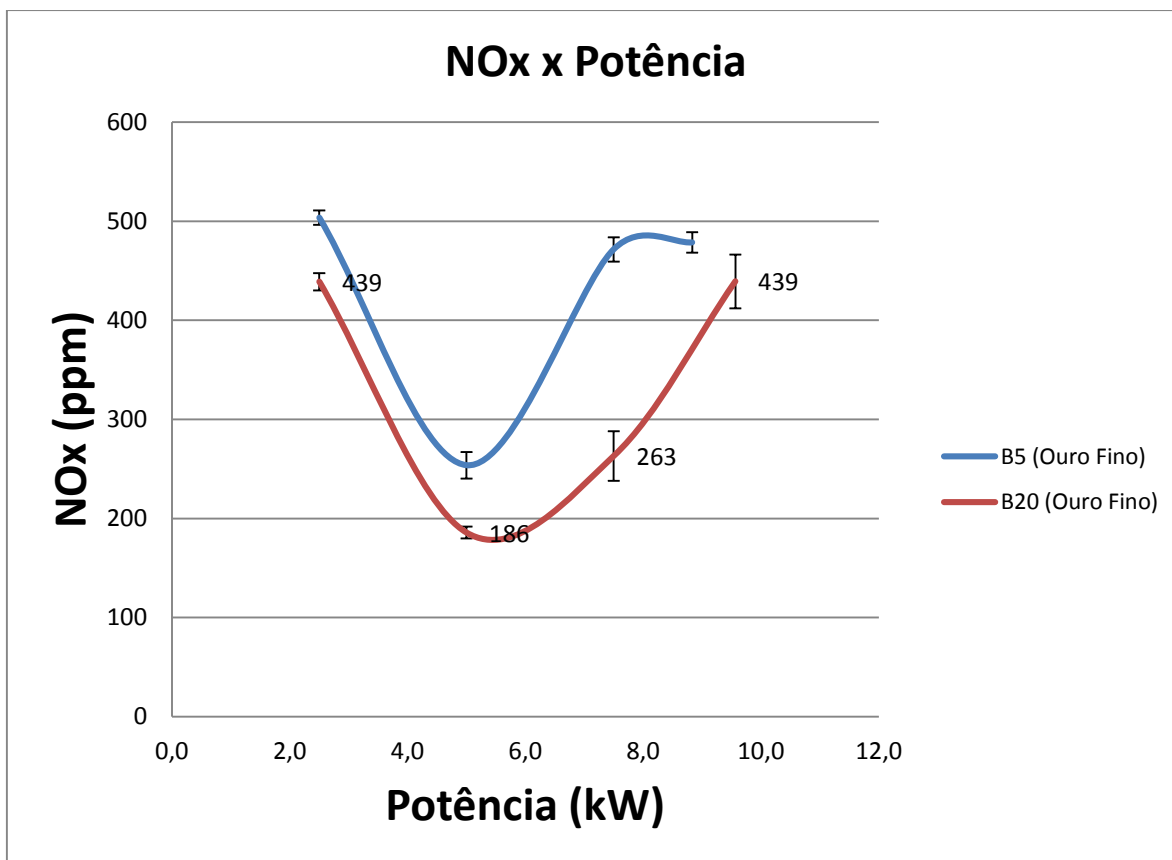


Figura 5-18 – Gráfico Comparativo NO_x x Potência

Apesar de os resultados das emissões do estudo em comparação com a referência não apresentarem diferença significativa pode-se confirmar o fato de que a relação entre o NO_x e a presença de biodiesel ainda gera dúvidas. Na referência, foi constatado que sempre há maiores emissões de NO_x para o B20 em relação ao B3, contrariando o observado neste estudo.

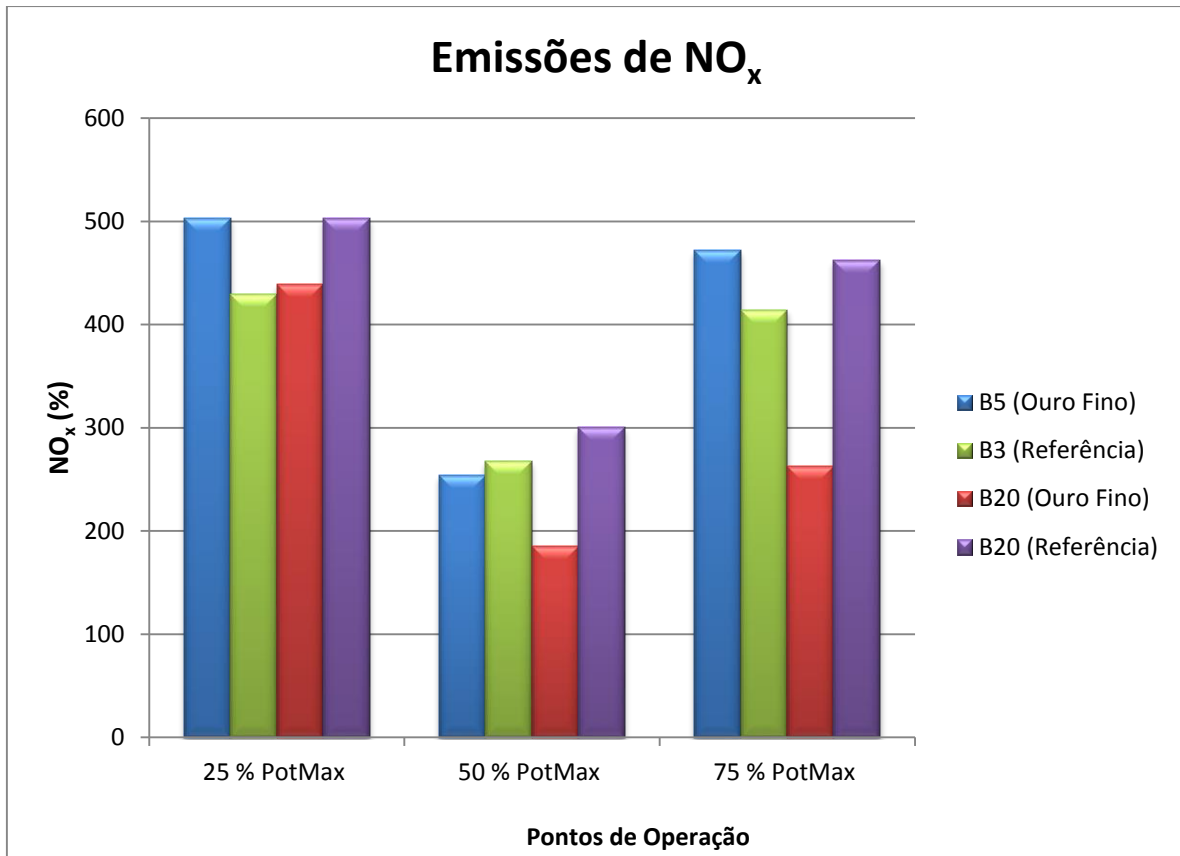


Figura 5-19 – Gráfico de Colunas Comparativo NO_x x Potência

5.8.5. Emissões de HC

O resultado das emissões de HC mostram valores maiores para o motor funcionando com o B5. Os valores de emissões de HC para o motor funcionando com B20 foram tão pequenos que ficaram abaixo da precisão do analisador de gases. Esse resultado comprovou a efetividade do biodiesel de bagaço de cana-de-açúcar como um combustível limpo.

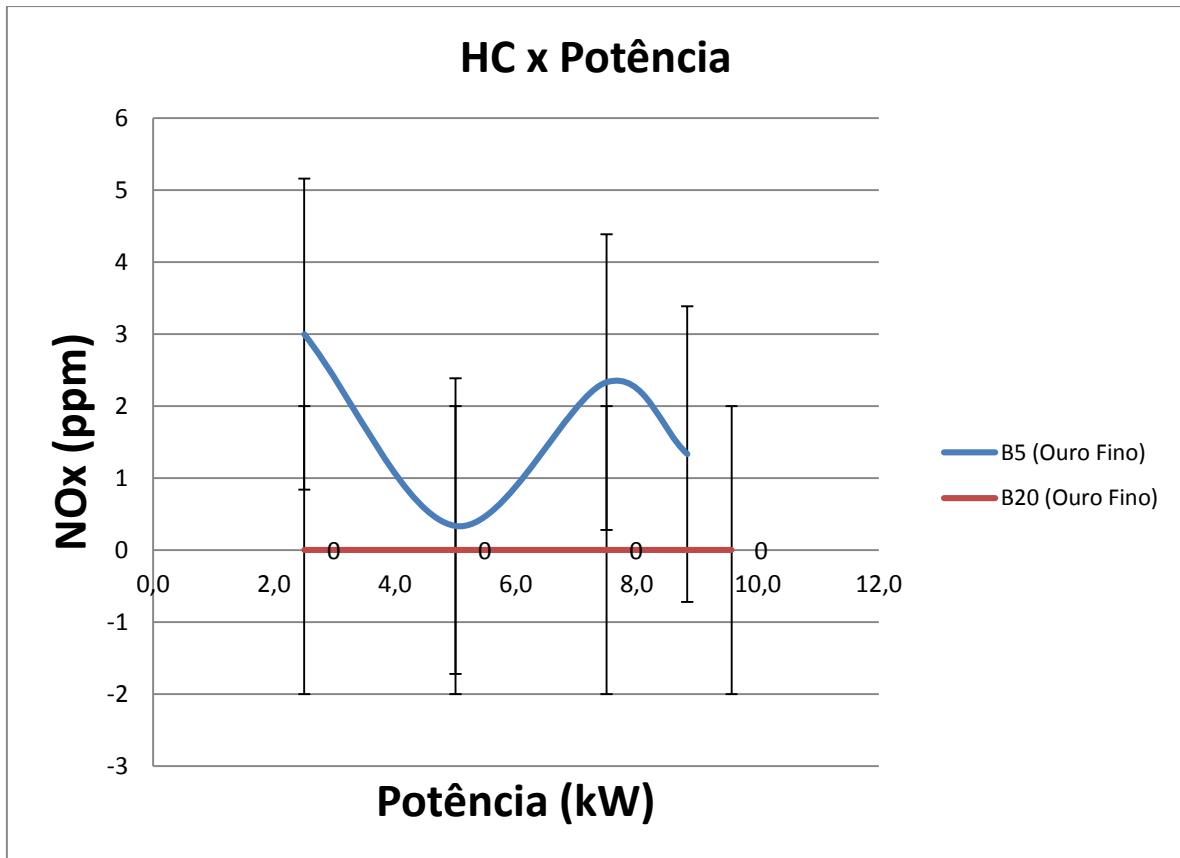


Figura 5-20 – Gráfico Comparativo HC x Potência

Os resultados quando comparados com a referência foram satisfatórios a medida que as emissões de HC do B20 ficaram sempre abaixo do B5.

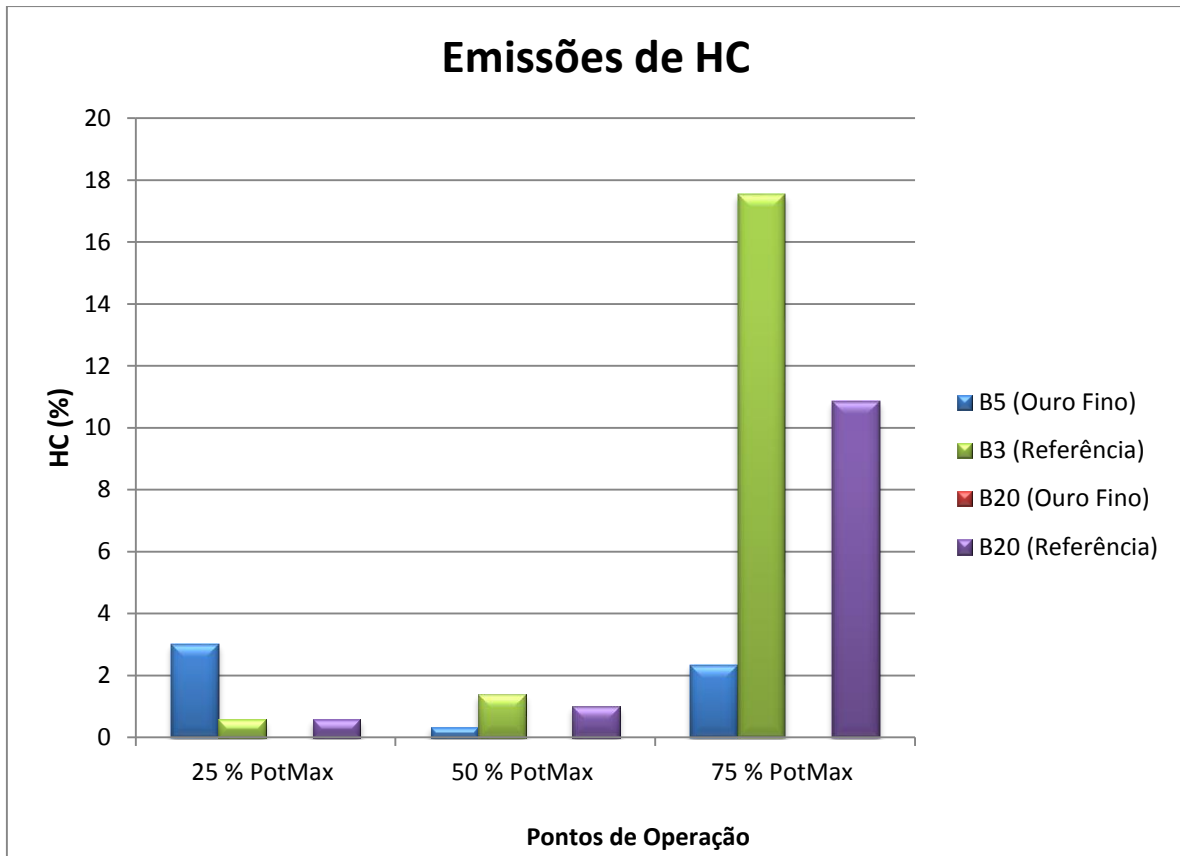


Figura 5-21 – Gráfico de Colunas Comparativo CO₂ x Potência

O comportamento de alguns gases como o CO₂, o CO e o O₂ podem ser explicados observando-se a Figura 5-22 a seguir [15]:

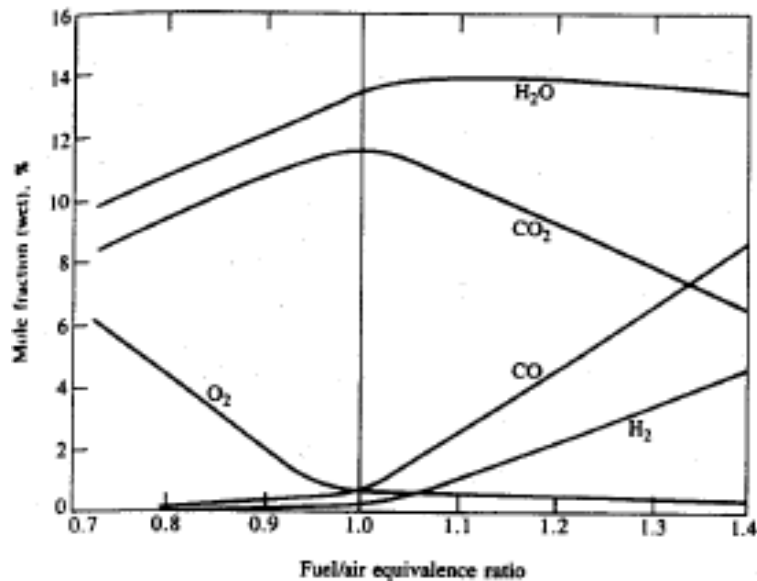


Figura 5-22 - Variação dos moles dos produtos da combustão com a relação combustível-ar

No gráfico anterior, o eixo da abscissa representa a razão de equivalência combustível-ar (ϕ), que é o inverso da relação entre as razões ar-combustível real e ar-combustível estequiométrica (λ). Para motores diesel, λ é muito maior que 1, com o motor operando com bastante excesso de ar, e para o gráfico na figura anterior, somente o lado esquerdo ao eixo das ordenadas seria aplicado aos motores diesel. O motor utilizado nos experimentos era aspirado (quantidade de ar usada por ciclo praticamente constante). Portanto, o λ foi alterado, principalmente, pela massa de combustível que era utilizada por ciclo, para os pontos variando a carga dentro de uma mesma rotação, onde maior massa de combustível utilizada no ciclo significa uma diminuição do valor de λ .

Observa-se no gráfico os aumentos de CO₂ e CO, quando λ diminui (ou ϕ aumenta), observado majoritariamente nos experimentos, para um mesmo combustível.

Quanto ao O₂, observa-se no gráfico anterior, a diminuição do mesmo quando λ diminui, sendo também observado majoritariamente nos experimentos.

Capítulo 6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

De maneira satisfatória, o objetivo proposto para este trabalho foi parcialmente alcançado.

- na utilização do biodiesel de 2ª geração na proporção de B20, observou-se que o mesmo apresenta um bom comportamento, conseguindo manter carga e rotação nos pontos de operação testados, sendo notado, devido ao seu poder calorífico mais baixo, um aumento em seu consumo

- na análise da descarga de gases, notou-se uma redução significativa dos gases de descarga nocivos ao ambiente. Os níveis de CO tiveram uma redução considerável em relação a utilização do combustível B5 quando se utilizou o B20. Ocorreu também redução para o CO₂, apesar de não ter sido observada redução significativa de O₂, utilizando B20. Os níveis de emissões de HC obtiveram reduções significativas na utilização do B20. Os níveis de NO_x também reduziram sensivelmente

- devido a algum fator externo os resultados para os pontos de operação a 25% da Potência da Nominal Máxima não representaram o esperado, mas para a análise proposta para este trabalho foi aceitável

Para trabalhos futuros, a fim de se obter a análise completa seria necessário executar um ensaio de durabilidade para que se possa estudar a projeção dos efeitos a longo prazo do biodiesel.

Capítulo 7 - Referências Bibliográficas

- [1] Rosângela Moreira de Araujo - Superintendente de Biocombustíveis e Qualidade do Produto da ANP, 2012, Biocombustíveis: Panoramas e Ações da ANP , palestra ministrada no Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica COPPE-UFRJ. Consta no site do PRH-37 <http://prh.mecanica.ufrj.br/>
- [2] GRANDO, F., 2005, A força do combustível verde. Revista do CONFEA, Brasília, v. 9, n. 22, p. 14-17.
- [3] GROTTA, D. C. C. Desempenho de um trator agrícola em operação de gradagem utilizando biodiesel etílico filtrado de óleo residual como combustível. Jaboticabal: UNESP, 2003. 44p. Dissertação Mestrado.
- [4] ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P.; COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja em frituras. Química Nova, v.23, n.4, p.531- 537, 2000.
- [5] ALI, Y.; HANNA, M. A. Durability testing of a diesel fuel, methyl tallowate and ethanol blend in a Cummins N14 410 diesel engine. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.39, n. 3 p. 793-797, 1996.
- [6] ALI, Y.; HANNA, M. A.; BORG, J. E. Effect of alternative diesel fuels on heat release curves for Cummins N 14 410 diesel engine. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.39, n. 3, p. 407-414, 1996.
- [7] BARBOSA, R. L.; SILVA, F. M. DA; SALVADOR, N. VOLPATO, C. E. S. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. Ciência e Agro tecnologia, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, set./out., 2008.
- [8] <http://www.tnsustentavel.com.br/biodiesel> (acessado em 01/02/2014)
- [9] LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C. Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. Química Nova, v.32, n.6, p. 1596-1608, 2009
- [10] <http://www.profpc.com.br> (acessado em 01/02/2014)

- [11] PAULILLO, S. C. L. Utilização da vinhaça e do bagaço de cana para a produção de biodiesel e antiespumante, visando a sustentabilidade ambiental através de um processo de biorefinaria integrada, 2013, PIPE 1 – 15
- [12] BNDES, CGEE, Bioetanol de Cana-de-açúcar – Energia para o desenvolvimento sustentável, 2008, 70-80.
- [13] KLINE, S. J., MCCLINTOCK, F. A., 1953, *Describing Uncertainties in Single Sample Experiments*, Mechanical Engineering, vol. 75.
- [14] SOUZA JUNIOR, G. C., Simulação Termodinâmica de Motores Diesel Utilizando Óleo Diesel e Biodiesel para Verificação dos Parâmetros de Desempenho e Emissões, 2009, UFRJ/COPPE, 50-100, Dissertação Graduação
- [15] HEYWOOD, J. B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 1 ed, New York, USA, McGraw-Hill.

Apêndice A - Principais Variáveis Medidas no Trabalho

Variável	Unidade	Marca/Modelo	Tipo	Faixa de Medição	I _{yL} (%)	I _{yR} (u.m.)
Potência no Dinamômetro	Kw	DINAMATIC	Dinamometro de Absorção (corrente parasita)	0-83,7	1,5	0,5
Rotação do Motor	RPM	DINAMATIC	Pick-up	0-4000	1,0	5
Torque	N.m	DINAMATIC	Dinamometro de Absorção (corrente parasita)	0-200	1,5	0,5
Temperatura dos gases de descarga	°C	OMEGA	Termopar K (Cr-Al)	0-800	1,0	0,8
Temperatura da água	°C	OMEGA	K (Cr-Al)	0-800	1,0	0,8
Massa de Combustível	g	ADVENTURI	Balança de Precisão	0-4000	0,1	0,1
Tempo	s	OHAUS	Cronômetro	0-180	1,0	1,0
Porcentagem de CO ₂ na Descarga	% em Volume	NAPRO	MMV2000	0-20	1,0	0,05

Variável	Unidade	Marca/Modelo	Tipo	Faixa de Medição	I_{yL}(%)	I_{yR}(u.m.)
Percentagem de CO na Descarga	% em Volume	NAPRO	MMV2000	0-10	1,0	0,005
Percentagem de O2 na Descarga	% em Volume	NAPRO	MMV2000	0-25	1,0	0,2
Percentagem de NOx na Descarga	ppm	NAPRO	MMV2000	0-5000	1,0	5
Percentagem de HC na Descarga	ppm	NAPRO	MMV2000	0-2000	1,0	2

Apêndice B - Tabelas dos Testes de Emissões Antes do Trato de Dados

B5	Pot. (KW) (Medições)	RPM (Medições)	Torque (Nm) (Medições)	Temperatura de Exaustão (°C) (Medições)	Temperatura da Água (°C) (Medições)	Consumo Específico (g/kWh) (Medições)
25% (2,5kW@1500RPM)	2.5	1501	16.3	231	88	300
	2.5	1498	16.1	241	89	290
	2.5	1504	16.1	242	89	290
50% (5,0kW@2000RPM)	5	2002	24.1	312	89	270
	5	2001	23.8	345	91	268
	5	2002	23.8	349	91	268
75% (7,5kW@2500RPM)	7.5	2498	28.8	434	90	274
	7.5	2501	28.6	456	90	264
	7.5	2492	28.8	457	89	273
100% (9,5kW@2800RPM)	8.9	2800	30.3	493	88	283
	8.9	2790	30.5	509	89	284
	8.7	2806	29.8	503	89	297

B5	Pot. (KW) (Medições)	CO₂ (Medições)	CO (Medições)	O₂ (Medições)	NOx (Medições)	HC (Medições)
25% (2,5kW@1500RPM)	2.5	1.8	0.02	19.6	503	3
	2.5	1.8	0.02	19.6	502	2
	2.5	1.8	0.02	19.6	506	4
50% (5,0kW@2000RPM)	5	1.1	0.02	20.6	255	1
	5	1.2	0.02	20.7	268	0
	5	1	0.02	20.9	238	0
75% (7,5kW@2500RPM)	7.5	2.7	0.09	18.5	464	2
	7.5	2.8	0.09	18.4	486	2
	7.5	2.7	0.08	18.7	465	3
100% (9,5kW@2800RPM)	8.9	3.7	0.19	17	489	1
	8.9	3.3	0.13	17.5	470	2
	8.7	3.4	0.13	17.5	477	1

B20	Pot. (KW) (Medições)	RPM (Medições)	Torque (Nm) (Medições)	Temperatura de Exaustão (°C) (Medições)	Temperatura da Água (°C) (Medições)	Consumo Específico (g/kWh) (Medições)
25% (2,5kW@1500RPM)	2.5	1498	16.3	236	84	284
	2.5	1498	16	240	88	288
	2.5	1497	16	246	89	293
50% (5,0kW@2000RPM)	5	2006	23.8	336	89	296
	5	2004	24	351	90	288
	5	2004	23.8	354	90	289
75% (7,5kW@2500RPM)	7.5	2497	28.8	439	90	278
	7.5	2498	28.8	446	90	280
	7.5	2493	28.8	447	90	280
100% (9,5kW@2800RPM)	9.5	2803	32.3	534	90	292
	9.6	2795	32.7	536	89	288
	9.6	2806	32.7	537	87	281

B20	Pot. (KW) (Medições)	CO₂ (Medições)	CO (Medições)	O₂ (Medições)	NOx (Medições)	HC
25% (2,5kW@1500RPM)	2.5	1.6	0.02	19.2	431	0
	2.5	1.6	0.02	19.1	442	0
	2.5	1.6	0.02	19.1	444	0
50% (5,0kW@2000RPM)	5	0.9	0.02	20.2	182	0
	5	0.9	0.02	20.2	187	0
	5	0.9	0.02	20.2	188	0
75% (7,5kW@2500RPM)	7.5	1.4	0.05	19.5	231	0
	7.5	1.8	0.05	19	290	0
	7.5	1.6	0.05	19.2	268	0
100% (9,5kW@2800RPM)	9.5	3.2	0.19	17	405	0
	9.6	3.5	0.21	16.6	444	0
	9.6	3.5	0.23	16.6	469	0

Apêndice C - Tabelas dos Resultados da Referência Após o Tratamento de Dados

B3 (Referência)						
Potência (kW)	Rotação (RPM)	Torque (N.m)	Tempertura de Exaustão (°C)	Temperatura da Água(°C)	Consumo (g/s)	Consumo Específico (g/kWh)
2.5	1502	15.9	270.4	91.1	0.22	314
5.0	2003	23.9	403.8	90.4	0.42	305
7.5	2495	28.7	495.5	90.8	0.67	323

B20 (Referência)						
Potência (kW)	Rotação (RPM)	Torque (N.m)	Tempertura de Exaustão (°C)	Temperatura da Água(°C)	Consumo (g/s)	Consumo Específico (g/kWh)
2.5	1502	15.9	266.4	90.6	0.21	308
5.0	2003	23.9	395.4	91.4	0.42	302
7.5	2495	28.7	490.5	93.7	0.65	314

B3 (Referência)						
Potência (kW)	Rotação (RPM)	CO2 (%)	CO (%)	O2 (%)	NOx (ppm)	HC (ppm)
2.5	1502	2.48	0.022	17.8	429	1
5.0	2003	2.49	0.128	17.4	267	1
7.5	2495	3.87	0.310	15.9	414	18

B20 (Referência)						
Potência (kW)	Rotação (RPM)	CO2 (%)	CO (%)	O2 (%)	NOx (ppm)	HC (ppm)
2.5	1502	2.32	0.033	17.6	503	1
5.0	2003	2.33	0.107	17.1	301	1
7.5	2495	3.48	0.217	15.6	462	11