



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

## ESTUDO EXPERIMENTAL DO IMPACTO DA ADIÇÃO DE BIODIESEL AO ÓLEO DIESEL MARÍTIMO

Laura Maximiano Faria

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.

Orientador: Prof. Carlos Rodrigues Pereira  
Belchior; D.Sc.

Rio de Janeiro  
Agosto de 2015

ESTUDO EXPERIMENTAL DO IMPACTO DA ADIÇÃO  
DE BIODIESEL AO ÓLEO DIESEL MARÍTIMO

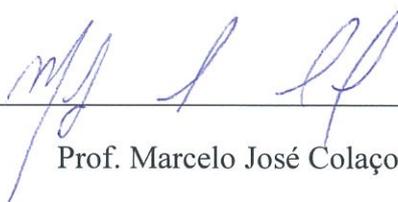
Laura Maximiano Faria

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO 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.

Aprovado por:



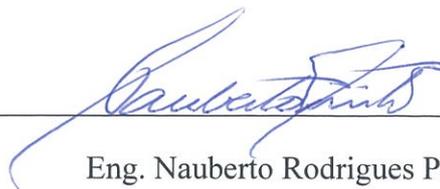
Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior, D.Sc.



Prof. Marcelo José Colaço, D.Sc



Prof. Silvio Carlos Aníbal de Almeida, D.Sc



Eng. Nauberto Rodrigues Pinto

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2015

Faria, Laura Maximiano

Estudo Experimental do Impacto da Adição de Biodiesel ao Óleo Diesel Marítimo / Laura Maximiano Faria - Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2015.

xii, 90, p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Carlos Rodrigues Pereira Belchior.

Projeto de Graduação - UFRJ / Escola Politécnica / Engenharia Mecânica, 2015.

Referências Bibliográficas: p.65-68.

1. Biodiesel. 2. Diesel Marítimo. 3. Motor Diesel. 4. Número de Cetano. 5. Emissões. 6. Consumo. I. Belchior, Carlos Rodrigues Pereira. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Engenharia Mecânica. III. Estudo Experimental do Impacto da Adição de Biodiesel ao Óleo Diesel Marítimo.

*“A persistência é o menor  
caminho do êxito.”*

Charles Chaplin

# Agradecimentos

Agradeço a minha avó, Nilce Maximiano, pela dedicação de uma vida em prol de meu bem-estar.

A todos os meus familiares mais próximos, em especial, a meu irmão Daniel Faria, pelo companheirismo de sempre, e a meus pais Angela Maximiano e Manuel Faria, por todo o apoio e por terem provido condições mais do que necessárias tanto para a minha formação profissional quanto para a formação de meu caráter.

A Gabriel Farias por ter me acompanhado nesta jornada, sempre me ajudando a passar pelas tantas dificuldades, incentivando meu crescimento e fazendo os bons momentos se tornarem ainda melhores.

Aproveito para agradecer também a meus outros colegas de curso pelas trocas e bons momentos vividos, em especial: Fabiana Hamilton, Stephan Kulina, Pedro Caetano, Rafael Antunes, Yuri Lemos e Marcelo Pasqualette. Pessoas que conseguiram transformar uma pesada rotina em saudades.

A todos com quem tive a oportunidade de conviver e aprender no Colégio Pedro II Unidade Humaitá, lugar essencial para a formação do que sou hoje e onde passei meus melhores anos. Em especial, agradeço aos professores e as amizades feitas para toda a vida: Daniele Gomes, Bianca Costa, Isabella Salgado, Patrícia Azevedo, Juliana Honorato, Cristiane Santino, Ana Paula Tomaz, Daniele Silva e Ana Beatriz Cruz.

A Subsea 7, primeira empresa a me dar a oportunidade de aprendizado, e a seus colaboradores com quem tive o privilégio de conviver e que tanto me ensinaram. Agradeço principalmente pela flexibilidade e compreensão que me foi dada, sempre priorizando os estudos e a formação universitária.

A ANP pelo apoio financeiro do programa PRH-37 e por incentivar a pesquisa em uma área tão importante como a de biocombustíveis. Agradeço também ao Professor Marcelo Colaço por conduzir este programa e pela orientação acadêmica.

Ao Laboratório de Máquinas Térmicas da UFRJ e seus funcionários, que estiveram sempre dispostos a me ajudar. Em especial, agradeço ao Professor Albino Leiróz, que viabilizou a realização do projeto me emprestando seu próprio analisador de emissões.

Ao Engenheiro Nauberto Pinto, por ter me orientado nos experimentos e se disposto a ajudar, com tanta dedicação. Sua participação foi fundamental na construção deste trabalho.

Por fim, agradeço a meu orientador, Professor Carlos Belchior, pela escolha de um tema interessante e relevante e por ter compartilhado toda a sua sabedoria e experiência, que agregaram muito a mim e a meu projeto de graduação.

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

## ESTUDO EXPERIMENTAL DO IMPACTO DA ADIÇÃO DE BIODIESEL AO ÓLEO DIESEL MARÍTIMO

Laura Maximiano Faria

Agosto/2015

Orientador: Carlos Rodrigues Pereira Belchior

Curso: Engenharia Mecânica

Este estudo almeja investigar os impactos de se inserir um teor de biodiesel em mistura com o óleo diesel marítimo. Isto é feito através de testes comparativos entre quatro amostras de combustível contendo óleo diesel marítimo unido às concentrações de 0, 5, 10 e 15%, em volume, de biodiesel, formando as amostras B0, B5, B10 e B15, respectivamente. As misturas de combustível são testadas em um motor CFR ASTM CETANO, de razão de compressão variável, para medição de seu número de cetano, consumo absoluto e emissões de  $\text{NO}_x$ , CO e  $\text{CO}_2$ . O ensaio de número de cetano é realizado para cada uma das quatro amostras, segundo o método previsto em norma ASTM D 613. As emissões são medidas por 16 vezes: cada amostra (B0, B5, B10 e B15) tem seus níveis de poluentes monitorados por um analisador de gases Testo 350XL, com o motor CFR trabalhando ajustado para quatro regulagens diferentes. O teste de consumo aproveita essas mesmas regulagens, medindo o tempo que cada amostra leva para ter 13mL consumidos. Os resultados apontaram que o aumento da concentração de biodiesel nas amostras de combustível causa elevação no número de cetano, tendência de crescimento nas emissões de  $\text{NO}_x$  e  $\text{CO}_2$ , tendência de queda nos níveis de CO e aumento no consumo das amostras. Entretanto, as amostras B0 e B5 apresentaram resultados similares para número de cetano e os consumos das quatro misturas ficaram próximos.

Palavras-chave: Biodiesel, Diesel Marítimo, Motor Diesel, Número de Cetano, Emissões, Consumo.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer.

## EXPERIMENTAL STUDY ABOUT THE IMPACT OF ADDING BIODIESEL TO MARINE DIESEL

Laura Maximiano Faria

August/2015

Advisor: Carlos Rodrigues Pereira Belchior

Course: Mechanical Engineering

This study aims to investigate the impacts of inserting a biodiesel content in marine diesel. This is done by comparative tests between four fuel samples containing marine diesel mixed with the concentrations of 0, 5, 10 and 15% of biodiesel, forming the samples B0, B5, B10 and B15, respectively. The fuel mixtures are tested in a CFR ASTM CETANE engine, to measure its cetane number, fuel consumption and NO<sub>x</sub>, CO and CO<sub>2</sub> emissions. The cetane number test is performed for each of the four samples, according to the method prescribed in ASTM D 613 standard. The emissions are measured by 16 times: each sample (B0, B5, and B15 B0) has its pollutant levels monitored by a gas analyzer Testo 350XL, while the CFR engine works in four different settings. The consumption experiment is done using these same settings. The time it takes for each sample to have 13mL of its contents consumed is measured. The results showed that increasing the concentration of biodiesel in the fuel samples causes an increase in cetane number, upward trend in NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> emissions, downward trend in CO levels and increase in the consumption of the samples. However, the B0 and B5 samples showed similar results for cetane number and the consumption of the four mixtures were close.

Keywords: Biodiesel, Marine Diesel, Diesel Engine, Cetane Number, Emissions, Consumption.

# Sumário

Lista de Figuras .....	viii
Lista de Tabelas .....	x
Lista de Símbolos e Siglas.....	xi
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação .....	2
1.2 Objetivo .....	3
1.3 Organização do trabalho .....	4
<b>2. Combustíveis .....</b>	<b>5</b>
2.1 Biodiesel .....	5
2.2 Diesel Marítimo .....	9
<b>3. Motores Diesel.....</b>	<b>12</b>
3.1 Breve histórico do motor Diesel.....	13
3.2 Razão de compressão.....	13
3.3 Processo de Combustão .....	14
3.4 Injeção .....	15
3.5 Atraso de ignição .....	15
3.6 Número de cetano .....	16
<b>4. Estado da Arte .....</b>	<b>18</b>
4.1 Armazenamento.....	18
4.2 Desempenho .....	19
4.3 Emissões .....	20
4.4 Biodiesel conforme sua origem .....	22
<b>5. Aparato Experimental.....</b>	<b>25</b>
5.1 Combustíveis utilizados.....	25
5.2 Vidraria e equipamento laboratorial .....	27
5.3 Balança analítica.....	28
5.4 Motor .....	28
5.5 Analisador de gases .....	32

<b>6. Metodologia.....</b>	<b>33</b>
6.1 Preparo das amostras .....	33
6.2 Número de Cetano .....	37
6.3 Emissões .....	42
6.4 Consumo.....	45
<b>7. Resultados e Discussão .....</b>	<b>47</b>
7.1 Número de Cetano .....	47
7.2 Emissões .....	49
7.3 Consumo.....	58
<b>8. Conclusões .....</b>	<b>62</b>
8.1 Conclusões a partir do experimento .....	62
8.2 Conclusões gerais .....	63
8.3 Sugestões para trabalhos futuros .....	64
<b>9. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>65</b>
<b>Apêndice A – Motores: aspectos gerais .....</b>	<b>69</b>
<b>Apêndice B – Certificado Biodiesel Agropalma.....</b>	<b>76</b>
<b>Apêndice C – Dados técnicos Testo 350XL .....</b>	<b>77</b>
<b>Apêndice D – Propagação de Incertezas .....</b>	<b>78</b>
<b>Apêndice E – Números de Cetano tabelados .....</b>	<b>83</b>
<b>Apêndice F – Dados do Teste Número de Cetano .....</b>	<b>84</b>
<b>Apêndice G – Dados do Teste de Emissões .....</b>	<b>86</b>
<b>Apêndice H – Dados do Teste de Consumo.....</b>	<b>90</b>

# Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Evolução do biodiesel no Brasil (Fonte: ANP) .....	2
<b>Figura 2:</b> Reação total de transesterificação (TAPANES <i>et al.</i> , 2013) .....	6
<b>Figura 3:</b> Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel (PARENTE, 2003) .....	6
<b>Figura 4:</b> Classificação dos motores térmicos.....	12
<b>Figura 5:</b> Nomenclatura para motores alternativos (ÇENGEL, 2006).....	13
<b>Figura 6:</b> Os quatro tempos em um motor alternativo Diesel (JUNIOR, 2003) .....	14
<b>Figura 7:</b> Principais matérias-primas de biodiesel (JORNAL ZERO HORA, 2015) ...	22
<b>Figura 8:</b> Agitador e vidraria utilizada .....	28
<b>Figura 9:</b> Balança analítica utilizada no experimento .....	28
<b>Figura 10:</b> Motor ASTM CFR CETANO .....	29
<b>Figura 11:</b> Esquema de funcionamento da cremalheira (BOSCH, 2000) .....	30
<b>Figura 12:</b> Micrômetro do avanço da injeção no motor CFR (ASTM, 1985).....	31
<b>Figura 13:</b> Vista em corte do volante e da câmara de combustão (ASTM, 1985) .....	31
<b>Figura 14:</b> Analisador de gases Testo 350-XL.....	32
<b>Figura 15:</b> Millipore Série Direct 8/16 System, no Laboratório GreenTec, UFRJ .....	34
<b>Figura 16:</b> Adição de água Milli-Q até a marca de 250mL.....	34
<b>Figura 17:</b> Mistura de combustíveis sendo agitada .....	37
<b>Figura 18:</b> Recipientes de armazenamento das amostras prontas .....	37
<b>Figura 19:</b> Esquema do sistema de alimentação do motor (ASTM, 1985) .....	38
<b>Figura 20:</b> Painel do motor CFR .....	38
<b>Figura 21:</b> Mostrador digital do avanço da injeção e atraso de ignição.....	40
<b>Figura 22:</b> Micrômetro que mostra a posição do volante.....	40
<b>Figura 23:</b> Curva que relaciona a posição do volante com o Número de Cetano .....	41
<b>Figura 24:</b> Sonda do analisador conectada ao duto de descarga do motor.....	44
<b>Figura 25:</b> Número de cetano para as quatro amostras de combustível .....	48
<b>Figura 26:</b> Atraso de ignição para as amostras, mantendo fixa a posição do volante...	49
<b>Figura 27:</b> Emissões de NO <sub>x</sub> com motor ajustado conforme padrão B0 ASTM.....	51
<b>Figura 28:</b> Emissões de NO <sub>x</sub> com motor ajustado conforme padrão B5 ASTM.....	51
<b>Figura 29:</b> Emissões de NO <sub>x</sub> com motor ajustado conforme padrão B10 ASTM.....	52
<b>Figura 30:</b> Emissões de NO <sub>x</sub> com motor ajustado conforme padrão B15 ASTM.....	52
<b>Figura 31:</b> Emissões de CO com motor ajustado conforme padrão B0 ASTM.....	54

<b>Figura 32:</b> Emissões de CO com motor ajustado conforme padrão B5 ASTM.....	54
<b>Figura 33:</b> Emissões de CO com motor ajustado conforme padrão B10 ASTM.....	54
<b>Figura 34:</b> Emissões de CO com motor ajustado conforme padrão B15 ASTM.....	55
<b>Figura 35:</b> Emissões de CO <sub>2</sub> com motor ajustado conforme padrão B0 ASTM.....	56
<b>Figura 36:</b> Emissões de CO <sub>2</sub> com motor ajustado conforme padrão B5 ASTM.....	57
<b>Figura 37:</b> Emissões de CO <sub>2</sub> com motor ajustado conforme padrão B10 ASTM.....	57
<b>Figura 38:</b> Emissões de CO <sub>2</sub> com motor ajustado conforme padrão B15 ASTM.....	58
<b>Figura 39:</b> Tempo levado para consumir 13mL com motor no padrão B0 ASTM.....	59
<b>Figura 40:</b> Tempo levado para consumir 13mL com motor no padrão B5 ASTM.....	59
<b>Figura 41:</b> Tempo levado para consumir 13mL com motor no padrão B10 ASTM.....	60
<b>Figura 42:</b> Tempo levado para consumir 13mL com motor no padrão B15 ASTM.....	60
<b>Figura 43:</b> Exemplos da disposição dos cilindros em motores (HEYWOOD, 1988)...	69
<b>Figura 44:</b> Possíveis configurações dos cilindros de um MCI (GUPTA, 2013).....	69
<b>Figura 45:</b> Os quatro tempos do motor rotativo Wankel (HEYWOOD, 1988).....	70
<b>Figura 46:</b> Os quatro tempos para um motor alternativo Otto (ÇENGEL, 2006).....	71
<b>Figura 47:</b> Esquema de um motor alternativo de dois tempos (ÇENGEL, 2006).....	72
<b>Figura 48:</b> Diferenças da ignição em motores Otto e Diesel (ÇENGEL, 2006).....	73
<b>Figura 49:</b> Ciclo Otto ideal (ÇENGEL, 2006).....	74
<b>Figura 50:</b> Ciclo Diesel ideal (ÇENGEL, 2006).....	74
<b>Figura 51:</b> Repetibilidade e reprodutibilidade do método (ASTM, 1985).....	81

# Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Especificação da ANP para algumas das propriedades do biodiesel .....	7
<b>Tabela 2:</b> Valores especificados pela ANP para diesel marítimo e automotivo.....	10
<b>Tabela 3:</b> Propriedades do biodiesel de diferentes origens (KNOTHE <i>et al.</i> , 2006) ....	23
<b>Tabela 4:</b> Conteúdo das amostras utilizadas no experimento.....	25
<b>Tabela 5:</b> Especificações do biodiesel utilizado no estudo .....	25
<b>Tabela 6:</b> Comparação das propriedades do biodiesel em relação aos padrões ANP ...	26
<b>Tabela 7:</b> Especificações do diesel marítimo utilizado no estudo.....	26
<b>Tabela 8:</b> Comparação das propriedades do diesel marítimo com as especificações....	27
<b>Tabela 9:</b> Detalhes do material de laboratório.....	27
<b>Tabela 10:</b> Características do motor ASTM CFR CETANO .....	29
<b>Tabela 11:</b> Conteúdo em massa e em volume das amostras.....	36
<b>Tabela 12:</b> Ajustes no motor CFR, obedecendo a norma ASTM D 613 .....	39
<b>Tabela 13:</b> Valores dos parâmetros utilizados nos testes de emissões .....	43
<b>Tabela 14:</b> Sequência dos combustíveis ensaiados .....	44
<b>Tabela 15:</b> Resultado final para os números de cetano das amostras.....	47

## Lista de Símbolos e Siglas

ANP	[-]	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	[-]	American Society for Testing and Materials
B0	[-]	Mistura de combustíveis contendo 0% de biodiesel
B5	[-]	Mistura de combustíveis contendo 5% de biodiesel
B10	[-]	Mistura de combustíveis contendo 10% de biodiesel
B15	[-]	Mistura de combustíveis contendo 15% de biodiesel
B100	[-]	Mistura de combustíveis contendo 100% de biodiesel
CFR	[-]	Cooperative Fuel Research
DP	[-]	Desvio padrão
HMN	[-]	Heptametilnonano
LMT	[-]	Laboratório de Máquinas Térmicas
m	[g]	Massa
m <sub>B</sub>	[g]	Massa de biodiesel
MB	[-]	Marinha Brasileira
m <sub>DM</sub>	[g]	Massa de diesel marítimo
m <sub>MQ</sub>	[g]	Massa de água Mili-Q
MCE	[-]	Motor de Combustão Externa
MCI	[-]	Motor de Combustão Interna
MGO	[-]	Marine Gasoil
MP	[-]	Material Particulado
n	[-]	Número de repetições de dado experimento
P	[kPa]	Pressão
PCS	[kJ/kg]	Poder Calorífico Superior
PMI	[-]	Ponto Morto Inferior
PMS	[-]	Ponto Morto Superior
r <sub>c</sub>	[-]	Razão de compressão
ResA	ppm / %	Resolução do analisador de gases
ResC	s	Resolução do cronômetro
s	[kJ/kg·K]	Entropia específica
T	[°C ou K]	Temperatura
UFRJ	[-]	Universidade Federal do Rio de Janeiro

$v$	$[m^3/kg]$	Volume específico
$V$	$[m^3]$	Volume
$V_d$	$[m^3]$	Volume deslocado
$V_o$	$[m^3]$	Volume morto
$V_p$	$[m^3]$	Volume a ser aferido na proveta
$V_T$	$[m^3]$	Volume total
$\sigma_{ac}$	[-]	Acurácia do analisador de gases para dado poluente
$\sigma_{combinada,a}$	[-]	Incerteza combinada do analisador de gases
$\sigma_{combinada,c}$	[-]	Incerteza combinada do cronômetro
$\sigma_m$	[-]	Incerteza da balança analítica
$\sigma_{V_p}$	[-]	Incerteza experimental do volume aferido na proveta
$\sigma_{tipoA}$	[-]	Incerteza associada ao desvio padrão
$\sigma_{res,a}$	[-]	Incerteza associada à resolução do analisador de gases
$\sigma_{res,c}$	[-]	Incerteza associada à resolução do cronômetro
$\sigma_{\rho_{0MQ}}$	[-]	Incerteza nominal da massa específica da água Milli-Q
$\sigma_{\rho_B}$	[-]	Incerteza experimental da massa específica do biodiesel
$\sigma_{\rho_{DM}}$	[-]	Incerteza experimental da massa específica do diesel marítimo
$\sigma_{\rho_{MQ}}$	[-]	Incerteza experimental da massa específica da água Milli-Q
$\rho_{0MQ}$	$[g/mL]$	Massa específica nominal da água Milli-Q
$\rho_B$	$[g/mL]$	Massa específica do biodiesel
$\rho_{DM}$	$[g/mL]$	Massa específica do diesel marítimo
$\rho_{MQ}$	$[g/mL]$	Massa específica calculada da água Milli-Q

# 1. Introdução

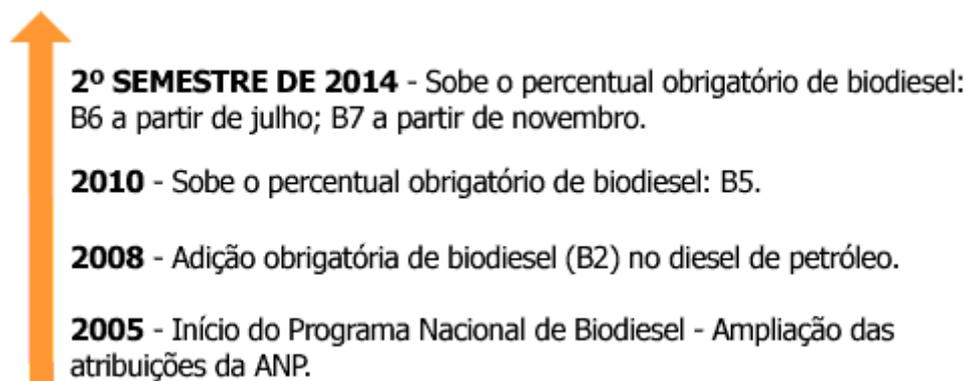
O desenvolvimento econômico mundial, bem como o crescimento populacional, vem sempre acompanhado de aumento de demanda energética. Isso faz com que o consumo de combustíveis se intensifique, especialmente os de origem fóssil, que são os mais amplamente utilizados ao redor do mundo. No entanto, estes combustíveis não são renováveis e, visto que as reservas comercialmente exploráveis crescem a taxas menores que a demanda de petróleo, isto se torna ainda mais crítico, pois sabe-se que a fonte irá se esgotar (RATHMANN *et al.*, 2005). Fica evidente a necessidade de se trabalhar com combustíveis alternativos e renováveis, para diversificar a matriz energética brasileira de forma sustentável.

Comparando-se com o resto do mundo, o Brasil é pioneiro no uso de biocombustíveis, possuindo matriz energética mais limpa do que muitos países mais desenvolvidos, porém com menos recursos naturais. Aproximadamente 45% da energia e 18% dos combustíveis consumidos no Brasil são renováveis. No mundo, cerca de 86% da energia tem origem fóssil (ANP, 2015). Em 2014, a produção brasileira de biodiesel foi a segunda maior do mundo, com a marca de 3,4 bilhões de litros. Apenas os Estados Unidos atingiram marca maior, com 4,8 bilhões de litros. Mesmo assim, ainda há muito que percorrer para a excelência e total aproveitamento do potencial bioenergético. Ainda em 2014, a capacidade produtiva de biodiesel foi de 7,74 bilhões de litros, porém houve 56% de ociosidade (JORNAL ZERO HORA, 2015). Se toda essa capacidade mal utilizada fosse colocada em operação, milhares de empregos poderiam ser gerados.

A inserção do biodiesel na matriz energética traz vantagens sociais, como: geração de empregos e desenvolvimento regional, sobretudo em áreas agrícolas, que em geral são as mais prejudicadas pela pobreza. A cultura de oleaginosas, que podem ser utilizadas na fabricação de biodiesel, fornece uma nova opção de mercado a pequenos agricultores, que atualmente acabam ficando restritos ao setor alimentício. Há também as vantagens ecológicas, amplamente comentadas nos dias de hoje. Afinal, são crescentes a preocupação com o ambiente e as tentativas de se reduzir ao máximo o impacto humano sobre ele (RATHMANN *et al.*, 2005).

Reflexo da preocupação com todas essas questões é o histórico do biodiesel no Brasil, ilustrado na Figura 1. Desde a inserção do biocombustível na matriz energética nacional, percebem-se ações reguladoras que visam aumentar o seu consumo em

detrimento de combustíveis fósseis. Aproveita-se do fato do biodiesel ser análogo ao diesel derivado de petróleo para utilizá-lo como um aditivo no abastecimento de motores, obtendo vantagens, como: emissões menos poluentes, redução do consumo e da demanda de diesel e maior lubrificidade. Na Figura 1, é possível perceber que a princípio não se praticava a mistura de biocombustíveis ao diesel. Contudo, hoje a concentração da adição obrigatória de biodiesel já passou pelos valores de 2, 5, 6 e agora se encontra em 7% em volume, evidenciando uma tendência que deve ser seguida para todos os combustíveis fósseis.



**Figura 1:** Evolução do biodiesel no Brasil (Fonte: ANP)

## 1.1 Motivação

O óleo diesel disponível nos postos de combustíveis, atualmente, já recebe uma porcentagem de 7% de biodiesel em volume (essa mistura é denominada B7). Porém, o mesmo não ocorre com o óleo diesel marítimo, que é comercializado puro em bases específicas para combustíveis de uso naval.

A adição de biodiesel ao diesel marítimo pode ser vista como estratégica. Além de induzir vantagens ecológicas, como uma combustão mais limpa e o incentivo ao plantio, reduz a dependência de combustíveis derivados de petróleo, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável.

Levando em consideração essas questões, existe interesse da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e da Marinha Brasileira que o tema seja estudado, pois a adição de biodiesel pode se tornar uma tendência também no segmento naval. Assim sendo, a Marinha Brasileira visa se preparar para atender a essa eventual regulamentação. Por sua vez, a ANP precisa embasar uma possível mudança da resolução atual em estudos, comprovando a viabilidade e conhecendo os riscos de se trabalhar com a mistura de biodiesel e diesel marítimo.

A necessidade de estudos reside no fato de que apesar das vantagens estratégicas e ecológicas de se trabalhar com a mistura, existem também as desvantagens. Afinal, o biodiesel tem suas particularidades, que exigem cuidados específicos em relação a transporte, armazenamento, contaminação e integridade do motor, por exemplo, e muitas destas questões se tornam mais críticas trabalhando no mar ou em vias fluviais.

Portanto, é necessário conhecimento sobre o tema, que virá da realização de pesquisas e testes experimentais, para apurar a viabilidade técnica de se adicionar biodiesel ao diesel marítimo.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é estudar a influência de se inserir um teor de biodiesel ao diesel marítimo, em variadas porcentagens volumétricas. As implicações de se trabalhar com essa mistura de combustíveis são investigadas através de três testes: número de cetano, emissões e consumo. Cada um dos testes se concentra na observação de uma determinada propriedade ou característica dos combustíveis, trabalhando em um único motor, para efeito de comparação.

As combinações entre o biodiesel e o diesel marítimo são feitas em quatro amostras distintas, nas proporções B0, B5, B10 e B15. A amostra B0 consiste em diesel marítimo puro. As demais amostras possuem 5, 10 e 15%, em volume, de biodiesel em mistura, respectivamente.

O primeiro ensaio visa comparar o desempenho das amostras quanto à qualidade de ignição. São obtidos os valores de número de cetano para cada uma das quatro misturas de combustível, através do método previsto na norma ASTM D 613 e com a utilização de um motor ASTM CFR CETANO. O objetivo é observar se o acréscimo de biodiesel ao diesel marítimo causa aumento ou redução do número de cetano da mistura.

No segundo ensaio, são medidas as emissões de  $\text{NO}_x$ , CO e  $\text{CO}_2$ , para cada uma das quatro amostras, mantendo fixa a regulação do motor ASTM CFR CETANO. Depois, é repetido o teste para mais três regulações distintas de motor, a título de comparação. O objetivo é verificar tendências de aumento ou redução dos níveis de emissão de poluentes com o acréscimo de biodiesel em mistura.

No terceiro e último ensaio, a comparação será feita a partir do consumo absoluto que cada amostra apresentou enquanto rodando nos mesmos padrões utilizados nos testes de emissões. A finalidade é comparar e concluir se o aumento do teor de

biodiesel nas amostras faz com que elas sejam consumidas mais rápido ou mais devagar.

### **1.3 Organização do trabalho**

Nesta seção, o conteúdo de cada um dos capítulos do trabalho é brevemente descrito. O texto é composto por nove capítulos: o primeiro, referente à introdução do tema e mais oito subsequentes.

O segundo capítulo trata de informar sobre os dois combustíveis utilizados no estudo: biodiesel e diesel marítimo. São fornecidas informações básicas sobre os combustíveis, tais como: formas de obtenção, principais características e propriedades.

No terceiro capítulo alguns aspectos importantes e característicos de um motor Diesel são explorados. Tais aspectos são importantes para aprofundar o conhecimento, são eles: razão de compressão, atraso de ignição, processo de combustão diesel, injeção e número de cetano.

No quarto capítulo, faz-se uma revisão bibliográfica de trabalhos similares, nos quais também havia o objetivo de testar amostras contendo biodiesel misturado a outros combustíveis, especialmente os marítimos. Além disso, também são comentadas as questões referentes ao armazenamento dos combustíveis e as diferentes origens do biodiesel.

O quinto capítulo destina-se a apresentar e descrever brevemente o aparato experimental utilizado nos testes. No caso do motor CFR, são fornecidas instruções de como variar os seus parâmetros de funcionamento.

O sexto capítulo tem por objetivo explicar toda a metodologia utilizada para o preparo das quatro amostras de combustível testadas (B0, B5, B10 e B15) e para a realização dos ensaios de número de cetano, emissões e consumo absoluto, bem como o tratamento de dados praticado.

No sétimo capítulo estão expostos os resultados obtidos nos três ensaios e os comentários feitos a partir deles.

O oitavo capítulo apresenta as conclusões que puderam ser tiradas com base no estudo e sugestões para trabalhos futuros, incentivando o desenvolvimento do tema.

Por fim, o nono e último capítulo traz as referências consultadas para a construção do texto.

## 2. Combustíveis

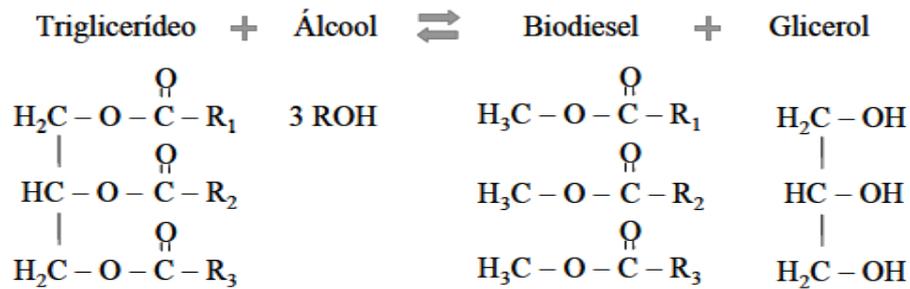
Para melhor análise e entendimento dos resultados experimentais, é fundamental conhecer os combustíveis que serão colocados em teste. Suas características e propriedades específicas tem influência na forma como eles trabalham e, certamente, isto se reflete nos resultados das medições experimentais. Por isso, são brevemente comentados os combustíveis presentes neste estudo e suas características principais.

### 2.1 Biodiesel

O biodiesel é um combustível alternativo, biodegradável, de origem renovável, que funciona bem em motores de combustão interna que trabalham com ciclo Diesel, também chamados motores de ignição por compressão. O biocombustível vem ganhando espaço, seja para ser utilizado puro (B100) ou, principalmente, para utilização como um aditivo, misturado a outro combustível. A adição de biodiesel, sobretudo ao óleo diesel fóssil, pode ocorrer em várias porcentagens, trazendo benefícios ecológicos, como emissões mais limpas (PARENTE, 2003).

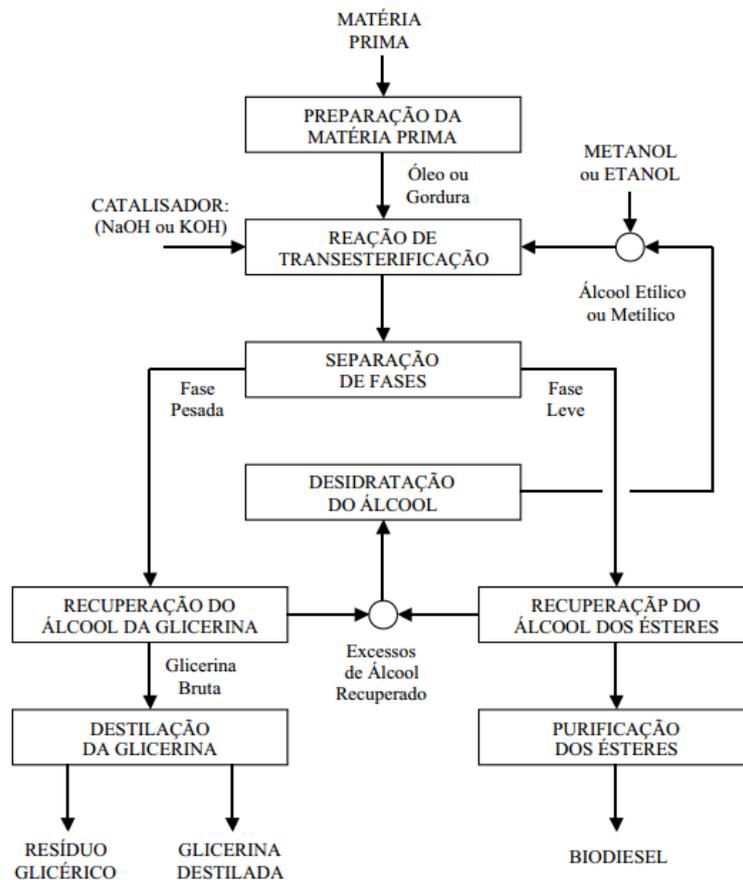
A obtenção de biodiesel se dá através do processo de transesterificação de um óleo vegetal, óleos e gorduras residuais ou de gordura animal. As possíveis origens vegetais para sua fabricação são as mais variadas, incluindo: soja, algodão, mamona, babaçu, palma, canola, milho, dendê e outras oleaginosas, ou até mesmo algas. O custo do óleo extraído do vegetal que serve como matéria-prima é determinante no preço do biodiesel e na sua competitividade em relação aos combustíveis fósseis (VOLPATO *et al.*, 2009).

A transesterificação, por definição, é uma reação onde um éster reage na presença de um catalisador – que pode ser um ácido ou uma base – resultando em um novo éster. A reação é relativamente simples, barata e pode ocorrer a pressão ambiente (TAPANES *et al.*, 2013). A Figura 2 exemplifica a reação de transesterificação total para o biodiesel.



**Figura 2:** Reação total de transesterificação (TAPANES *et al.*, 2013)

No caso da produção de biodiesel, um álcool de cadeia curta – usualmente metanol ou etanol – é utilizado para dissolver o éster reagente, representado pelos triglicerídeos presentes no óleo vegetal, ou gordura animal. Exemplos de catalisadores usados nessa reação são os hidróxidos de sódio ou potássio, que são compostos básicos. Como produtos, são obtidos o biodiesel e a glicerina. Quimicamente, pode-se dizer que o diesel vegetal é um éster metílico ou etílico de ácidos graxos, dependendo do álcool que lhe deu origem. Já a glicerina é um álcool que possui valor agregado, pois pode ser utilizada na fabricação de cosméticos e produtos de limpeza (PARENTE, 2003). Pode-se observar na Figura 3 um esquema das etapas necessárias à de produção de biodiesel, incluindo a transesterificação.



**Figura 3:** Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel (PARENTE, 2003)

O biodiesel tem propriedades fluido e termodinâmicas muito parecidas com as de seu equivalente derivado de petróleo, o que é excelente, pelo fato de que ambos podem ser utilizados em motores similares, sem que haja necessidade de adaptações (PARENTE, 2003). Em todo caso, existem algumas divergências entre os combustíveis.

O diesel vegetal possui poder calorífico menor, porém próximo, ao do diesel mineral. A diferença média é de 5%. Por outro lado, possui uma queima mais completa – por conta do oxigênio presente em sua composição – resultando em um consumo específico equivalente ao do diesel (VOLPATO *et al.*, 2009).

O número de cetano do biodiesel costuma apresentar valores mais elevados do que os do óleo diesel convencional. Por esta razão, o combustível renovável pode queimar melhor, em motores de ignição por compressão, do que o próprio diesel. Porém, esta é uma propriedade que depende do insumo do qual é fabricado o biocombustível. Afinal, é possível encontrar diferentes cetanagens para diferentes tipos de óleo vegetal (KNOTHE *et al.*, 2006).

O biodiesel também possui boas propriedades de lubricidade, que é o poder de lubrificação que um fluido pode exercer. Esta característica depende de outras propriedades, como tensão superficial e viscosidade. No caso de motores de ignição por compressão, esta é uma propriedade desejável por ajudar na lubrificação dos componentes do sistema de combustível do motor, mais especificamente bicos e bombas injetoras rotativas, aumentando assim a vida útil (PARENTE, 2003). A Tabela 1, construída a partir da regulamentação da ANP para biodiesel em (BRASIL, 2014), apresenta especificações de importantes propriedades.

**Tabela 1:** Especificação da ANP para algumas das propriedades do biodiesel

Propriedade	Limite	Unidade
Massa específica a 20° C	850 a 900	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade cinemática a 40°C	3,0 a 6,0	mm <sup>2</sup> /s
Teor de água, máx.	200,0	mg/kg
Contaminação total, máx.	24	mg/kg
Ponto de fulgor, mín.	100	°C
Cinzas sulfatadas, máx.	0,020	% massa
Enxofre total, máx.	10	% massa
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	14	°C
Índice de acidez, máx.	0,50	mg KOH/g
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.	8	h

Segundo (PARENTE, 2003), se a composição do biodiesel for livre de metanol ou etanol, seu ponto de fulgor será superior à temperatura ambiente, o que quer dizer que ele não é inflamável em suas condições normais de transporte, armazenamento, manuseio e possibilita inclusive a sua utilização em embarcações. Ao observar a Tabela 1, nota-se que o ponto de fulgor do biodiesel apresenta o limite mínimo de 100°C, fazendo sentido com a afirmação em (PARENTE, 2003).

Ainda segundo as especificações da Tabela 1, o limite de enxofre total máximo é de 10mg/kg. Uma das maiores vantagens do biodiesel, em relação ao seu análogo fóssil, é que a quantidade de enxofre nele presente é bem menor, o que o torna um combustível muito menos poluente (PARENTE, 2003).

A estabilidade à oxidação é o intervalo de tempo no qual a substância consegue resistir à oxidação, mantendo inalteradas as suas propriedades físico-químicas, como: acidez, massa específica, viscosidade, teor de ésteres e índice de peróxido. Esta característica é importante nos combustíveis pois, em muitos casos, eles ficam armazenados por longos períodos de tempo e a perda de suas propriedades originais pode ocasionar queda na performance do motor (KNOTHE *et al.*, 2006). Observa-se na Tabela 1 que o intervalo de tempo mínimo especificado para a estabilidade à oxidação é de 8h, a 110°C, que é uma temperatura superior à de armazenamento.

Não é difícil perceber que existem vantagens imediatas na utilização de biodiesel misturado ao óleo diesel marítimo, como garantir maior lubrificação de componentes do sistema de combustível do motor e uma queima mais limpa, devido a seu baixo teor de enxofre. Além disso, a semelhança de suas propriedades com as do diesel convencional levam à vantagem de permitir seu uso em motores de combustão interna e caldeiras convencionais sem que haja a necessidade de grandes modificações (BOZBAS, 2005).

Existem, porém, os pontos críticos. Entre eles, está o fato do ambiente marítimo favorecer a absorção de água por parte do biodiesel – que tem afinidade com a essa substância, por sua natureza higroscópica – resultando em problemas de contaminação e proliferação de micro-organismos. Também há a possibilidade de formação de borra e entupimento dos bicos injetores e a degradação do combustível, em casos de armazenamento por longo período de tempo, o que é bem comum para combustíveis marítimos (PARENTE, 2003).

## 2.2 Diesel Marítimo

O diesel marítimo é um tipo de combustível fóssil, obtido a partir do refino de petróleo, com aplicação para embarcações. Os combustíveis utilizados em navios podem ser classificados em categorias, de acordo com o composto, extraído durante o refino, que lhes origina. Uma dessas categorias de classificação é aquela dos combustíveis residuais, óleos combustíveis marítimos ou bunker (MF), que são compostos produzidos a partir de formulações contendo frações mais pesadas da destilação. Outra categoria é a dos combustíveis produzidos a partir de frações mais leves do processo de refino, chamados de diesel marítimo, DMA ou marine gasoil (MGO) (ANP, 2013).

As classes de óleos bunker ou MF se distinguem de acordo com a sua viscosidade cinemática a 50°C, variando do MF 10 até o MF 700. Os tipos de óleo combustível marítimo também variam de acordo com a massa específica, resíduos de carbono, teor de cinzas e teor de água ou de determinados compostos químicos, presentes em sua composição. O teor de enxofre, que é um dos principais poluentes contidos nesse tipo de combustível, tem indicações de valores limite, visando minimizar o potencial poluente do fluido. A ANP indica um teor de 3,5% para os óleos residuais, ou heavy fuel oil, denominados bunker (ANP, 2013).

Neste trabalho, as atenções serão voltadas para o diesel marítimo, também denominado MGO ou DMA, por ser o combustível utilizado nos testes. Por ser originário de frações mais leves do processo de destilação, também apresenta diferentes especificações em relação ao bunker. Sua massa específica e viscosidade cinemática são menores que as do MF 10. Quanto ao teor de enxofre, a ANP especifica 0,5% para os destilados (ANP, 2013).

As aplicações desses combustíveis estão ligadas ao abastecimento de motores navais que trabalham com ciclo Diesel. Para embarcações de grande porte, os óleos combustíveis marítimos são utilizados em motores principais, sistemas de propulsão e nos sistemas auxiliares de geração de energia. Em embarcações de médio e pequeno porte, o óleo diesel é utilizado em motores principais, de propulsão, e auxiliares (ANP, 2013).

Os requisitos de qualidade do diesel marítimo são semelhantes aos do diesel com aplicação automotiva, porém, existem diferenças. O marítimo pode ser usado em motores de maiores potências e menores rotações, além de ter menos exigência de

qualidade da combustão, o que é avaliado pelo número de cetano. Dessa forma, o número de cetano para o diesel marítimo pode apresentar valores menores do que aqueles especificados para o diesel convencional (ANP, 2013). Entretanto, o combustível marítimo requer um ponto de fulgor maior, pois seu armazenamento em ambientes mais confinados, dentro de tanques em navios, exige este requisito de segurança. O ponto de fulgor representa a temperatura na qual o líquido se torna inflamável, na presença de uma faísca, o que se torna mais crítico pelas condições de uso no mar (ANP, 2013).

A Tabela 2 traz alguns dados obtidos nas especificações da ANP em (BRASIL, 2010) e (BRASIL, 2013). Ela expõe os valores especificados para importantes propriedades do diesel marítimo e do diesel automotivo, para fins de comparação.

**Tabela 2:** Valores especificados pela ANP para diesel marítimo e automotivo

Propriedade	Diesel Marítimo		Diesel Automotivo		Unidade
	DMA	DMB	S10	S500	
Água, máx.	-	0,30	-	0,05	% volume
Cinzas, máx.	0,010		0,010		% massa
Enxofre total, máx.	0,5		$1,0 \times 10^{-5}$	-	% massa
Lubricidade, máx.	520		460 a 520		$\mu\text{m}$
Massa específica a 20°C, máx.	876,8	896,8	815,0 a 850,0	815,0 a 865,0	$\text{kg/m}^3$
Número de cetano, mín.	40	35	48	42	-
Ponto de fulgor, mín.	60		38		°C
Resíduo de carbono no resíduo dos 10% finais de destilação, máx.	0,30	-	0,25		% massa
Teor de biodiesel	0		7		% volume
Viscosidade cinemática a 40°C	2,0 a 6,0	2,0 a 11,0	2,0 a 4,5	2,0 a 5,0	$\text{mm}^2/\text{s}$

Segundo a definição em (BRASIL, 2010), o diesel marítimo A ou DMA, citado na Tabela 2, é definido como combustível destilado médio, para uso aquaviário. De forma semelhante, o diesel marítimo B ou DMB é definido como combustível composto majoritariamente por destilados médios, podendo conter pequenas quantidades de óleos de processo do refino, também para uso aquaviário.

Analogamente, o diesel de aplicação automotiva possui suas classificações regulamentadas pela ANP, de acordo com (BRASIL, 2013). Os números 10 e 500 que acompanham a letra “S”, designando o tipo de diesel automotivo, representam o teor máximo de enxofre contido no combustível, em mg/kg. Logo, o diesel S10 possui teor máximo de enxofre de 10mg/kg e o diesel S500 possui teor máximo de enxofre de 500mg/kg.

Pode-se observar, na Tabela 2, que algumas propriedades não variam muito entre os dois tipos de combustível, como teor de máximo de cinzas, resíduo de carbono máximo e viscosidade cinemática (excluindo o DMB).

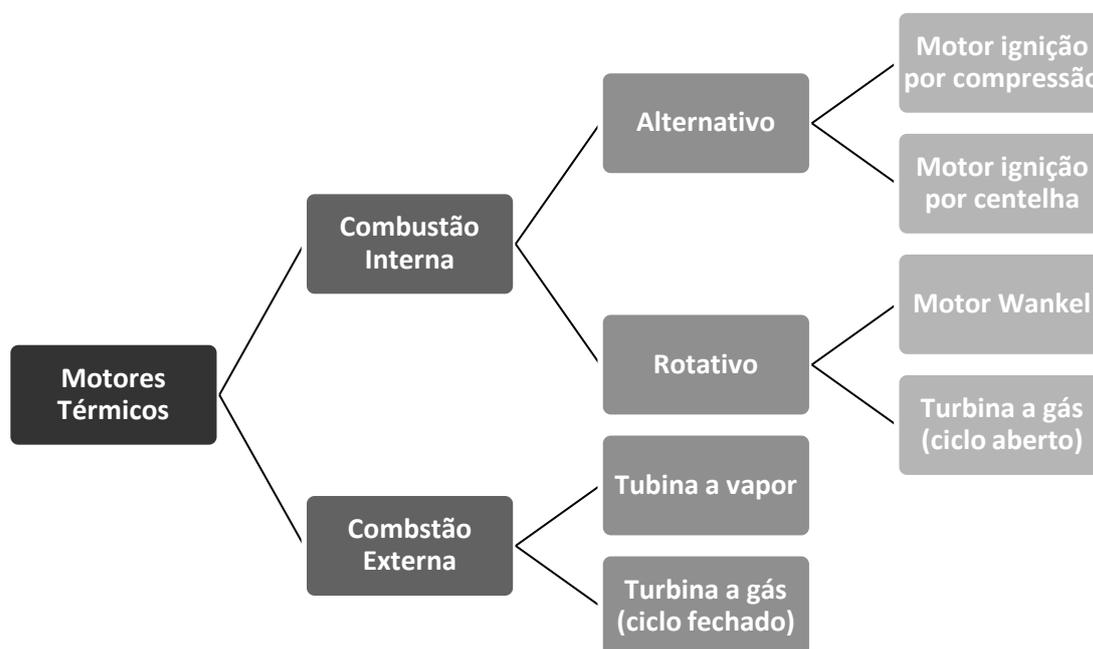
A Tabela 2 também confirma os comentários anteriores de que o diesel marítimo teria maior ponto de fulgor, para segurança de armazenamento, e que o seu número de cetano poderia assumir valores menores do que aqueles observados para o diesel automotivo. Para o caso de se adicionar 7% de biodiesel ao óleo marítimo, poderia ser conseguida uma elevação do número de cetano da mistura resultante, pelo fato da maioria das espécies de biodiesel, dependendo de sua matéria prima de origem, possuir número de cetano mais elevado que o diesel mineral (KNOTHE *et al.*, 2006).

É válido ressaltar que o diesel marítimo possui um teor de água bem mais alto que o automotivo. Esta característica pode ser um problema no caso de se adicionar 7% de biodiesel, pois este combustível renovável é higroscópico. Isto significa que ele possui afinidade com a água e tende a absorvê-la do ar. Isto é ainda mais crítico considerando sua utilização em um ambiente úmido como o mar. A água no combustível pode causar diversos problemas, como reduzir seu poder calorífico. Ela deve ser eliminada em máquinas purificadoras, denominadas centrífugas, pois pode corroer partes metálicas do motor (ANP, 2013).

Se presente em grande quantidade, a água possibilita a formação de emulsões, que ocasionam problemas na nebulização do produto e de corrosão, especialmente nos casos em que o teor de enxofre é elevado (ANP, 2013). Nota-se que o teor de enxofre do diesel marítimo é mais elevado que o do diesel automotivo, o que o torna muito mais poluente. A concentração de enxofre poderia ter seus níveis reduzidos pela adição de 7% de biodiesel, afinal, por não ter origem no petróleo, o biocombustível não apresenta enxofre em sua composição (VALENTE, 2007). Além disso, por suas propriedades de lubrificação, o biodiesel ajuda a corrigir o enxofre do diesel, atuando como um aditivo de lubricidade. Na Tabela 2, observa-se que o diesel marítimo possui maiores lubricidade e massa específica do que as do convencional.

### 3. Motores Diesel

Motores capazes de converter energia térmica em trabalho mecânico são chamados motores térmicos. Esse tipo de motor pode ser subdividido em dois grandes grupos, dentro dos quais há algumas classificações, afinal, existem variadas concepções de motor. Tais grupos englobam os motores a combustão externa (MCE) e os motores a combustão interna (MCI) (JUNIOR, 2003). A Figura 4 mostra esquematicamente algumas subdivisões dentro do universo dos motores térmicos.



**Figura 4:** Classificação dos motores térmicos

As máquinas e as turbinas a vapor são exemplos de motores a combustão externa. Neste grupo, é necessário vaporizar o fluido que será usado para a propulsão do dispositivo que transformará a energia térmica em mecânica. Assim, o combustível precisa ser queimado em uma caldeira, por exemplo, para vaporizar um líquido permitindo assim que sua energia possa ser aproveitada. Já o motor a combustão interna admite e queima o combustível em seu interior e ele mesmo faz a conversão da energia térmica para energia mecânica (JUNIOR, 2003).

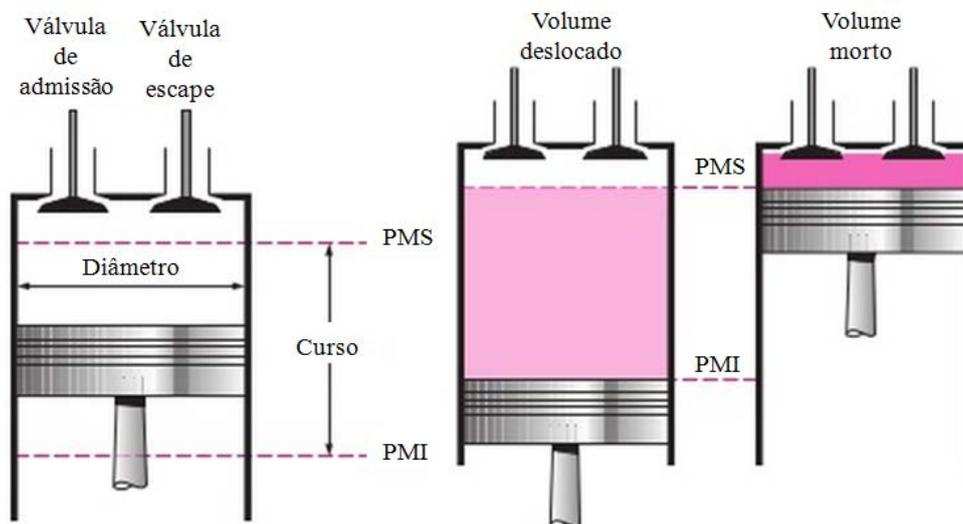
Neste trabalho, a atenção será voltada aos motores a combustão interna, de movimento alternativo e que operam com ciclo Diesel, cujas características serão detalhadas neste capítulo, afinal, o motor utilizado nos ensaios é de ignição por compressão. No entanto, são apresentados, e brevemente comentados, alguns aspectos de motores a combustão interna em geral no Apêndice A – Motores: aspectos gerais.

### 3.1 Breve histórico do motor Diesel

Em 1892, o engenheiro alemão Rudolf Diesel lançou sua patente com um novo conceito de MCI. Sua ideia consistia em iniciar a combustão através de injeção de combustível em ar aquecido exclusivamente por compressão. Sua invenção permitiu maiores eficiências, razões de compressão e ausência de detonação (HEYWOOD, 1988).

### 3.2 Razão de compressão

O curso por onde o pistão caminha no interior do cilindro é limitado por dois pontos. São esses os locais onde o pistão descansa de seu movimento alternativo, ou seja, onde ele começa a inverter o seu movimento. O chamado PMS (ponto morto superior) é o local onde o pistão para seu movimento ascendente e começa a descer. É também o local onde o volume do cilindro é mínimo. O PMI (ponto morto inferior) é onde o pistão para seu movimento descendente e volta a subir. Neste ponto, o volume do cilindro é máximo (HEYWOOD, 1988). A Figura 5 mostra um pistão, típico de motores alternativos, e sua nomenclatura.



**Figura 5:** Nomenclatura para motores alternativos (ÇENGEL, 2006)

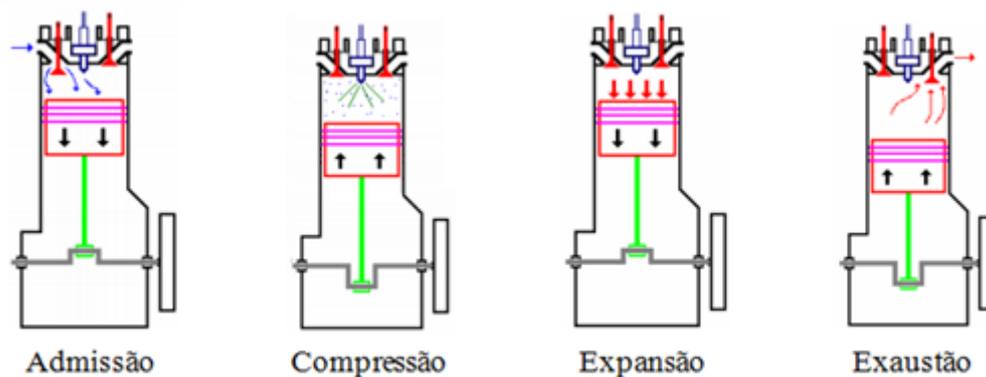
O volume mínimo contido em um cilindro, quando o pistão se encontra no PMS, é chamado de volume morto ( $V_0$ ). A diferença entre o volume total do cilindro ( $V_T$ ) e o volume morto recebe o nome de volume deslocado ( $V_d$ ). Assim, define-se a razão de compressão ( $r_c$ ), como a relação entre o volume máximo e mínimo formados no cilindro, conforme a equação 1 (HEYWOOD, 1988):

$$r_c = \frac{V_{\text{máx}}}{V_{\text{mín}}} = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} = \frac{V_d + V_0}{V_0} \quad (1)$$

Valores típicos de razão de compressão ficam entre 8 e 12, para motores de ignição por centelha, e entre 12 e 24, para motores de ignição por compressão (HEYWOOD, 1988).

### 3.3 Processo de Combustão

Na Figura 6, pode-se observar os quatro tempos para um motor de ignição por compressão. Eles acontecem de forma similar a de um motor a gasolina, porém, algumas diferenças precisam ser ressaltadas.



**Figura 6:** Os quatro tempos em um motor alternativo Diesel (JUNIOR, 2003)

Os quatro tempos para um motor de ignição por compressão podem ser detalhados da seguinte forma (HEYWOOD, 1988):

- **Admissão:** começa com o pistão localizado no PMS e termina com ele no PMI. Durante esta etapa, a válvula de admissão se abre e apenas ar é admitido.
- **Compressão:** após a chegada do pistão ao PMI, ele volta a subir e a válvula de admissão se encontra fechada. Assim, o ar presente no cilindro passa a ser comprimido, experimentando aumento de pressão e de temperatura, acima da temperatura de autoignição. O combustível é injetado, ao final da compressão e pouco antes do momento desejado para o início da combustão. Essa injeção acontece em alta pressão e alta velocidade, para que o combustível passe pelos pequenos orifícios do bico injetor atomizando-se em pequenas gotículas e penetrando a câmara de combustão, ao encontro do ar quente. Isto facilita sua vaporização e mistura com o ar.

- **Expansão:** como o ar possui pressão e temperatura acima do ponto de ignição do combustível, acontece a combustão espontânea das parcelas já misturadas, após um atraso de alguns graus no giro do virabrequim (atraso de ignição). Isso faz com que o pistão seja novamente empurrado em direção ao PMI. A injeção continua até que seja atingida a quantidade desejada de combustível na câmara. A mistura do ar remanescente no cilindro com os gases queimados e não queimados continua até que acabe o tempo da expansão.
- **Exaustão:** partindo novamente do PMI, o pistão sobe, empurrando os gases resultantes da combustão para o exterior do cilindro, através da válvula de exaustão.

### 3.4 Injeção

Os motores Diesel podem ser separados em duas categorias básicas de acordo com o projeto de sua câmara de combustão, a saber: motores de injeção direta e motores de injeção indireta. Os motores de injeção direta possuem uma única câmara de combustão aberta, onde o combustível é injetado diretamente. Eles costumam ser de médio e grande porte. Já os de injeção indireta tem sua câmara de combustão dividida em duas regiões que são conectadas entre si: a pré-câmara e a câmara principal. Nesses motores, em geral de pequeno porte, a injeção de combustível acontece na pré-câmara (HEYWOOD, 1988).

Um dos maiores problemas de um motor Diesel é conseguir uma mistura suficientemente rápida entre ar e combustível para completar a combustão em um ângulo adequado e próximo do PMS. Este problema pode ser melhorado através da utilização de um sistema de injeção indireta. O redemoinho formado na pré-câmara (swirl) facilita a mistura do ar com o combustível (HEYWOOD, 1988).

### 3.5 Atraso de ignição

O atraso de ignição de um motor Diesel é definido como o intervalo de tempo, ou ângulo do virabrequim, entre o início da injeção e o início da combustão. A injeção costuma começar quando a agulha injetora levanta, entretanto, o início da combustão é mais difícil de precisar (HEYWOOD, 1988).

O fenômeno do atraso se deve ao fato de que antes da energia química contida no combustível ser liberada, há um intervalo de tempo necessário para o acontecimento

de uma série de processos físicos e químicos que antecedem a combustão. Alguns exemplos são a atomização, vaporização e mistura de combustível com o ar, além do tempo da pré-combustão. Estes processos tem influência do projeto do motor, características do combustível e variáveis operacionais. Por exemplo, uma boa atomização requer injeção à alta pressão, orifícios pequenos no bico injetor e viscosidade adequada do combustível (HEYWOOD, 1988).

Estão entre alguns dos fatores físicos que afetam o atraso de ignição: avanço de injeção, carga do motor, taxa de injeção, temperatura e pressão do ar de admissão, velocidade do motor, efeitos da parede da câmara de combustão e concentração de oxigênio (HEYWOOD, 1988).

### **3.6 Número de cetano**

A qualidade da ignição de um combustível que trabalha em ciclo Diesel é caracterizada por seu número de cetano. Este número é adimensional e análogo ao número de octano, que descreve a qualidade para a gasolina.

A escala de números de cetano é definida em termos de misturas de dois hidrocarbonetos de referência. O topo da escala, correspondente ao valor de 100, é representada pelo cetano ou n-hexadecano ( $C_{16}H_{34}$ ), um hidrocarboneto de alta qualidade de ignição. De forma similar, a base da escala é ocupada pelo heptametilnonano (HMN), com baixa qualidade ignitora, correspondendo ao valor de 15 (HEYWOOD, 1988). Assim, o número de cetano é dado pela equação 2 (HEYWOOD, 1988):

$$NC = \%(cetano) + 0,15 \times \%(HMN) \quad (2)$$

Como esses combustíveis padrão não são muito acessíveis, os ensaios para determinação do número de cetano foram realizados tomando como referência os padrões secundários U-15 e T-22, que devidamente misturados permitiram a definição da curva do motor. Assim, o número de cetano foi obtido por uma correlação entre essa curva e as posições do volante com o motor CFR trabalhando em acordo com o método ASTM.

Para se medir o número de cetano de determinado combustível, é necessário aparato específico para tal. O método e o equipamento utilizados são descritos pela norma ASTM D 613. Como nem sempre existe acesso a esses recursos, o índice de

cetano também pode ser utilizado. Este índice é um valor calculado a partir de correlações desenvolvidas com base em propriedades físicas dos combustíveis diesel, de modo a estimar a qualidade da ignição sem a necessidade de testes experimentais (HEYWOOD, 1988).

Nos motores de ignição por compressão, a qualidade da combustão está diretamente relacionada com o atraso de ignição. Por isso, quanto mais elevado é o número de cetano de um combustível, menor o seu atraso de ignição. Isso ocorre porque um atraso longo causa acúmulo de combustível não queimado na câmara, que em dado momento acaba entrando em autoignição de forma mais abrupta, provocando aumento brusco de pressão e temperatura, vibrações e ruídos característicos de batida diesel (HEYWOOD, 1988). Como o biodiesel costuma apresentar número de cetano mais elevado do que o óleo diesel marítimo, é de se esperar que haja redução no atraso de ignição ao se adicionar o biocombustível em mistura com óleo marítimo.

## 4. Estado da Arte

### 4.1 Armazenamento

O biodiesel é um combustível que demanda cuidados especiais ao longo de toda a sua cadeia de abastecimento, para não comprometer a sua integridade e alterar as suas propriedades, resultando em deficiências em seu uso para combustão.

As recomendações em (ANP, 2010), referem-se a orientações e procedimentos para o manejo do chamado óleo diesel B, que é a mistura de óleo diesel comercial com biodiesel, ou seja, a mistura atualmente utilizada para o abastecimento de automóveis. Embora o alvo deste estudo seja o diesel marítimo, conhecer os cuidados no manejo do óleo diesel B ajuda a entender as questões envolvidas no caso da mistura de biodiesel e diesel marítimo. Afinal, ambas as misturas contém biodiesel e o óleo diesel comercial possui propriedades semelhantes a sua versão para uso naval, o que resulta em praticamente os mesmos cuidados para armazenamento.

Segundo (ANP, 2010), é fundamental que seja atendida a norma ABNT NBR 15.512, que orienta em relação a requisitos e procedimentos de armazenamento, transporte, controle de qualidade, entre outros fatores, do biodiesel ou de sua mistura com o óleo diesel. As normas são essenciais para que seja garantida a qualidade do combustível, minimizado o risco de contaminação por impurezas. Além disso, a ANP também possui a especificação do biodiesel que deve ser usado para uma mistura segura.

O tempo de armazenagem do biodiesel, em mistura, não deve ser muito longo, preferencialmente inferior a 30 dias, para que não haja perda das propriedades e formação de partículas insolúveis, que podem causar problemas como o entupimento de bicos injetores ou outras partes do motor. Os tanques devem ser limpos, secos protegidos de luz e de altas temperaturas, para evitar oxidação e incorporação de contaminantes, que também pode ocorrer com a exposição da mistura à substâncias incompatíveis, como certos elastômeros e metais. Devem ser evitados, tanto no transporte como no armazenamento, materiais à base de cobre, chumbo, titânio, zinco, aços revestidos, bronze e latões. Deve-se observar as resinas que compõem as tintas, antes de utilizá-las no revestimento interno dos tanques de armazenamento, pois o biodiesel possui alto poder de solvência, o que significa que ele consegue dissolver

alguns compostos presentes nelas (PARENTE, 2003). Por outro lado, há compatibilidade do biodiesel com aço carbono, aço inoxidável e alumínio.

Para minimizar o risco de oxidação dentro do tanque de armazenamento, deve-se andar com o máximo de volume permitido preenchido, para que não haja espaço para o ar e seu contato com o combustível seja reduzido. Além disso, deve-se verificar periodicamente se existe formação de ferrugem. É importante que se faça a constante renovação do conteúdo armazenado para evitar acúmulo de combustível envelhecido (ANP, 2010).

O biodiesel é um combustível com a característica de higroscopicidade, isto é, ele possui afinidade, alta capacidade de absorver a umidade. A presença de água livre pode gerar vários problemas como contaminação por micróbios e fungos, resultando em entupimento de filtros e corrosão dos componentes do motor. Por isso, deve-se tomar o cuidado de checar se o sistema de armazenamento se encontra realmente seco, não só antes de colocar o combustível em contato com ele, mas também periodicamente, durante o armazenamento (ANP, 2010).

Em relação aos pontos de névoa e de fluidez, como já comentado, não é necessária grande preocupação durante a logística do combustível, pois as faixas de temperatura em toda a extensão do território brasileiro não oferecem riscos (PARENTE, 2003).

## **4.2 Desempenho**

Em experimentos, a análise do desempenho de um motor geralmente é baseada em medições de seu torque e potência, em determinada rotação, de seu consumo e de sua eficiência.

Em (KALLIGEROS *et al.*, 2003), os testes foram realizados em um motor modelo AV1-LAB, abastecido com diesel marítimo puro e misturas contendo 10%, 20% e 50% de biodiesel de duas origens distintas: óleo de girassol e de óleo de oliva. Como resultados, KALLIGEROS *et al.* (2003) encontraram que o uso de biodiesel em mistura ao óleo diesel marítimo faz com que o consumo de combustível do motor experimente um leve aumento.

Outro trabalho que abordou o desempenho de um motor abastecido com biodiesel foi (VOLPATO *et al.*, 2009). Procurou-se avaliar a potência efetiva e reduzida, o torque, o consumo específico e energético de combustível e as eficiências

termomecânica e volumétrica. Para isto, foi feita a comparação com o motor trabalhando em seis níveis de rotação distintos (650, 570, 490, 410, 320 e 240 rpm) e abastecido com óleo diesel comercial e biodiesel de soja (B100). Os resultados encontrados apontaram que, no geral, o desempenho do biodiesel de soja foi suficiente para que seja viável a sua utilização em um motor diesel. O torque e a potência reduzida operando com B100 foram menores do que com diesel, sendo o torque 10,7% menor. A potência reduzida do combustível fóssil foi 6,1% maior que a do biodiesel, na rotação de trabalho. Em relação ao consumo específico e energético, o biodiesel obteve melhor resultado que o diesel, sendo o seu consumo 14,66% menor em 540rpm de rotação.

Em (GÖKALP *et al.*, 2009) foi realizado um experimento em um motor de injeção direta, quatro cilindros e quatro tempos, originalmente projetado para trabalhar com diesel. Foram medidas as eficiências térmica e mecânica e o motor foi testado, inicialmente, com diesel, combustível marítimo e biodiesel de soja puros. Depois, o biodiesel foi misturado em proporções de 5%, 20% e 50% tanto ao diesel quanto ao combustível marítimo. A velocidade do motor foi variada de 1200 a 2400rpm, enquanto o motor trabalhava em plena carga. O resultado encontrado foi que a adição de biodiesel aumentou a eficiência térmica do motor: a maior eficiência foi encontrada com B100 e a menor com diesel e combustível marítimo, utilizados puros.

SOUZA (2011) procurou avaliar o desempenho de um motor diesel abastecido com biodiesel puro e misturado ao óleo diesel marítimo, em proporções de 5%, 10%, 20%, 40% e 60%. Em relação à potência, as misturas de biodiesel de SOUZA (2011) ofereceram melhor desempenho na rotação em torno de 2500rpm, tendo a mistura B5 o valor mais alto: 91,4kW. A mais baixa potência foi obtida com o diesel marítimo: 85,5kW para a mesma rotação. No caso dos torques, a diferença entre o diesel fóssil e as misturas não foi muito significativa em torno da rotação de 370Nm. Porém, em relação ao consumo, o diesel marítimo apresentou os melhores resultados: 20,8 kg/h a 1500rpm.

### **4.3 Emissões**

As emissões representam tudo que é gerado na forma de produto após a reação de combustão. Alguns dos gases emitidos são altamente nocivos ao ambiente e aos seres vivos, como é o caso do enxofre, cuja emissão pode acabar resultando em chuva ácida. Portanto, este é um fator importante, que merece ser destacado.

Uma das vantagens do biodiesel sobre o óleo diesel marítimo é que ele possui baixo teor de enxofre em sua composição química, resultando em menor emissão de material particulado e de SO<sub>2</sub>. Em função da concentração de enxofre, as emissões de material particulado podem aumentar ou diminuir. Quando um combustível possui enxofre em sua formulação, ele pode formar sulfatos que são absorvidos nas partículas de fuligem, aumentando as emissões de material particulado (MP) durante a queima. Além disso, por possuir oxigênio em sua fórmula, o biodiesel apresenta uma queima mais completa, resultando em menores emissões de monóxido de carbono e material particulado (KALLIGEROS *et al.*, 2003).

O experimento realizado por KALLIGEROS *et al.* (2003), cuja descrição e os resultados para desempenho já foram citados no item 4.2, também apresentou testes para as emissões. Foram tomadas medidas que incluíam HC, CO, NO<sub>x</sub> e MP e as observações foram feitas variando-se as cargas até 5 HP. O motor foi abastecido com diesel marítimo puro e misturas contendo 10%, 20% e 50% de biodiesel de duas origens distintas: óleo de girassol e de óleo de oliva. Na análise dos produtos de combustão, KALLIGEROS *et al.* (2003) encontraram emissões de NO<sub>x</sub> reduzidas em todos os casos em que houve a adição de biodiesel, independente da origem (girassol ou oliva). A explicação dada para este fato é que o número de cetano do biodiesel é mais elevado do que o do diesel, e isto é geralmente associado à menores emissões de NO<sub>x</sub>. O teor encontrado de hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono (CO) também diminui com a adição dos dois tipos de biocombustível.

Em (GÖKALP *et al.*, 2009), além da avaliação de desempenho descrita no item 4.2, também foram medidas as emissões de CO, CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. Lembrando que o motor foi abastecido inicialmente com diesel convencional, combustível marítimo e biodiesel de soja puros e, posteriormente, com 5%, 20% e 50% de biodiesel misturado tanto ao diesel quanto ao combustível marítimo. Além de melhor desempenho, nos casos em que o biodiesel foi adicionado as emissões foram melhores, se comparadas ao caso do diesel convencional puro. Foram detectadas menores emissões de CO e maiores emissões de CO<sub>2</sub> e de NO<sub>x</sub>, contrapondo o experimento de KALLIGEROS *et al.* (2003), que notou redução nas emissões de NO<sub>x</sub>. Assim, concluiu-se em (GÖKALP *et al.*, 2009) que o biodiesel é uma ótima opção para a redução das emissões, sobretudo em se tratando de motores diesel projetados para trabalhar com combustível marítimo.

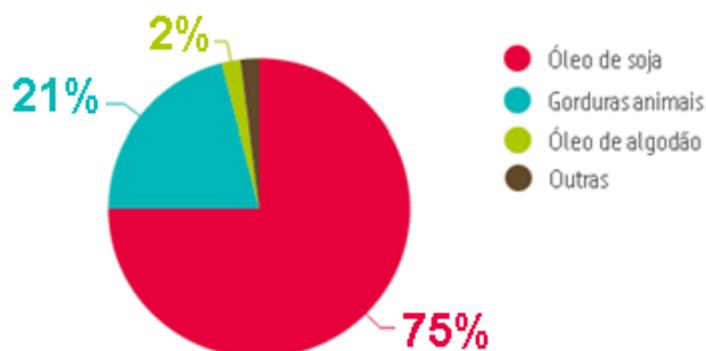
GELSON *et al.*, (2010) desenvolveram um simulador de motores baseado em uma formulação termodinâmica que simula as etapas de compressão, combustão e

expansão de motores diesel de injeção direta. Apresentaram também, em seu trabalho, como objetivo secundário, os resultados da medição dos gases de descarga da bancada utilizada para validar o simulador. Tal bancada era constituída por um motor diesel, de quatro tempos, com um cilindro vertical e injeção direta. Os combustíveis utilizados nos testes foram B3, B10, B20, B50 e B100. As medidas foram tomadas para as rotações de 1500, 2000 e 2500rpm, com o motor trabalhando a 25, 50 e 75% da carga máxima. Foram obtidos os resultados de redução nos níveis de monóxido de carbono (CO) e aumento dos níveis de NO<sub>x</sub>, com o aumento do teor de biodiesel nos combustíveis. Do B3 ao B100, a redução de CO foi de cerca de 67% e o aumento de NO<sub>x</sub> foi de 65%.

Em (LIN *et al.* 2009) foram analisadas as emissões para biodiesel oriundo de óleo de peixe, de óleo de frituras reutilizado e de diesel ASTM N<sup>o</sup> 2D. Os resultados obtidos mostraram que o biodiesel de óleo de peixe emitiu mais NO<sub>x</sub> e O<sub>2</sub> e menos CO, comparando com o biodiesel de óleo utilizado em fritura. Porém, comparando com o diesel ASTM N<sup>o</sup> 2D, tanto o biodiesel de peixe quanto o de óleo de fritura apresentaram menores níveis de CO. Mais detalhes sobre esse experimento encontram-se a seguir, na seção 4.4.

#### 4.4 Biodiesel conforme sua origem

O biodiesel pode ser obtido através da gordura animal, óleos e gorduras residuais e das mais diversas fontes de óleo vegetal, como: soja, canola, milho, mamona, palma, babaçu, algodão e outras oleaginosas. O sebo bovino, os óleos de peixes, o óleo de mocotó e a banha de porco são alguns exemplos de possíveis origens animais. A Figura 7 mostra as principais matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel. Um tópico importante a ser discutido é até que ponto a origem do biodiesel influi em suas propriedades finais.



**Figura 7:** Principais matérias-primas de biodiesel (JORNAL ZERO HORA, 2015)

PARENTE (2003) comenta as diferenças nas propriedades do biodiesel de acordo com sua matéria-prima. As propriedades fluidodinâmicas do biodiesel são semelhantes às do diesel mineral, independentemente de sua origem. Além disso, as propriedades físicas e químicas do biodiesel são próximas, não importando a matéria-prima e nem o agente de transesterificação, se etanol ou metanol, os quais foram utilizados em sua fabricação. Contudo, o ponto de névoa e o ponto de fluidez são propriedades que variam com o insumo que originou o biodiesel e com o álcool utilizado na reação de transesterificação (PARENTE, 2003).

Uma exceção a essa afirmação, é o biodiesel oriundo do óleo de mamona, no que diz respeito à viscosidade cinemática e a lubrificidade, que costumam apresentar maior valor em comparação com o combustível oriundo de outros vegetais. Contudo, misturado ao óleo diesel mineral, o biodiesel de mamona consegue corrigir a diferença na viscosidade (PARENTE, 2003). Isso pode ser percebido na Tabela 3, baseada em dados de (KNOTHE *et al.*, 2006), que expõe algumas propriedades de biodiesel proveniente de diferentes insumos. As características particulares da mamona fazem com que ela possua aplicação mais nobre que a fabricação de biodiesel, como a produção de lubrificantes aeronáuticos. Por consequência, ela é menos utilizada na produção do biocombustível em comparação com os outros insumos.

**Tabela 3:** Propriedades do biodiesel de diferentes origens (KNOTHE *et al.*, 2006)

<b>Insumo</b>	<b>Número de Cetano</b>	<b>Poder Calorífico Superior (kJ/kg)</b>	<b>Viscosidade Cinemática (40°C; mm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Ponto de Fluidez (°C)</b>	<b>Ponto de Névoa (°C)</b>
<b>Palma (etílico)</b>	56,2	39,070	4,5	6,0	8
<b>Algodão (etílico)</b>	51,2	-	6,8 (21°C)	-4	-
<b>Mamona</b>	-	-	13,8	-	-
<b>Soja (etílico)</b>	49,6	37,372	4,2	-3,9	-1,1
<b>Colza (etílico)</b>	47,9	39,870	4,8	-9,0	-3,0
<b>Girassol (etílico)</b>	54,0	38,100	4,8	-3,0	0
<b>Sebo bovino</b>	61,8	37,531	5,0	12,8	15,6
<b>Diesel 2D</b>	47	45,343	2,7	-33	-15

Os valores expostos na Tabela 3, estão coerentes com o que se afirma em (PARENTE, 2003). Observa-se também que o número de cetano apresenta variações de acordo com a matéria-prima utilizada. É válido ressaltar que o biodiesel oriundo do óleo de palma, mesmo caso do utilizado neste trabalho, apresenta um dos mais altos números de cetano da tabela. Com o valor de 56,2, o número de cetano para o biodiesel de palma é bem mais elevado do que os valores mínimos especificados para o diesel marítimo, que são de 40, para o DMA e de 35, para o DMB.

Na parte experimental, KALLIGEROS *et al.* (2003) obtiveram em seus resultados que, tanto em consumo quanto em emissões, as misturas contendo biodiesel oriundo de óleo de girassol e de oliva forneceram resultados similares e, em geral, positivos. Os resultados foram considerados melhores do que quando trabalhando com diesel fóssil. O experimento em (KALLIGEROS *et al.*, 2003) está mais bem detalhado no item 4.2.

Uma questão pertinente é que, em muitos lugares do planeta, não existem terras agricultáveis suficientes para a produção de alimentos e, ao mesmo tempo, de oleaginosas que poderiam ser usadas na fabricação de biodiesel. É também delicado deixar de produzir alimentos para voltar a produção para a indústria energética. Por isso, existe a preocupação com a busca de novas possibilidades de matéria-prima para o biodiesel, que não necessitem de terras para serem obtidas, como no caso do reuso de óleo de cozinha, após as frituras, como fonte de triglicerídeos para a reação de transesterificação.

Levados por essa motivação, LIN *et al.* (2009) realizaram um experimento utilizando as partes descartáveis de espécies de peixes misturadas. O óleo extraído dos restos de peixe foi refinado através de uma série de processos de pré-tratamento e, em seguida, transformado em biodiesel pelo processo de transesterificação. O combustível de óleo de peixes foi testado em um motor para avaliação e comparação de seu desempenho com relação ao do biodiesel de óleo de cozinha reutilizado e do diesel ASTM N<sup>o</sup> 2D. Alguns dos resultados em (LIN *et al.*, 2009) apontaram que o biodiesel de óleo de peixe possui maior temperatura dos gases de exaustão, número de cetano e emissões de NO<sub>x</sub> e O<sub>2</sub>, comparando com o biodiesel de óleo utilizado em fritura. Por outro lado, ele possui menor taxa de consumo específico de combustível e emissão de CO. Já comparando com o diesel ASTM N<sup>o</sup> 2D, o biodiesel de ambas as origens obteve menor número de cetano, temperatura dos gases de exaustão e emissões de CO e maior taxa de consumo.

## 5. Aparato Experimental

Neste capítulo, será descrito o aparato experimental utilizado nos ensaios de número de cetano, emissões e consumo absoluto. Todos estes três experimentos foram executados nas dependências do Laboratório de Máquinas Térmicas, localizado no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O material utilizado é próprio do laboratório.

### 5.1 Combustíveis utilizados

Os combustíveis utilizados neste estudo são biodiesel e diesel marítimo, combinados em quatro diferentes formulações. Cada uma delas representa uma mistura entre os dois combustíveis com teores variados de biodiesel. A Tabela 4 mostra a composição das quatro amostras. Na denominação das misturas (B0, B5, B10 e B15), o número que acompanha a letra B corresponde à porcentagem em volume de biodiesel contida nela.

**Tabela 4:** Conteúdo das amostras utilizadas no experimento

Amostra	Teor de Biodiesel (% volume)	Teor de Diesel Marítimo (% volume)	Volume total da amostra (L)
B0	0	100	3
B5	5	95	3
B10	10	90	3
B15	15	85	3

#### 5.1.1 Biodiesel

O biodiesel utilizado em mistura é B100, oriundo do óleo de palma. Ele foi produzido pelo Grupo Agropalma, produtor de óleos vegetais e derivados, da região amazônica brasileira. A Tabela 5 resume as especificações do biodiesel utilizado no estudo, retiradas do certificado de ensaio feito pelo Centro de Pesquisas e Caracterização de Petróleo e Combustíveis - COPPEComb. O certificado encontra-se no Apêndice B – Certificado Biodiesel Agropalma.

**Tabela 5:** Especificações do biodiesel utilizado no estudo

Característica	Valor	Unidade
Viscosidade Cinemática a 40°C	4,551	mm <sup>2</sup> /s
Índice de Acidez	0,71	mgKOH/g
Estabilidade Oxidativa a 110°C	5,94	h

Com o intuito de comparar as propriedades contidas na Tabela 5, referentes ao biodiesel utilizado no estudo, com os limites especificados pela ANP em (BRASIL, 2014), é construída a Tabela 6.

**Tabela 6:** Comparação das propriedades do biodiesel em relação aos padrões ANP

<b>Característica</b>	<b>Especificação ANP</b>	<b>Biodiesel Agropalma</b>	<b>Unidade</b>
<b>Viscosidade Cinemática a 40°C</b>	3,0 a 6,0	4,551	mm <sup>2</sup> /s
<b>Índice de Acidez</b>	0,50 (máx.)	0,71	mgKOH/g
<b>Estabilidade Oxidativa a 110°C</b>	8 (mín.)	5,94	h

Nota-se que a viscosidade cinemática encontra-se dentro dos padrões exigidos ( $3 < 4,551 < 6$ )mm<sup>2</sup>/s. Entretanto, algumas das outras propriedades não se encontram exatamente dentro dos limites. A estabilidade oxidativa é de 5,94 horas, quando o mínimo deveria ser de 8 horas, e o índice de acidez é de 0,71mgKOH/g, quando o máximo especificado é 0,5mgKOH/g. Contudo, por conta de limitações financeiras, optou-se por usar este lote de biodiesel, apesar das não conformidades. Além disso, por se tratarem de testes de curta duração, o índice de acidez não foi considerado alto o suficiente para danificar o motor utilizado nos ensaios.

### 5.1.2 Diesel Marítimo

O diesel marítimo utilizado no estudo foi fornecido pela Petrobras Distribuidora S.A. Na Tabela 7 estão contidas informações do boletim de conformidade de uma amostra do combustível.

**Tabela 7:** Especificações do diesel marítimo utilizado no estudo

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Aspecto visual</b>	Límpido, sem impurezas	-
<b>Cor ASTM</b>	1	-
<b>Destilação 85%</b>	349	°C
<b>Destilação 50%</b>	297	°C
<b>Massa específica a 20/4°C</b>	859,6	kg/m <sup>3</sup>
<b>Ponto de Fulgor PM</b>	83	°C
<b>Viscosidade Cinemática a 40°C</b>	5,2	mm <sup>2</sup> /s

De forma semelhante à aplicada ao biodiesel, a Tabela 8 mostra as propriedades do diesel utilizado no estudo paralelamente as especificações da ANP em (BRASIL, 2013), para comparação.

**Tabela 8:** Comparação das propriedades do diesel marítimo com as especificações

Característica	Especificações ANP		Diesel Marítimo Petrobrás	Unidade
	DMA	DMB		
Massa específica a 20/4°C (máx)	876,8	896,8	859,6	kg/m <sup>3</sup>
Ponto de Fulgor PM (mín.)	60		83	°C
Viscosidade Cinemática a 40°C	2,0 a 6,0	2,0 a 11,0	5,2	mm <sup>2</sup> /s

Em relação às especificações da ANP, pode-se notar que todos os valores atendem aos limites estabelecidos. O ponto de fulgor tem o valor de 83°C, que é maior que o mínimo de 60°C. A viscosidade cinemática também está de acordo, tanto para a faixa do DMA, quanto do DMB, que variam de 2 a 6mm<sup>2</sup>/s e de 2 a 11mm<sup>2</sup>/s, respectivamente. De forma semelhante, a massa específica, com o valor de 859,6kg/m<sup>3</sup> também está dentro dos limites do DMA e DMB, que são de 876,8kg/m<sup>3</sup> e 896,8kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

## 5.2 Vidraria e equipamento laboratorial

Para o preparo das amostras de combustível, foram necessários quatro recipientes graduados, um funil e um agitador. Detalhes sobre eles encontram-se na Tabela 9. A imagem dos instrumentos pode ser vista na Figura 8.

**Tabela 9:** Detalhes do material de laboratório

Instrumento	Capacidade	Resolução
Béquer de plástico	4000mL	250mL
Béquer de vidro	3000mL	250mL
Proveta maior	250,0mL	2mL
Proveta menor	50,0mL	1mL
Funil de plástico	-	-
Agitador	-	-



**Figura 8:** Agitador e vidraria utilizada

### 5.3 Balança analítica

A balança analítica utilizada (Figura 9) possui como principais características:

- Capacidade máxima: até 4000g
- Resolução: 0,1g
- Marca: Ohaus Adventurer



**Figura 9:** Balança analítica utilizada no experimento

### 5.4 Motor

É utilizado um motor ASTM CFR CETANO, modelo F-5, fabricado em 1973. Seu fabricante é a companhia americana Waukesha Motor. A Figura 10 traz uma foto do motor CFR, no Laboratório de Máquinas Térmicas, onde ele fica localizado e onde foram realizados os ensaios.



**Figura 10:** Motor ASTM CFR CETANO

No motor CFR, não é possível variar a rotação, que fica fixa ao valor de 900rpm. Isto acontece, pois sua rotação é controlada por um motor elétrico síncrono, que dá a partida no CFR e depois absorve a potência por ele gerada, fazendo com que ele consiga se manter a rotação constante. A Tabela 10 traz características construtivas e da geometria do motor.

**Tabela 10:** Características do motor ASTM CFR CETANO

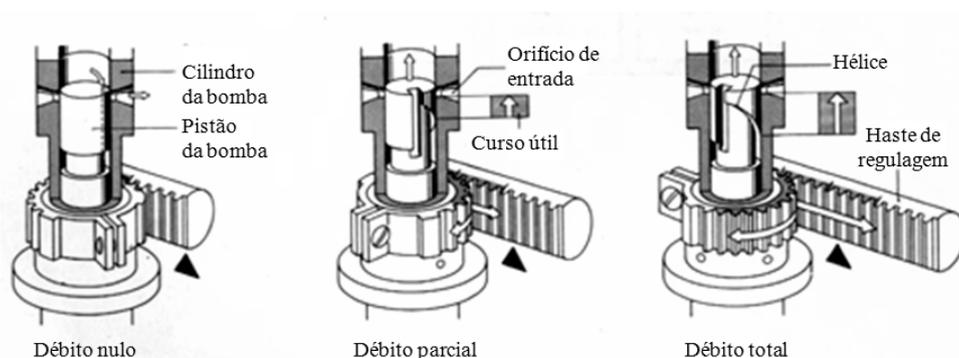
<b>Características</b>	<b>Valores</b>
<b>Quatro tempos</b>	-
<b>Ignição por compressão</b>	-
<b>Injeção indireta</b>	-
<b>Monocilíndrico</b>	-
<b>Curso do pistão</b>	114,30 mm
<b>Diâmetro do cilindro</b>	82,55 mm
<b>Volume deslocado</b>	611,70 cm <sup>3</sup>
<b>Faixa de razões de compressão</b>	8:1 a 36:1

A sigla CFR significa Cooperative Fuel Research. Esse motor é padronizado e instrumentado para ser capaz de medir o número de cetano de combustíveis, através do método previsto em norma ASTM D 613. Isto é conseguido por conta de sua particularidade de poder ter alguns de seus parâmetros de funcionamento variados. Estes parâmetros e seus mecanismos de ajuste são comentados a seguir:

- **Temperatura do ar de admissão (°F)** – é variada através de uma resistência elétrica que entra em contato com o ar no duto de admissão. Existe um sistema capaz de ligar e desligar o aquecimento do ar, dependendo da necessidade. A

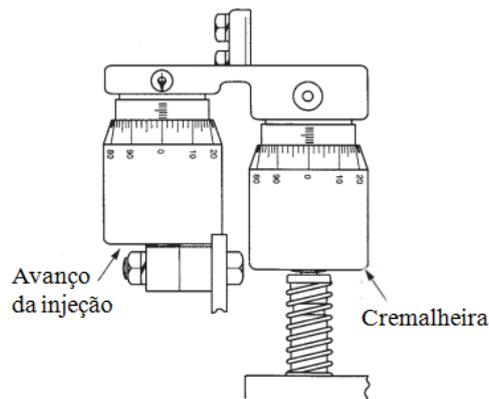
temperatura não deve ultrapassar o valor de 150°F, por limitações do termômetro utilizado. Quanto maior for a temperatura do ar de admissão, menor será o atraso de ignição, logo, o controle desta condição é importante para regular o método ASTM para determinação do número de cetano, que estabelece o valor fixado de 13° para o atraso de ignição.

- **Temperatura do bico injetor (°F)** – é regulada pela abertura de uma válvula que controla o fluxo de água responsável pelo arrefecimento da camisa que envolve o bico injetor.
- **Temperatura do óleo lubrificante (°F)** – o óleo lubrificante não possui controle de temperatura, mas também é um parâmetro variável do motor. Durante o método, sua temperatura começa em torno de 100°F e vai até em torno de 120°F.
- **Tempo de consumo (s)** – é modificado através de uma cremalheira que, na verdade, serve para a regulação da vazão de combustível e, conseqüentemente, mexe com o tempo que o motor leva para consumir determinada quantidade de combustível.
- **Posição da cremalheira** – modifica o débito de combustível através de um engenhoso sistema composto por um cilindro com uma ranhura oblíqua em forma de hélice, com seção transversal variada, e uma segunda ranhura, reta e de perfil retangular. Esse cilindro nada mais é que o pistão da bomba injetora. A partir do acionamento da cremalheira, acontece a rotação deste pistão, que regula a passagem de menor ou maior quantidade de combustível. Ao girar o pistão no sentido horário, a vazão de combustível aumenta. A vazão se torna nula quando a ranhura retangular se encontra com o orifício de entrada. A Figura 11 mostra esquematicamente a cremalheira para situações de débito de combustível nulo, parcial ou total.



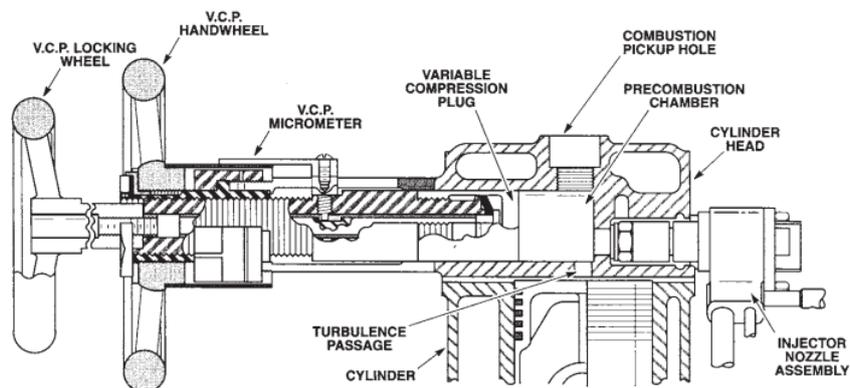
**Figura 11:** Esquema de funcionamento da cremalheira (BOSCH, 2000)

- **Avanço da injeção** ( $^{\circ}$ ) – é alterado através de um micrômetro (Figura 12) que modifica o ângulo de defasagem da bomba injetora. Idealmente, o início da combustão deve ocorrer quando o pistão do motor atinge o PMS, pois isso faz com que a potência gerada possa ser aproveitada ao máximo. Por isso, e por conta do atraso de ignição, a injeção deve ocorrer adiantada em relação ao PMS, como forma de compensar o atraso.



**Figura 12:** Micrômetro do avanço da injeção no motor CFR (ASTM, 1985)

- **Posição do volante** – serve para a regulação da razão de compressão do motor. Quanto maior a razão de compressão, menor o atraso de ignição. Assim sendo, esta condição de funcionamento também é de importante atenção para a realização do método ASTM para a determinação do número de cetano do combustível. O desenho da vista lateral, em corte, da montagem do volante e o cabeçote do motor encontra-se na Figura 13. Nela também observa-se a pré-câmara de combustão, de formato quadrado.



**Figura 13:** Vista em corte do volante e da câmara de combustão (ASTM, 1985)

## 5.5 Analisador de gases

É utilizado um analisador de gases portátil, de modelo Testo 350-XL, cedido pelo Professor Albino Leiróz, responsável pelo LMT. O analisador Testo é projetado para monitoramento industrial de gases e análise de combustão. Ele é munido de sensores eletroquímicos e um analisador infravermelho não dispersivo, sendo capaz de detectar  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{SO}_2$  (TESTO, 2003). O analisador utilizado pode ser visto na Figura 14 e algumas especificações técnicas encontram-se no Apêndice C – Dados técnicos Testo 350XL.



**Figura 14:** Analisador de gases Testo 350-XL

## **6. Metodologia**

Este capítulo objetiva relatar detalhadamente os métodos utilizados para a obtenção de todos os dados experimentais, bem como o tratamento destes valores. Afinal, nem sempre o resultado é utilizado exatamente da maneira que o instrumento de medição o oferece. Além disso, todo resultado experimental possui uma incerteza associada, que deve ser levada em conta na análise dos resultados. Neste capítulo, as incertezas experimentais serão apenas expostas ao longo do texto, porém, os cálculos de propagação de incertezas encontram-se demonstrados no Apêndice D – Propagação de Incertezas.

### **6.1 Preparo das amostras**

Antes de iniciar o preparo das amostras, o ambiente é condicionado, na intenção de se aproximar a temperatura do laboratório a 20°C, que é o valor utilizado como referência para as massas específicas tabeladas nas especificações da ANP. Tais valores também podem ser consultados na Tabela 1 e na Tabela 2. Em seguida, verifica-se se a estabilidade da balança, colocando uma massa sobre ela e observando se sua leitura varia. Feito isso, o preparo das amostras é executado em três etapas: aferição da proveta, cálculos das massas específicas dos combustíveis e, finalmente, a mistura dos combustíveis.

#### **6.1.1 Aferição da proveta**

Para aferir a proveta, a ideia consiste em utilizar um líquido de massa específica nominal conhecida. Posiciona-se a proveta, inicialmente vazia, sobre a balança, que é então tarada para não mais considerar a massa da proveta. Em seguida, o recipiente é preenchido com o fluido, para realizar a leitura de seu volume e de sua massa. A partir destes dados, é possível obter uma massa específica calculada e compará-la com a nominal. Caso os valores sejam similares, está aferida a marcação do volume correspondente na proveta.

Neste caso, utiliza-se água Milli-Q, cedida pelo Laboratório GreenTec da UFRJ. Esta é uma substância deionizada e, portanto, ultrapura, de massa específica nominal  $(1,00952 \pm 0,00002)\text{g/mL}$ . Esse tipo de água é produzido pelo sistema de purificação de água da Millipore, que pode ser visto na Figura 15.



**Figura 15:** Millipore Série Direct 8/16 System, no Laboratório GreenTec, UFRJ

O líquido é colocado dentro da proveta de 250mL, que encontra-se sobre a balança, até uma marcação específica, a qual será aferida. No caso deste experimento, utiliza-se a marcação de 250mL. Buscando máxima precisão, o fluido é adicionado na proveta através de um recipiente maior e, ao se aproximar do volume desejado de 250mL, passa a ser adicionado com a proveta de 50mL, gota por gota, até atingir a marca, conforme ilustra a Figura 16.



**Figura 16:** Adição de água Milli-Q até a marca de 250mL

A partir do momento que a proveta encontra-se adequadamente preenchida, é feita a leitura da balança, que marcava  $(250,0 \pm 0,1)$ g. Através desses dados, é possível calcular a massa específica, como mostra a equação 3:

$$\rho_{MQ} = \frac{m}{V} = \frac{250,0}{250,0} = (1,0 \pm 0,1)g/mL \quad (3)$$

Desta forma, conclui-se que a calibração da proveta utilizada para o valor de (250,0 ± 0,4)mL encontra-se em um valor muito satisfatório, visto que a massa específica nominal da água Milli-Q, (1,008 ± 0,005)g/mL, ficou bem próxima do valor calculado.

### 6.1.2 Cálculo das massas específicas dos combustíveis

Para determinar as massas específicas dos combustíveis, utiliza-se um método muito semelhante ao do cálculo da massa específica da água Milli-Q. Inicialmente, é colocado o combustível na proveta até atingir a marca de 250mL, pois ela já foi aferida. Depois disso, é feita a leitura da balança e o cálculo da massa específica é realizado através desses dados e da equação 3. Entre as trocas de fluido, todo material utilizado é lavado para minimizar a interferência de impurezas e dos outros fluidos.

Para o diesel marítimo, a balança mostrava o valor de (214,4 ± 0,1)g. Logo, através da equação 3:

$$\rho_{DM} = \frac{m}{V} = \frac{214,4}{250,0} = (0,86 \pm 0,09) g/mL$$

Para o biodiesel, a leitura da balança foi de (216,8 ± 0,1)g. Logo, através da equação 3:

$$\rho_B = \frac{m}{V} = \frac{216,8}{250,0} = (0,87 \pm 0,09) g/mL$$

Percebe-se que as massas específicas de ambos os combustíveis encontram-se dentro dos limites especificados pela ANP. As faixas de valores padrão podem ser consultadas na Tabela 1 e na Tabela 2 e são de 0,850 a 0,900g/mL, para o biodiesel, e tem um máximo de 0,8968g/mL, para o diesel marítimo. É interessante notar também que a massa específica calculada do diesel ficou bem próxima de 0,8596g/mL, que é o valor reportado na análise presente na Tabela 7.

### 6.1.3 Mistura dos combustíveis

O preparo das misturas de combustível não é feito a partir do volume conhecido dos combustíveis, mas sim a partir de sua massa específica e de sua massa. É construída

uma planilha, no programa Microsoft Excel, para facilitar os cálculos dos valores em massa de combustível, que deveriam estar contidos em cada amostra, a partir da massa específica calculada e da porcentagem em volume de combustível que cada mistura deveria conter. Uma reprodução dos resultados desses cálculos encontra-se na Tabela 11.

**Tabela 11:** Conteúdo em massa e em volume das amostras

		<b>Amostra B0</b>	<b>Amostra B5</b>	<b>Amostra B10</b>	<b>Amostra B15</b>
<b>Biodiesel</b>	Porcentagem na mistura (%)	0	5	10	15
	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	867,2			
	Volume contido na mistura (L)	0	0,15	0,30	0,45
	Massa a ser adicionada (g)	0	130,1	260,2	390,2
<b>Diesel Marítimo</b>	Porcentagem na mistura (%)	100	95	90	85
	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	857,6			
	Volume contido na mistura (L)	3	2,85	2,70	2,55
	Massa a ser adicionada (g)	2572,8	2444,2	2315,5	2186,9
<b>Volume total da amostra (L)</b>		3			
<b>Massa total da amostra (g)</b>		2572,8	2574,2	2575,7	2577,1

Para a confecção da mistura B5, é posicionado sobre a balança o béquer de 4000mL e, em seguida, a balança é tarada em zero, passando a considerar apenas o peso do conteúdo e não mais o do béquer. Daí em diante, adiciona-se o diesel marítimo, até que a balança mostre o valor de 2444,2g, que é a massa do combustível fóssil presente nessa amostra, como pode ser notado na Tabela 11. Depois disso, adiciona-se a massa de 130,1g de biodiesel, totalizando uma leitura de (2574,2 ± 0,1)g na balança. Para finalizar, é importante garantir a homogeneidade da mistura, por isso, agita-se o conteúdo do béquer (Figura 17), antes de passar o líquido para o garrafão de armazenamento. As amostras são agitadas por um tempo em torno de 5min. Não se julgou necessário calcular o tempo de mistura, pois os combustíveis são miscíveis e possuem massas específicas parecidas.



**Figura 17:** Mistura de combustíveis sendo agitada

Para a confecção das amostras B10 e B15, o procedimento é exatamente o mesmo, seguindo as massas correspondentes na Tabela 11. A amostra B0 consiste em apenas diesel marítimo, puro, portanto não demanda mistura e nem agitação. Sua confecção é apenas despejar o conteúdo de diesel marítimo no béquer, até a balança marcar 2572,8g e armazenar em garraões adequados, como os da Figura 18.

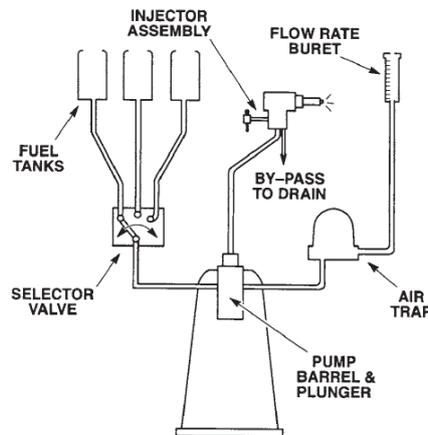


**Figura 18:** Recipientes de armazenamento das amostras prontas

## 6.2 Número de Cetano

Antes de começar a regular os parâmetros de interesse, de acordo com a norma ASTM D 613, o motor deve ser ligado da forma correta. Inicialmente o motor é abastecido com os combustíveis desejados. Pode-se escolher até três combustíveis diferentes, devido ao fato do motor possuir três cubas distintas, que servem como tanques de combustível. Como existem quatro amostras, inevitavelmente, em algum momento dos testes, uma das cubas deve ser esvaziada para o abastecimento com a

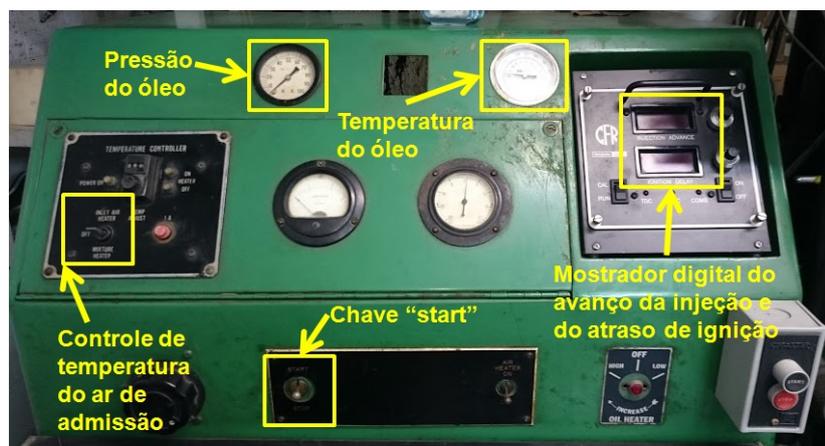
mistura remanescente. A Figura 19 apresenta um esquema do sistema de alimentação do motor.



**Figura 19:** Esquema do sistema de alimentação do motor (ASTM, 1985)

Para escolher de qual das três cubas vem o combustível que será queimado, existe uma válvula seletora que permite que apenas uma delas permaneça aberta, ela pode ser vista na Figura 19. Com a ajuda dessa válvula, há ainda a possibilidade de transferir o combustível de qualquer uma das cubas para uma bureta volumétrica transparente, com marcações de 1mL. Dessa forma, é possível ver o nível de combustível baixar na bureta, à medida que ele é consumido, e medir o volume e o tempo gastos para isso ocorrer, o que permite realizar as medidas no ensaio de consumo de combustível.

Feito o abastecimento do motor, são abertas as válvulas que controlam a água de arrefecimento do bico injetor e da torre. Depois disso, o motor é ligado. A Figura 20 representa uma foto de seu painel.



**Figura 20:** Painel do motor CFR

Mantém-se a chave na posição “start” até que a pressão do óleo lubrificante atinja o valor mínimo de 25psi. Então, é ligado o aquecedor do ar de admissão (“inlet

air heater”) e o mostrador digital do avanço da injeção e atraso de ignição. A seguir, volante é girado no sentido de aumentar a razão de compressão para facilitar o início da combustão, que é percebido, neste momento, através de um som característico. Feito tudo isso, inicia-se a regulagem dos parâmetros do motor de acordo com o método.

Como já mencionado, o teste de número de cetano é feito sob as condições especificadas na norma ASTM D 613. Ela descreve a padronização a qual os parâmetros do motor devem estar ajustados, para cada uma das amostras testadas, para se obter o resultado desejado no teste. A Tabela 12 traz os valores citados na norma para a realização do método (ASTM, 1985). Apenas a título de curiosidade, alguns dos parâmetros foram convertidos em unidades do SI, pelo motivo de serem as utilizadas no Brasil, possibilitando melhor noção da magnitude de cada uma das grandezas envolvidas.

**Tabela 12:** Ajustes no motor CFR, obedecendo a norma ASTM D 613

<b>Parâmetro de funcionamento</b>	<b>Valor previsto na Norma ASTM D 613</b>	<b>Valor no SI</b>
<b>Rotação (rpm)</b>	900 ± 9	-
<b>Temperatura arrefecimento do bico injetor (°F)</b>	100 ± 5	(38 ± 3)°C
<b>Temperatura arrefecimento do motor (°F)</b>	212 ± 3	(100 ± 2)°C
<b>Temp. do ar de admissão (°F)</b>	150 ± 1	(65,6 ± 0,5)°C
<b>Avanço da injeção (°)</b>	13,0 ± 0,1	-
<b>Pressão de abertura do injetor (psi)</b>	1500 ± 50	(10,30 ± 0,34)MPa
<b>Atraso de ignição (°)</b>	13,0 ± 0,1	-
<b>Vazão de combustível (mL/min)</b>	13,0 ± 0,2	-
<b>Pressão do óleo lubrificante (psi)</b>	25 a 30	(0,17 a 0,20)MPa
<b>Temperatura do óleo lubrificante (°F)</b>	135 ± 15	(57 ± 8)°C

A regulagem de cada um dos parâmetros foi discutida na seção 5.4, porém vale ressaltar alguns pontos. A rotação do motor é constante e igual a 900rpm, logo, não necessita ser regulada de acordo com a norma. O consumo de combustível deve ser fixado em 13mL/min. Isto é conseguido através da medição do tempo que o nível de combustível dentro da bureta transparente demora para descer 13 marcações, de 1mL cada. Se o tempo não for de 60s, ou dentro de um intervalo aceitável, deve-se modificar o débito de combustível através do mecanismo da cremalheira (Figura 11), mencionado

na seção 5.4. Em seguida, se repete o procedimento até que o tempo de consumo de 13mL se aproxime de 60s.

As temperaturas são os primeiros parâmetros a serem ajustados de acordo com o método, pois as válvulas de água de arrefecimento são abertas antes mesmo de ligar o motor. O sistema de aquecimento do ar de admissão também é ligado logo após a partida do motor. Contudo, o monitoramento das temperaturas deve ser constante para que não passem, e nem fiquem abaixo, dos valores tabelados.

Depois de checar o consumo, a posição do micrômetro é girada para regular o avanço da injeção até que o mostrador digital superior na Figura 21 exiba o valor de 13°. Depois de todos os outros parâmetros já ajustados, altera-se a posição do volante até que os mostradores digitais do avanço da injeção e atraso de ignição fiquem estáveis em 13°, conforme Figura 21.



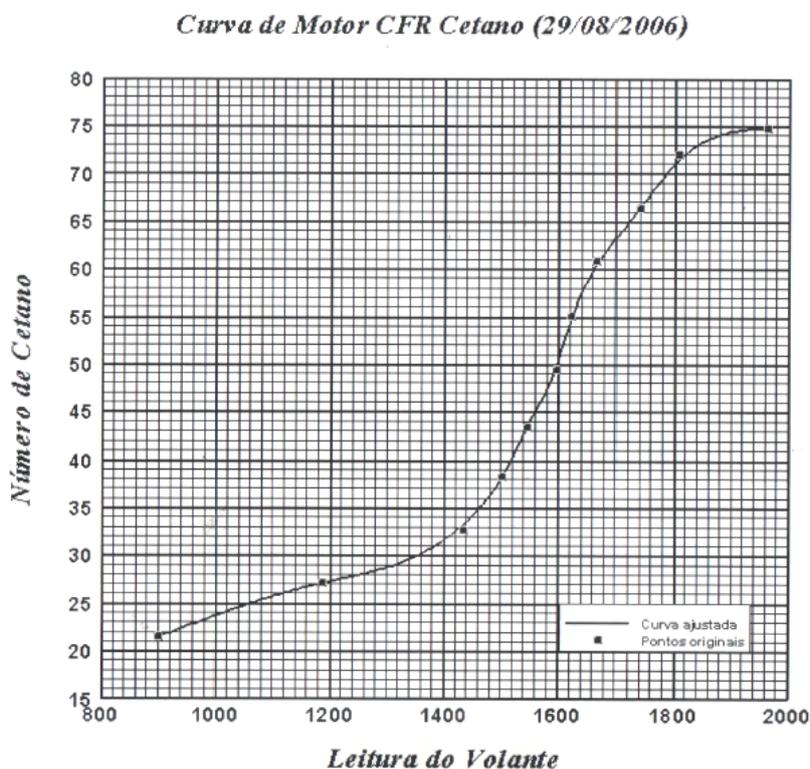
**Figura 21:** Mostrador digital do avanço da injeção e atraso de ignição

Depois de adequar o motor ao padrão especificado pela norma, para uma dada amostra de combustível testada, deve-se ler a posição do volante, que traduz a razão de compressão que faz com que aquela amostra permaneça nas condições do método. Esta leitura é feita através do micrômetro do volante, como mostra a Figura 22.



**Figura 22:** Micrômetro que mostra a posição do volante

Por fim, a partir desta leitura, é possível encontrar o número de cetano correspondente, tanto no gráfico da Figura 23, quanto na tabela do Apêndice E – Números de Cetano tabelados. Ambos relacionam as posições do volante com o motor trabalhando nas condições padrão ASTM com o respectivo número de cetano do combustível testado.



**Figura 23:** Curva que relaciona a posição do volante com o Número de Cetano

O gráfico foi construído a partir de 11 misturas de combustíveis com números de cetano conhecidos. Essas misturas consistiam em T-22 e U-15, unidos em variadas proporções. Eles foram testados no motor CFR, obedecendo ao método ASTM e a posição do volante foi anotada. Ao final, foi traçada a curva do motor, ajustada aos pontos obtidos, e feita a tabela.

Para cada uma das quatro amostras testadas (B0, B5, B10 e B15) todo este procedimento de regulagem do motor é repetido algumas vezes e o número de cetano é anotado, bem como as outras informações do teste, como: posição do volante, temperaturas, etc. Com esses valores coletados nas medições, é feita uma média aritmética inicial. Após a aplicação do critério de Chauvenet, são descartados alguns valores que muito dispersam em relação a média. Com a exclusão dos valores reprovados no critério, é feita a média aritmética final, chegando ao número de cetano,

apresentado na seção 7.1. As tabelas com os dados tratados, bem como as médias calculadas, encontram-se no Apêndice F – Dados do Teste Número de Cetano.

### **6.3 Emissões**

Para a realização dos testes de emissões, é necessário tomar a decisão de como o motor CFR deve ser ajustado, visto que ele oferece a possibilidade de modificar seus parâmetros geométricos de funcionamento. Assim, são avaliadas duas condições operacionais, quais sejam:

**1. Análise das emissões durante cada ensaio de número de cetano, aproveitando a regulagem segundo norma ASTM D 613 para cada uma das misturas B0, B5, B10 e B15.**

- Dessa forma, para cada uma das quatro amostras (B0, B5, B10 e B15), o teste é feito regulando o motor como se o número de cetano fosse ser obtido, porém, na verdade apenas os dados de emissões e consumo são coletados.
- A desvantagem dessa abordagem é que ela resulta em quatro resultados levantados em “motores distintos”, pois as geometrias (razão de compressão, posição de cremalheira da bomba injetora e ângulo de defasagem da bomba injetora) são diferentes para o padrão ASTM de cada uma das misturas. Por esse motivo, os resultados obtidos não tem base de conclusão, pois é impossível saber se as variações dos resultados de emissões estão relacionadas às “diferenças geométricas” do motor ou relacionadas às diferenças de composição das quatro misturas de combustíveis.

**2. Análise das emissões para cada uma das quatro amostras (B0, B5, B10 e B15) considerando o mesmo padrão ASTM de motor.**

- A segunda abordagem visa corrigir as deficiências da primeira, fazendo com que todas as amostras sejam testadas nos mesmo padrão ASTM. Ou seja, usando o B0 como exemplo, nessa abordagem não mais apenas a mistura B0 tem sua tomada de dados de emissões com o motor regulado para a obtenção de seu número de cetano, mas também as outras três

amostras (B5, B10 e B15) tem seus níveis de poluentes medidos no padrão B0 ASTM. E isto é repetido para os padrões B5, B10 e B15.

- Dessa forma, não existe mais o problema dos dados para as quatro amostras serem tomados em “motores distintos”. Aqui, existem quatro “motores distintos”, porém, para cada um deles, as emissões das quatro amostras são tomadas, permitindo a comparação entre amostras trabalhando com um mesmo padrão ASTM.
- Assim, chega-se a 16 resultados de emissões, para análises e conclusões: quatro resultados para cada uma das quatro amostras (sendo um resultado em cada um dos padrões ASTM).

Faz-se necessário definir claramente o que é um padrão ASTM. Colocar o motor CFR trabalhando em um dado “padrão ASTM” é regular todos os seus parâmetros de funcionamento de maneira como se fosse ser obtido o número de cetano de dada mistura de combustíveis. Assim sendo, os valores para cada um dos parâmetros nas quatro condições operacionais utilizadas para o motor foram obtidos através de média aritmética feita a partir dos valores encontrados nos experimentos de número de cetano.

Os valores médios das anotações de operação do motor, seguindo o método ASTM, encontram-se nas tabelas do Apêndice F – Dados do Teste Número de Cetano, mas também foram aqui resumidos na Tabela 13. As razões de compressão foram acrescentadas a tabela. Quanto maior o valor da posição do volante, menor é a razão de compressão do motor.

**Tabela 13:** Valores dos parâmetros utilizados nos testes de emissões

Parâmetro do motor	Padrão ASTM:			
	B0	B5	B10	B15
Temp. do ar de admissão (°F)	145,4	149	148,5	148,5
Temp. do bico injetor (°F)	100,4	99,3	99,5	100
Temp. do óleo lubrificante (°F)	110,0	109,3	109,0	110,0
Tempo de consumo 13mL (s)	59,7	60,9	60,3	60,1
Posição da cremalheira	703,0	710	710	708
Posição do avanço da injeção	1207,8	1218,7	1242,5	1238,5
Posição do volante	1531,8	1531,7	1540,0	1553,5
Razão de compressão aproximada	12,76	12,76	12,69	12,61

A Tabela 14 mostra a ordem cronológica dos padrões ensaiados, bem como das amostras testadas. Ela é construída com o objetivo de fazer um planejamento dos testes.

Visto que existem apenas três cubas e quatro amostras, a sequência de misturas testadas é pensada de modo a reduzir a quantidade de trocas de conteúdo das cubas e separar os ensaios por padrão. Nota-se, em amarelo, que a programação dos ensaios de emissões números 1, 5, 9 e 13 correspondem às misturas B0, B15, B10 e B5 testadas nas suas respectivas condições padrão ASTM para a determinação do número de cetano.

**Tabela 14:** Sequência dos combustíveis ensaiados

Ajuste dos parâmetros do motor	Ensaio	Amostra testada
<b>Padrão B0 ASTM</b>	1	Mistura B0
	2	Mistura B5
	3	Mistura B10
	4	Mistura B15
<b>Padrão B15 ASTM</b>	5	Mistura B15
	6	Mistura B0
	7	Mistura B10
	8	Mistura B5
<b>Padrão B10 ASTM</b>	9	Mistura B10
	10	Mistura B0
	11	Mistura B15
	12	Mistura B5
<b>Padrão B5 ASTM</b>	13	Mistura B5
	14	Mistura B0
	15	Mistura B15
	16	Mistura B10

Para a realização das medições de emissões, o analisador de gases Testo é conectado no duto de descarga do motor, através de uma sonda que leva os gases até as células de detecção dentro do aparelho, conforme Figura 24.



**Figura 24:** Sonda do analisador conectada ao duto de descarga do motor

Seguindo a ordem da Tabela 14, o primeiro combustível testado foi o diesel marítimo puro. Assim sendo, o motor foi abastecido com a amostra B0 e, em seguida,

todos os seus parâmetros foram ajustados de acordo com os valores da coluna B0, da Tabela 13. Desta forma, o motor está pronto para as primeiras medidas de emissões.

O analisador é então ligado para iniciar a leitura. Para obter um conjunto de dados confiável, o fabricante recomenda o tempo mínimo de 3min, para que as emissões se estabilizem. Além disso, o visor do analisador Testo tem um tempo de reação, que causa um atraso entre o que está sendo medido e o que está sendo mostrado. Visto isso, é esperado um tempo de aproximadamente 5min, observando o visor do analisador, para encontrar o momento quando os valores medidos para os poluentes param de variar ou apresentam variações menores.

Ao notar uma constância nas medições, alguns valores para cada dado mostrado na tela são anotados, a fim de se fazer uma média aritmética. Este procedimento é repetido 16 vezes: quatro vezes para cada uma das quatro misturas, seguindo a ordem da Tabela 14. As tabelas com medidas obtidas de todos os gases detectados pelo analisador encontram-se no Apêndice G – Dados do Teste de Emissões. Porém, os gases de interesse, isto é, que são considerados na análise deste trabalho são: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e CO<sub>2</sub>.

A partir dos dados obtidos através do analisador Testo, são traçados gráficos, visando comparar os níveis de emissão do mesmo poluente operando em condições iguais de motor, porém com amostras de combustíveis diferentes. As incertezas utilizadas na construção dos gráficos foram baseadas em especificações técnicas do analisador de gases, que encontram-se no Apêndice C – Dados técnicos Testo 350XL. Seus cálculos estão demonstrados no Apêndice D – Propagação de Incertezas.

## **6.4 Consumo**

O teste de consumo foi feito em paralelo com o teste de emissões. Logo, a ordem que o consumo das amostras foi testado também obedece ao descrito na Tabela 14 e as condições padrão da Tabela 13. Portanto, para cada um dos quatro padrões utilizados nos ensaios, sempre há uma mistura sendo testada em sua verdadeira condição ASTM.

É neste fato que reside a ideia do teste de consumo. Afinal, se para um dado padrão há sempre uma, dentre as quatro amostras testadas, que corresponde àquelas condições, isto significa que seu tempo de consumo de 13mL está em torno de 60s, o que teoricamente não ocorrerá para as outras misturas, que estão fora de seus padrões ASTM.

Por exemplo, o motor roda no padrão B0 ASTM para todas as quatro amostras. Sabe-se que a mistura B0 apresentará o tempo de consumo de 13mL em torno de 60s. Objetiva-se, então, verificar o que ocorre para as outras misturas de combustível, nessas mesmas condições. Se uma mistura consumir os 13mL em um tempo inferior a 60s, isto aponta que aquela amostra apresenta um consumo maior que a amostra B0. Do contrário, a mistura estará sendo consumida mais lentamente, indício de que seu consumo é menor do que o da mistura B0. Pode também ser o caso de tempos muito próximos, apontando consumos similares. Ou seja, para tirar conclusões, o que interessa é a comparação entre os tempos que as diferentes amostras levam para consumir determinado volume de combustível e não o valor absoluto de tempo.

É medido, então, o tempo de consumo de 13mL por 16 vezes: para cada um dos quatro padrões e para cada uma das quatro amostras. Os resultados experimentais fornecidos pelo cronômetro encontram-se no Apêndice H – Dados do Teste de Consumo. São gerados gráficos, comparando o tempo que cada amostra levou para consumir os 13mL, separados por condições de operação do motor. O tempo final exposto nos resultados é a média aritmética dos resultados obtidos nas repetições do experimento.

## 7. Resultados e Discussão

Após a realização dos testes e o tratamento de dados, descritos no capítulo 6, aqui são apresentados e comentados os resultados. Também são expostas as tendências esperadas para os testes de número de cetano, emissões e consumo absoluto, com a finalidade de comparação.

### 7.1 Número de Cetano

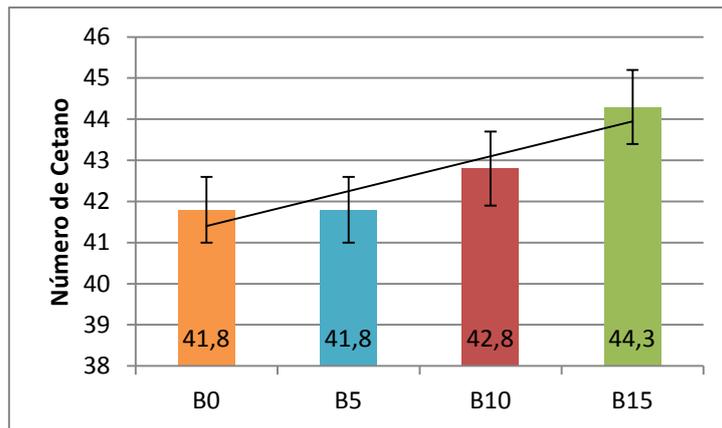
Os números de cetano, expostos na Tabela 15 e no gráfico da Figura 25, são aqueles obtidos segundo o método descrito na seção 6.2. Após a média dos resultados experimentais, seguida de descarte de valores discrepantes (critério de Chauvenet) e nova média, chega-se aos resultados da Tabela 15. O objetivo é perceber a influência do aumento do teor de biodiesel sobre o número de cetano das misturas de combustível.

O biodiesel é um combustível cujo número de cetano costuma variar um pouco, de acordo com o insumo que o originou. Entretanto, geralmente apresenta valores mais elevados do que os do diesel de petróleo, independente de sua origem. Em todo caso, o biodiesel utilizado nos testes é oriundo do óleo de palma, apresentando elevado número de cetano, em torno de 56,2 (KNOTHE *et al.*, 2006). Assim sendo, é de se esperar que o acréscimo de biodiesel ao óleo diesel marítimo eleve o número de cetano da mistura, melhorando a qualidade de ignição.

**Tabela 15:** Resultado final para os números de cetano das amostras

Amostra	Número de Cetano
B0	41,8 ± 0,8
B5	41,8 ± 0,8
B10	42,8 ± 0,9
B15	44,3 ± 0,9

É interessante visualizar esses resultados também em gráficos de barras para observar graficamente as diferenças de valores e tendências de crescimento. Para facilidade da análise, foi traçada a reta de ajuste linear dos resultados, indicando a tendência.

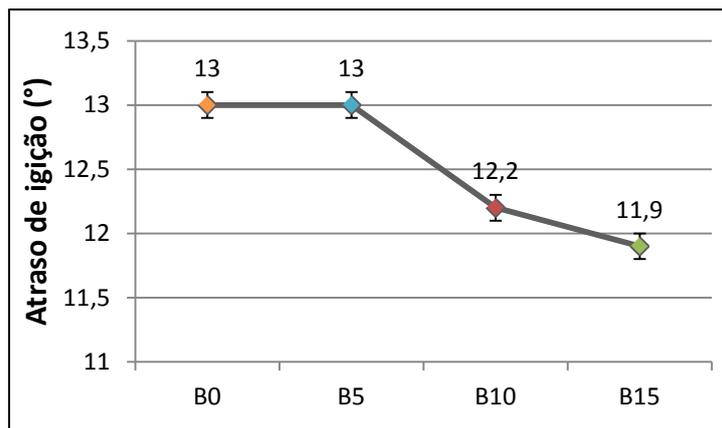


**Figura 25:** Número de cetano para as quatro amostras de combustível

Percebe-se que os resultados encontram-se, em geral, de acordo com o esperado, que era o número de cetano da mistura aumentar com o acréscimo de biodiesel. A única ressalva é que isto não ocorreu comparando as misturas B0 e B5, que obtiveram posições médias do volante muito próximas. O teor de 5%, em volume, de biodiesel não foi suficiente para obter variações significativas no número de cetano entre essas duas amostras. Porém, as incertezas experimentais ainda permitem afirmar que poderia haver tendência de aumento de uma para a outra. Já entre as amostras B5, B10 e B15, mesmo considerando-se as incertezas experimentais, há uma tendência clara de crescimento do número de cetano, à medida que a porcentagem de biodiesel cresce.

Abrindo um breve parêntese para um interessante comentário: foi gerado um gráfico do atraso de ignição para cada uma das quatro amostras mantendo a regulagem do motor constante e igual à utilizada para a medição do número de cetano da mistura B0. É interessante notar o que acontece ao se fazer a troca de uma amostra, por outra com maior teor de biodiesel, sem alterar a regulagem do motor.

Por exemplo, se o motor rodava inicialmente com amostra B5, ao se fazer a troca por mistura B10, contida em outra cuba, percebe-se que o atraso de ignição tem uma queda instantânea (de  $13^\circ$  para  $12,2^\circ$ ). De forma semelhante, ao se trocar o B5 pelo B15, em uma terceira cuba, o atraso de ignição cai ainda mais, (de  $13^\circ$  para  $11,9^\circ$ ). Trocando a mistura B0 pela B5 não é observada alteração no atraso, pois as duas amostras possuem posições de volante muito próximas (iguais a  $1531,8$  e  $1531,7$ , respectivamente). Isto gera a consequência de as razões de compressão e números de cetano também ficarem em valores semelhantes para B0 e B5. A Figura 26 é resultado de todo o descrito.



**Figura 26:** Atraso de ignição para as amostras, mantendo fixa a posição do volante

A explicação para este fato é a presença de oxigênio na composição do biodiesel. A maior concentração do biocombustível na amostra acarreta maior oferta de oxigênio na reação, o que faz com que a combustão se processe mais facilmente, com menor atraso. A diminuição do atraso de uma amostra para outra, com maior teor de biodiesel, indica também um aumento no número de cetano. Afinal, o número de cetano está ligado à qualidade da combustão que é maior se o atraso de ignição for pequeno.

## 7.2 Emissões

Nesta seção são discutidos os resultados de emissões para os principais poluentes gerados no processo de combustão:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$ . Os dados de emissões são expostos em gráficos, para cada padrão ASTM, contendo os resultados para as quatro amostras de combustível. Para cada poluente, os quatro gráficos são comentados e, no final, é feito um apanhado geral dos resultados. Uma vantagem de se ter resultados para quatro “motores distintos” é que é possível observar uma tendência geral, ou ao menos mais comum, para o caso de algum dos padrões apresentar resultado discrepante em relação aos demais ou ausência de tendências claras.

### 7.2.1 Dióxido de Enxofre - $\text{SO}_2$

O enxofre está presente no petróleo bruto e, conseqüentemente em seus derivados. Durante a combustão, a maior parte dele é emitida na atmosfera sob a forma de  $\text{SO}_2$  e o restante sob a forma de sulfetos e sulfatos. Por ser um combustível que não é origem fóssil, o biodiesel não apresenta enxofre em sua composição (VALENTE, 2007). Dessa forma, é esperado que as emissões de dióxido de enxofre diminuam à

medida que aumenta o teor de biodiesel das amostras. Contudo, o resultado para o SO<sub>2</sub> foi bem diferente do esperado.

O primeiro estranhamento foi causado comparando as emissões de SO<sub>2</sub> trabalhando em padrão B0 ASTM. A amostra com o maior teor de biodiesel (B15) não só foi a maior como a única emissora de SO<sub>2</sub>, quando na verdade deveria ser a que menos emite. Mesmo considerando as incertezas experimentais, este é um forte indício que algo pode ter dado errado nesses ensaios.

Para tirar a prova, observou-se o que aconteceu com os outros padrões. Em todos, houve uma tendência de aumento de emissões de SO<sub>2</sub> à medida que se avança ao longo da sequência de testes (Tabela 14), independente do percentual de biodiesel ou do padrão ASTM. Por exemplo, no ensaio número 1, as emissões foram de  $(0 \pm 5)$ ppm e no ensaio número 16, foram de  $(49 \pm 5)$ ppm.

Assim, não foi observada tendência dos níveis de SO<sub>2</sub> em relação ao teor de biodiesel das misturas. Isto leva a crer que as emissões de SO<sub>2</sub> estão mais ligadas às condições relacionadas ao tempo de funcionamento do motor ou do analisador de gases, que enfim, pode estar fornecendo resultados não conformes para as medições. Por conta disto, não é possível aprofundar a discussão sobre as emissões de SO<sub>2</sub> das amostras.

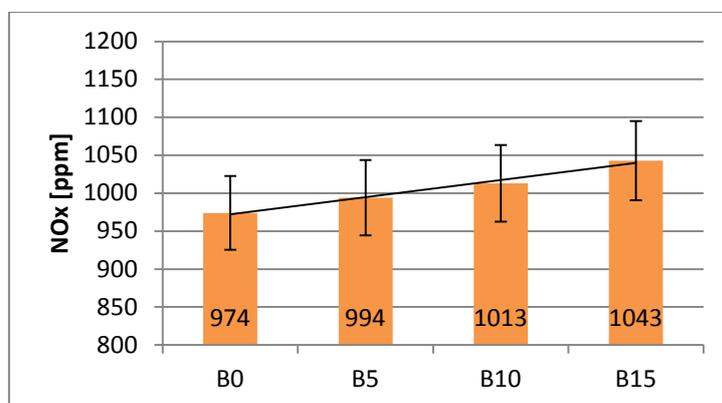
### 7.2.2 Óxidos de Nitrogênio - NO<sub>x</sub>

O nitrogênio presente nos gases de exaustão de um motor é devido ao fato do elemento químico ser o principal componente do ar atmosférico. Durante a combustão, o nitrogênio presente no ar da câmara se combina com moléculas de oxigênio dissociadas, formando óxidos de nitrogênio, representados por óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) (VALENTE, 2007).

As emissões de NO<sub>x</sub> dependem diretamente da temperatura da combustão. A presença de oxigênio na composição química do combustível, como é o caso do biodiesel, também faz com que a formação de NO<sub>x</sub> seja facilitada (VALENTE, 2007). Assim, é esperada uma tendência de aumento nas emissões de NO<sub>x</sub> com o aumento do teor de biodiesel nas amostras.

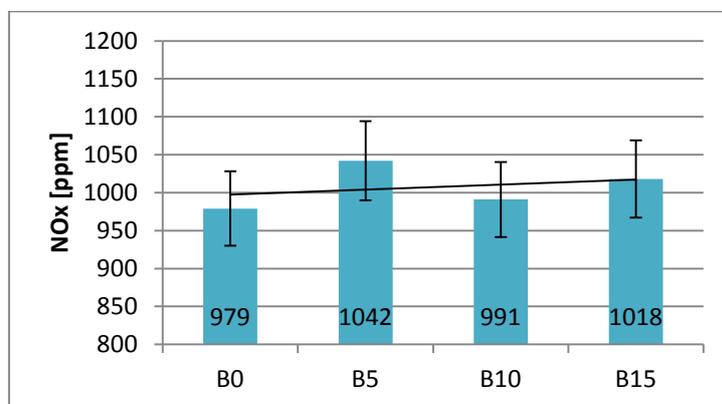
Os gráficos a seguir (Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 30) apresentam os resultados para as emissões de NO<sub>x</sub> para os quatro padrões ASTM de regulagem do motor. Cada uma das quatro cores das barras do gráfico representa um dos quatro ajustes de motor. As tomadas de dados feitas no padrão B0 ASTM são as de cor laranja. As barras azuis representam os valores obtidos no padrão B5 ASTM. O padrão B10

ASTM é representado pelas barras bordô. E, por fim, a cor verde traz os dados tomados com o motor trabalhando no padrão B15 ASTM. Para cada um dos gráficos, foram traçadas linhas de tendência através de ajuste linear dos resultados, para ajudar na análise.



**Figura 27:** Emissões de NO<sub>x</sub> com motor ajustado conforme padrão B0 ASTM

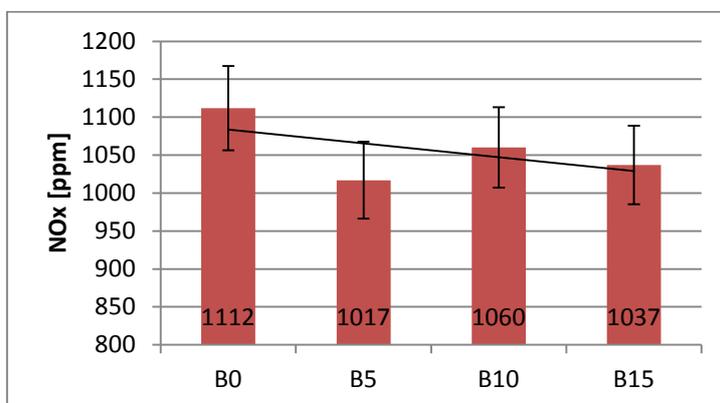
Para o padrão B0 ASTM, mostrado na Figura 27, há tendência de aumento de emissões de NO<sub>x</sub>, conforme aumenta o teor de biodiesel nas amostras, indo de acordo com (VALENTE, 2007, GÖKALP *et al.*, 2009).



**Figura 28:** Emissões de NO<sub>x</sub> com motor ajustado conforme padrão B5 ASTM

Como pode ser notado na Figura 28, para o padrão B5 ASTM há tendências de crescimento isoladas, entre as misturas B0 e B5 e entre as misturas B10 e B15. Entre essas duas tendências de aumento dos níveis de NO<sub>x</sub>, há uma queda de emissões, comparando B5 com B10. Porém, ao analisar as incertezas, percebe-se que dependendo dos valores assumidos, essa descontinuidade pode ser revertida. A linha de tendência traçada aponta leve inclinação positiva para crescimento, o que leva a crer que a

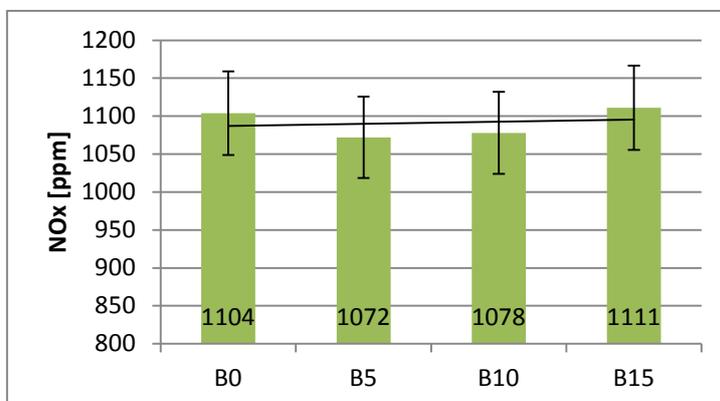
descontinuidade pode ser apenas uma questão de um dado coletado em um momento inoportuno para a amostra B5, elevando a média neste ponto.



**Figura 29:** Emissões de NO<sub>x</sub> com motor ajustado conforme padrão B10 ASTM

Como pode ser notado na Figura 29, para o padrão B10 ASTM a tendência foi de redução dos níveis de NO<sub>x</sub> com o aumento da concentração de biodiesel. Esta tendência se mostra contrária ao exposto em (VALENTE, 2007, GÖKALP *et al.*, 2009). Contudo, está de acordo com (KALLIGEROS *et al.*, 2003, KNOTHE *et al.*, 2006), onde o número de cetano mais elevado é associado à diminuição das emissões de NO<sub>x</sub>.

Porém, como essa tendência não se verificou para os outros padrões, é mais provável que as flutuações dos dados coletados, que acabaram por gerar tendência contrária nos níveis de NO<sub>x</sub>, tenham ocorrido devido a inconstância da temperatura do ar de admissão. Como a formação dos óxidos de nitrogênio é diretamente ligada a temperatura que, por conta do mecanismo de aquecimento, é difícil de ser mantida constante na admissão, certamente isto influencia a estabilidade da leitura do analisador e, conseqüentemente, os dados coletados para NO<sub>x</sub>.



**Figura 30:** Emissões de NO<sub>x</sub> com motor ajustado conforme padrão B15 ASTM

Na Figura 30, que representa o padrão B15 ASTM, observa-se leve tendência geral de aumento das emissões de  $\text{NO}_x$  entre as misturas B5, B10 e B15, correspondendo às expectativas. A mistura B0 fugiu ao que diz a literatura, apresentando valor maior que o das amostras B5 e B10. Contudo, a linha de tendência continua apontando leve elevação nos níveis de  $\text{NO}_x$ , levando a crer que pode ter havido apenas uma flutuação inoportuna na coleta de dados, semelhante ao ocorrido no padrão B5.

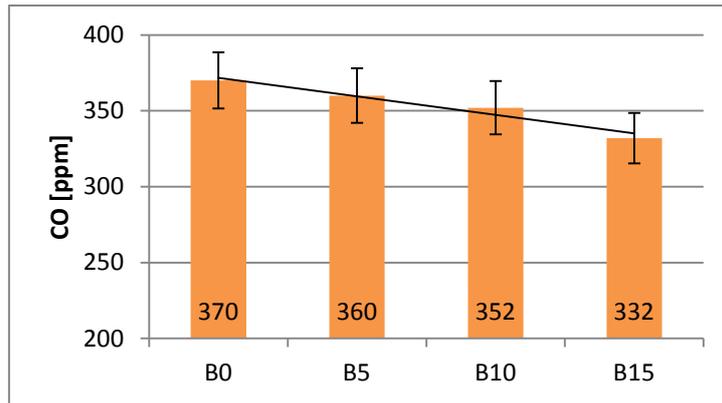
Como uma visão dos quatro gráficos, pode-se dizer que a tendência geral foi de elevação nas emissões de  $\text{NO}_x$ , confirmando a literatura. Percebe-se que o padrão B0 obteve os melhores resultados, em relação ao esperado. Isto pode ser explicado pelo fato da mistura B0 ser a atualmente empregada e sua respectiva regulagem de motor é a que mais se aproxima de um motor diesel convencional, que não permite a variação da razão de compressão.

Existem algumas discrepâncias de valores e tendências para os padrões B5, B10 e B15, que podem ter sido ocasionadas pela dificuldade de regulagem da temperatura de admissão, que acaba por dificultar a estabilização das emissões de  $\text{NO}_x$  ou ainda pela elevação do número de cetano das amostras com o aumento da concentração de biodiesel, como sugerem (KALLIGEROS *et al.*, 2003, KNOTHE *et al.*, 2006).

### 7.2.3 Monóxido de Carbono – CO

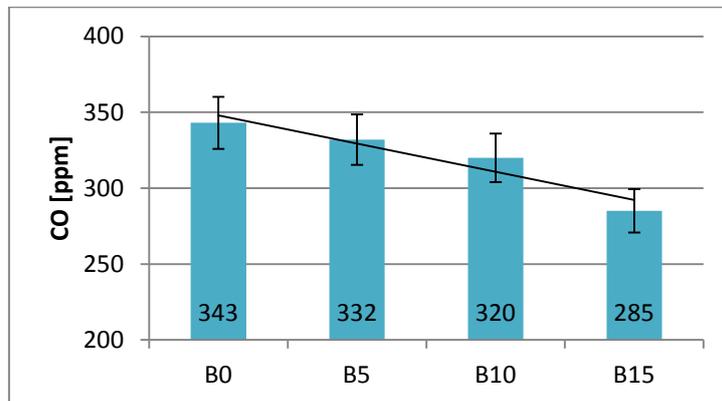
O monóxido de carbono é um poluente tóxico, geralmente originado pela queima incompleta do combustível. Quando a combustão acontece operando com uma mistura pobre, isto é, na presença de ar em excesso, ela tende a ser mais completa (VALENTE, 2007). O fato de o biodiesel possuir  $\text{O}_2$  em sua composição também aumenta a disponibilidade de oxigênio na reação, propiciando a queima completa e favorecendo formação de  $\text{CO}_2$  em lugar de CO. Portanto, com o aumento do teor de biodiesel, é esperada uma redução nas emissões de CO (KALLIGEROS *et al.*, 2003).

Os gráficos a seguir (Figura 31, Figura 32, Figura 33 e Figura 34) apresentam os níveis de emissão de CO, separados por mesmo padrão ASTM do motor e variando as amostras, para comparação. É mantida a cor laranja para padrão B0, cor azul para padrão B5, cor bordô para padrão B10 e cor verde para padrão B15. Foram traçadas retas obtidas por ajuste linear para ajudar a identificar o rumo das tendências.



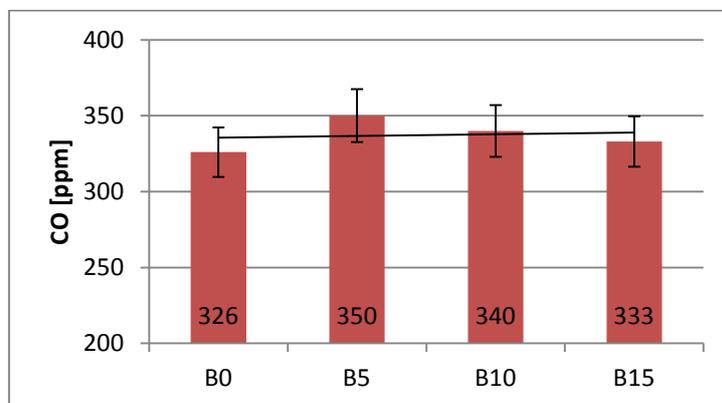
**Figura 31:** Emissões de CO com motor ajustado conforme padrão B0 ASTM

Para o padrão B0 ASTM (Figura 31), observa-se tendência de queda nas emissões de CO, à medida que aumenta o teor de biodiesel na amostra, em acordo com (KALLIGEROS *et al.*, 2003).



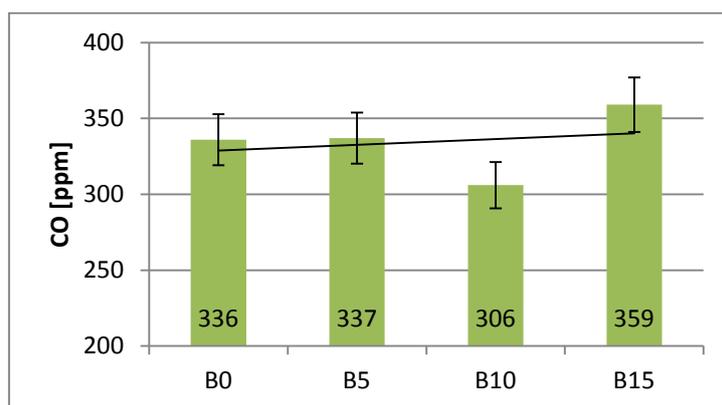
**Figura 32:** Emissões de CO com motor ajustado conforme padrão B5 ASTM

Na Figura 32 é ilustrado o resultado para padrão B5 ASTM. Há novamente tendência de queda nas emissões de CO à medida que cresce o volume de biodiesel presente na amostra, confirmando o relatado na literatura.



**Figura 33:** Emissões de CO com motor ajustado conforme padrão B10 ASTM

As emissões de CO para o padrão B10 ASTM, representadas na Figura 33, demonstram tendência de queda com o aumento da concentração de biodiesel entre as amostras B5, B10 e B15, concordando com (KALLIGEROS *et al.*, 2003). A mistura B0 está fugindo à tendência. Como a diferença de valores entre B0 e B5 é maior do que as diferenças entre os níveis das três últimas amostras, provavelmente ocorreu um erro na aquisição de dados para este ponto, que pode ter considerado um momento de emissões com valor discrepante em relação à média dos dados coletados.



**Figura 34:** Emissões de CO com motor ajustado conforme padrão B15 ASTM

Nas condições padrão B15 ASTM, exibidas na Figura 34, os níveis de emissão de CO foram muito similares para B0 e B5. Já entre B10 e B15, existe um salto de crescimento. No geral, há uma pequena tendência ao aumento das emissões, contrariando a literatura, assim como ocorreu com o padrão B10 ASTM.

Analisando os quatro gráficos, nota-se que novamente a mistura B0, dessa vez, acompanhada da mistura B5 foram as que apresentaram tendências mais claras. Isso leva a crer que os outros dois padrões podem ter apresentado problemas na aquisição de dados e que os padrões B0 e B5 são os que estão oferecendo os resultados mais confiáveis. Portanto, a tendência principal é de queda nos níveis de emissão de CO.

Os melhores resultados de B0 e B5 podem ser explicados pelo fato das duas trabalharem com padrões ASTM com razões de compressão muito semelhantes e mais próximas dos motores diesel utilizados comercialmente. Na maioria das situações, as misturas trabalhando no padrão B0 foram as que mais emitiram CO, em ppm. Isto pode ser explicado pelo fato do padrão B0 trabalhar com as maiores razões de compressão e, conseqüentemente, maiores temperaturas, ocasionando maior formação de CO (VALENTE, 2007).

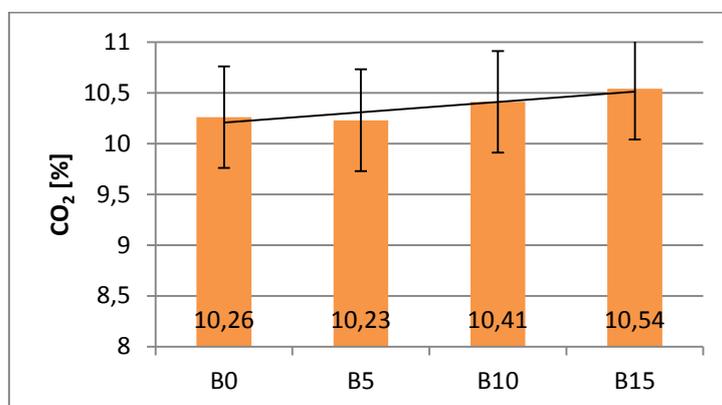
## 7.2.4 Dióxido de Carbono - CO<sub>2</sub>

O dióxido de carbono é gerado quando há a completa oxidação do carbono presente no combustível, durante a reação de combustão. Ele não é um poluente tóxico como o CO, porém, é um agente do efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global. Com o aumento do teor de biodiesel, espera-se uma tendência de aumento nos níveis de emissão de CO<sub>2</sub>. O motivo é similar ao do decréscimo dos níveis de CO: a presença de oxigênio no biodiesel facilita a combustão completa, deixando de formar CO para formar CO<sub>2</sub> (GÖKALP *et al.*, 2009).

Embora emita mais CO<sub>2</sub> do que o diesel fóssil, o biodiesel é predominantemente originado por óleos vegetais, que absorvem parte do CO<sub>2</sub> da atmosfera durante seu crescimento. Dessa forma, há não só a redução de emissões de dióxido de carbono, como também se emite carbono que já se encontrava disponível na natureza e não inerte, nas profundezas do solo terrestre, contribuindo assim para a manutenção do equilíbrio do ecossistema.

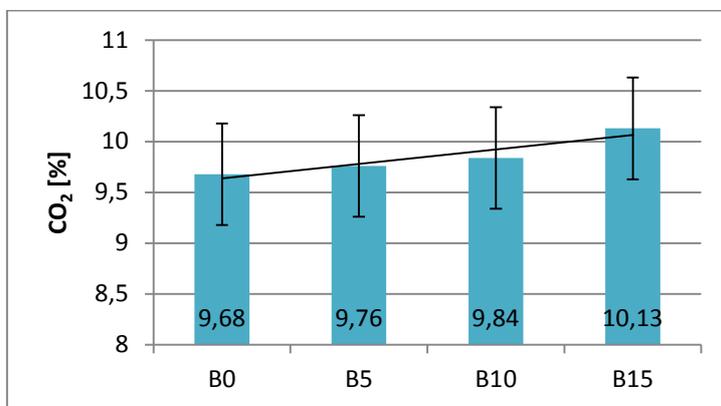
Os gráficos agora apresentados (Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38) mostram a porcentagem de CO<sub>2</sub> captada nos ensaios. Para cada uma das quatro amostras, cada gráfico traz os valores separados por mesmo padrão ASTM do motor. É mantida a cor laranja para padrão B0 ASTM, cor azul para padrão B5 ASTM, cor bordô para padrão B10 ASTM e cor verde para padrão B15 ASTM. As linhas de tendência de ajuste linear também se fazem presentes.

No primeiro gráfico, trabalhando com padrão B0 ASTM (Figura 35), observa-se uma tendência de crescimento na porcentagem de CO<sub>2</sub>, acompanhando o aumento do volume de biodiesel, concordando com o descrito em (GÖKALP *et al.*, 2009). Contudo, B0 e B5 apresentaram valores muito próximos.



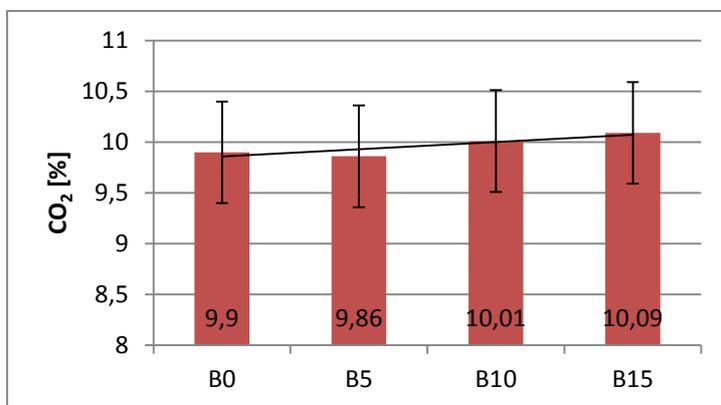
**Figura 35:** Emissões de CO<sub>2</sub> com motor ajustado conforme padrão B0 ASTM

O resultado para o padrão B5 ASTM, da Figura 36, mostra uma tendência de aumento da porcentagem de CO<sub>2</sub> com a maior concentração de biodiesel, também coerente com a expectativa.



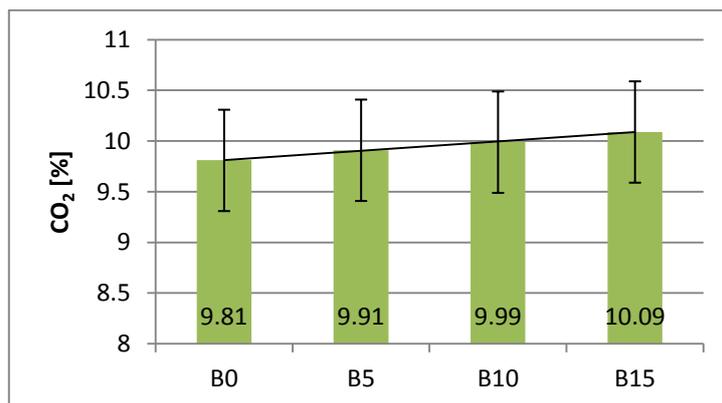
**Figura 36:** Emissões de CO<sub>2</sub> com motor ajustado conforme padrão B5 ASTM

A Figura 37 apresenta tendência de crescimento da porcentagem de CO<sub>2</sub> com o aumento do teor de biodiesel nas amostras, no padrão B5 ASTM. De forma semelhante à Figura 35, os valores para B0 e B5 ficaram muito próximos entre si, porém sem interferir na tendência geral de ascensão.



**Figura 37:** Emissões de CO<sub>2</sub> com motor ajustado conforme padrão B10 ASTM

O padrão B15 ASTM, mostrado na Figura 38, também apresenta tendência de aumento da porcentagem de CO<sub>2</sub>, com o acréscimo de biodiesel.



**Figura 38:** Emissões de CO<sub>2</sub> com motor ajustado conforme padrão B15 ASTM

Para todos os quatro padrões, é interessante notar que as tendências de CO e de CO<sub>2</sub>, com aumento do teor de biodiesel, são opostas. Isto se deve ao fato de que quando o carbono presente no combustível é oxidado, ele deve assumir alguma dessas formas. Quando isto não ocorre, ele faz parte da parcela de hidrocarbonetos não queimados, um outro tipo de poluente.

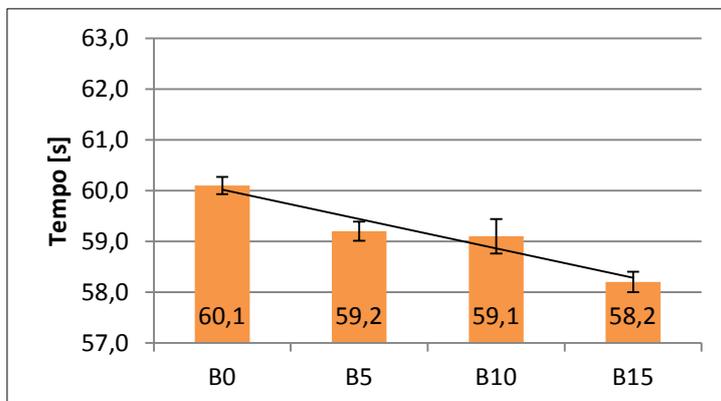
Para o CO<sub>2</sub>, a tendência de aumento das emissões, conforme aumenta o teor de biodiesel, foi bem clara em todos os padrões ASTM. Analisando os quatro gráficos, nota-se uma leve superioridade da porcentagem de todas as misturas trabalhando no padrão B0 ASTM, ou seja, com maiores razões de compressão.

### 7.3 Consumo

O biodiesel possui poder calorífico ligeiramente inferior ao do diesel marítimo, consequentemente, costuma apresentar maior consumo (KALLIGEROS *et al.*, 2003, SOUZA, 2011). Entretanto, o biocombustível pode apresentar consumo específico, que é o consumo relacionado com a potência, similar ao do diesel fóssil, ou até mesmo maior (VOLPATO *et al.*, 2009). Em todo caso, como descrito na seção 6.4, o ensaio não trata de consumo específico, mas apenas de consumo absoluto.

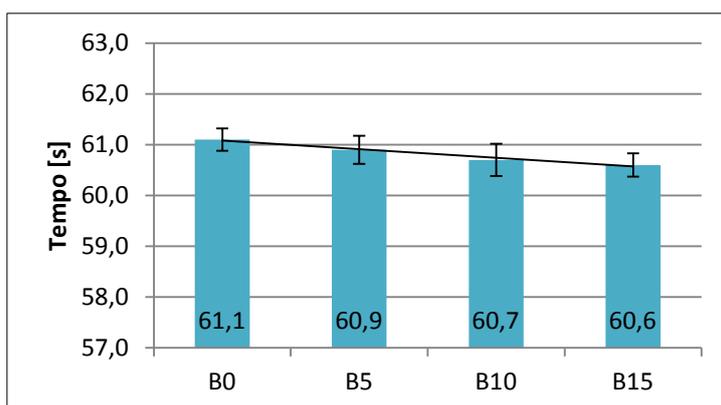
Os resultados dos testes de consumo são apresentados em gráficos que constam do tempo medido para cada amostra consumir 13mL. Esse volume foi contabilizado pela observação da queda do nível de combustível na bureta volumétrica, passando por 13 espaçamentos delimitados por marcações de 1mL. Os gráficos a seguir (Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42) trazem os tempos encontrados para cada amostra. Cada gráfico compara as quatro misturas de combustível para o motor trabalhando sob as mesmas condições padrão ASTM, conforme informam as legendas. Aqui também foi

traçada a curva de ajuste linear dos resultados, para verificar a tendência, e foram utilizadas as mesmas cores correspondentes para os padrões: o padrão B0 é o de cor laranja, padrão B5 de cor azul, padrão B10 de cor bordô e padrão B15 de cor verde.



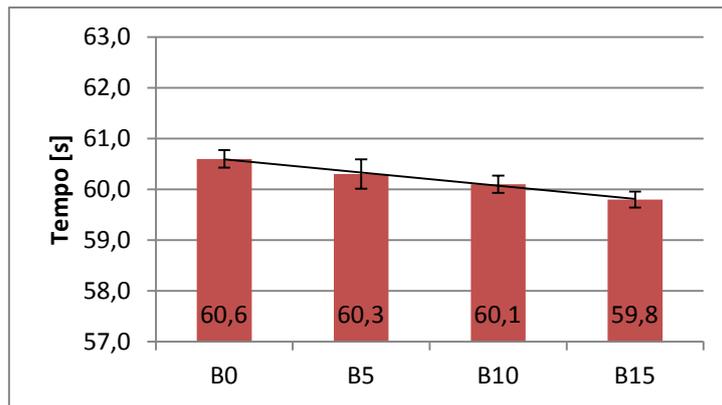
**Figura 39:** Tempo levado para consumir 13mL com motor no padrão B0 ASTM

O gráfico da Figura 39 exibe os resultados para o motor ajustado de acordo com o padrão B0 ASTM. Nota-se que as misturas contendo biodiesel tiveram os 13mL consumidos mais rapidamente que o diesel marítimo puro. Sendo que quanto maior o teor de biodiesel, mais rápido foi o consumo. Portanto, a mistura B15 se mostrou a que foi consumida mais rápido. Considerando que o biodiesel apresenta consumo maior que o diesel marítimo, por conta de seu menor PCS, esse era o resultado esperado (PARENTE, 2003).



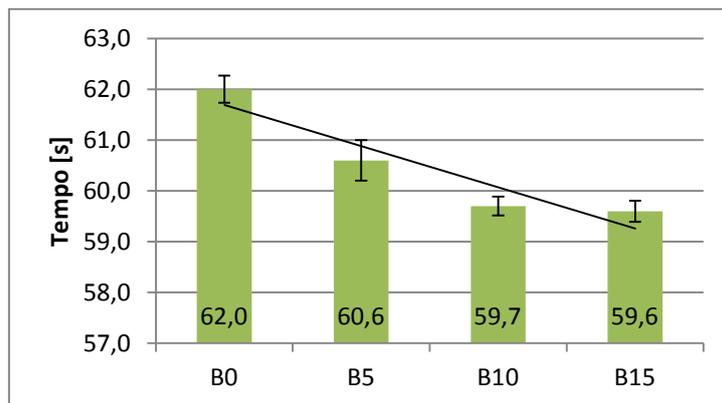
**Figura 40:** Tempo levado para consumir 13mL com motor no padrão B5 ASTM

A Figura 40 apresenta os resultados para o motor trabalhando no padrão ASTM da mistura B5. Novamente nota-se tendência de aumento do consumo à medida que aumenta o teor de biodiesel, em acordo com (PARENTE, 2003).



**Figura 41:** Tempo levado para consumir 13mL com motor no padrão B10 ASTM

A Figura 41 mostra o tempo que as amostras levaram para consumir 13mL, com o motor ajustado no padrão B10 ASTM. Mais uma vez, percebe-se tendência de aumento no consumo de acordo com o aumento do volume de biodiesel contido na mistura, conforme o esperado. A mistura B5 apresentou grande incerteza em relação a seu valor verdadeiro, criando uma faixa de interseção com os valores de B0 e B10, considerando-se suas incertezas. Porém a tendência de queda é mantida.



**Figura 42:** Tempo levado para consumir 13mL com motor no padrão B15 ASTM

Finalizando a comparação do tempo de consumo das amostras trabalhando com o mesmo padrão, a Figura 42 reproduz os resultados experimentais para o padrão B15 ASTM. Dessa vez, nota-se uma clara tendência de aumento no consumo entre as misturas B0, B5 e B10, conforme o teor de biodiesel aumenta. Esta tendência se confirma mesmo levando em consideração a incerteza experimental. Contudo, a mistura B15 apresentou um consumo muito parecido com o da amostra B10, com uma redução pequena no tempo levado para consumir 13mL.

É interessante observar que o padrão B0 ASTM apresenta os menores intervalos de tempo de consumo dos 13mL, quando comparando uma dada amostra trabalhando neste padrão e nos outros padrões (B5, B10 e B15 ASTM). Isto pode ser associado ao

fato do padrão B0 ASTM ser o de maior razão de compressão, conseqüentemente, acarretando em maiores potências e maior demanda de consumo de combustível.

É importante ressaltar que todos os valores medidos para os intervalos de tempo de consumo de 13mL podem ser considerados próximos, independente do conteúdo da amostra ou do padrão do motor, especialmente se forem levadas em conta as incertezas experimentais. Afinal, elas exercem grande influência, sobretudo em se tratando de medições com cronômetros, que dependem diretamente da habilidade e tempo de reação do operador, possuindo grande incerteza associada. Assim sendo, pode-se dizer que o acréscimo de biodiesel, variando de 5 em 5%, não foi grande o suficiente para mudança significativa no consumo das amostras. Além disso, a diferença entre o poder calorífico do biodiesel e do diesel marítimo não é tão elevada. Mesmo assim, os resultados apresentaram tendência geral clara de aumento no consumo das amostras conforme aumentam seus respectivos teores de biodiesel, em acordo com a literatura.

## 8. Conclusões

### 8.1 Conclusões a partir do experimento

A temática abordada neste estudo é extremamente relevante e possui impacto em setores socioeconômicos e ambientais. Seu desenvolvimento representa um passo à frente para a capacitação do Brasil rumo ao desenvolvimento tecnológico, na área de biocombustíveis, e à diversificação de sua matriz energética. Além disso, o tema também possui uma visão estratégica, buscando reduzir a dependência em relação aos combustíveis derivados de petróleo. Assim sendo, seus resultados poderão ser utilizados como ponto de partida para o desenvolvimento de novos estudos, que aprofundem a pesquisa, obtendo resultados ainda mais conclusivos.

Do teste de número de cetano, conclui-se que a adição de biodiesel eleva este indicativo do combustível, melhorando a qualidade de sua ignição. Porém, para o caso das misturas B0 e B5, os 5% em volume a mais de biodiesel não foram capazes de fazer diferença significativa no número de cetano. Os resultados deste ensaio foram satisfatórios, por se encontrarem, em geral, dentro do esperado.

No teste de emissões, não foi possível concluir sobre o  $\text{SO}_2$ , por conta de características do motor, do analisador de gases ou variáveis operacionais, que acabaram por interferir nas medições, tornando-as não conformes. Nas emissões de  $\text{NO}_x$ , observou-se tendência, em geral, de aumento no nível, à medida que o biodiesel cresce nas amostras. Nas emissões de CO, observou-se tendência, em geral, de queda nas emissões, ao se adicionar biodiesel. Para as emissões de  $\text{CO}_2$ , percebeu-se tendência de aumento com a adição de biodiesel.

Com exceção do dióxido de enxofre, os testes de emissões confirmaram o que se encontra na literatura. Os ensaios que apresentaram os melhores resultados foram aqueles feitos no padrão B0 ASTM, provavelmente por ser o combustível que é atualmente utilizado e, conseqüentemente, possuir a regulação de motor mais próxima de um motor diesel convencional, que não oferece possibilidade de ajuste de sua razão de compressão ou de outros parâmetros.

No teste de consumo, as amostras contendo maiores teores de biodiesel foram consumidas mais rapidamente. Logo, a conclusão foi que a adição de biodiesel aumenta o consumo da amostra de combustível. Porém, os intervalos de tempo para as misturas B0, B5, B10 e B15 consumirem 13mL ficaram próximos, para todos os padrões de

motor. Isto indica que a variação não foi significativa para essas porcentagens (de 0, 5, 10 e 15%) de biodiesel. Também cabe a interpretação de que pelo fato do diesel vegetal não apresentar um poder calorífico tão menor que o do diesel marítimo, as diferenças no consumo também não são muito grandes.

## **8.2 Conclusões gerais**

A maioria dos resultados experimentais confirmou as informações obtidas na pesquisa bibliográfica, da qual também se pode tirar conclusões quanto as vantagens e desvantagens de se trabalhar com a mistura dos combustíveis aqui estudados. Observou-se que o uso de biodiesel como um aditivo ao diesel marítimo possui alguns pontos positivos, como a melhora da qualidade da ignição do combustível, através da elevação de seu número de cetano. Em termos ambientais, o biodiesel reduz as emissões de CO, que é um gás tóxico, e de SO<sub>2</sub>, que é altamente poluente e prejudicial aos seres vivos, conforme amplamente comentado na literatura. No aspecto social, o biodiesel ajuda a movimentar a economia, fornecendo maiores opções de mercado para pequenos agricultores, que hoje acabam ficando restritos à comercialização de alimentos.

Por outro lado, a adição de biodiesel gera as desvantagens de maior consumo e maiores emissões de NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>. Entretanto, quando de origem vegetal, o combustível renovável absorve parte do CO<sub>2</sub> emitido ao longo do crescimento da planta, criando um certo crédito de carbono. Além disso, o carbono emitido já se encontrava disponível na natureza, diferente do CO<sub>2</sub> oriundo da combustão de derivados de petróleo, que lançam na atmosfera carbono que já se encontrava inerte desde tempos remotos, causando desequilíbrio ambiental e aumento do efeito estufa. A utilização de biocombustíveis também traz a tona questões como segurança no transporte, dificuldades de armazenamento e de estocagem. Outra questão é o volume de produção. O Brasil deve estar preparado para ter capacidade produtiva de biodiesel suficiente para suprir a demanda de uma regulamentação de, por exemplo, 5% em volume do biocombustível em adição ao diesel marítimo. Felizmente, esse país é rico em extensão territorial agricultável, onde é viável a cultura de vegetais próprios para a fabricação de biodiesel. Porém, deve-se superar o desafio de colocar em funcionamento a grande capacidade produtiva brasileira que se encontra ociosa.

Percebe-se que é um tema vasto e complexo e que tem muito ainda a ser desenvolvido. Porém, seu domínio pode trazer muitos benefícios para a população e para o Brasil.

### **8.3 Sugestões para trabalhos futuros**

Neste trabalho, não foi possível fazer um estudo da influência do aumento do teor de biodiesel misturado ao diesel marítimo, em relação à potência e ao torque do motor variando com a rotação. Isto porque, devido a sua concepção, o motor CFR possui rotação constante (900rpm), logo é complicado variá-la sem fazer adaptações na estrutura e no funcionamento do equipamento. Assim sendo, uma boa oportunidade de desenvolvimento do tema seria estudar o desempenho do motor, trabalhando com as amostras de combustível, em uma bancada devidamente instrumentada, focando em observar o torque e a potência ao longo de variações de rotação.

Outra interessante abordagem seria a respeito do armazenamento do biodiesel. Poderia ser feito um teste mantendo-o confinado em um tanque apropriado e medindo suas propriedades químicas periodicamente, para observar se haverá variação. Ainda melhor se houver a possibilidade de simular um ambiente marítimo para esse estudo, considerando a alta umidade característica.

O teste de consumo também poderia ser refeito em condições diferentes. Poderia ser utilizado um motor no qual seja possível posicionar o tanque de combustível sobre uma balança, para ter a relação de massa de combustível consumida em determinado tempo. Além disso, medir também a potência para obter a relação de consumo específico.

Poderia ser interessante fazer um experimento para averiguar a influência do biodiesel na integridade das peças de um motor. As amostras seriam queimadas em dado intervalo de tempo e o estado das peças do motor seria comparado. Isso indicaria se o biodiesel causa maiores problemas como entupimento do bico injetor e corrosão.

Por fim, como muitas das grandezas medidas ficaram com valores muito próximos, dificultando comparações conclusivas por conta da incerteza experimental, seria interessante refazer testes similares, porém com outras porcentagens de biodiesel em mistura. Porcentagens mais distantes entre si, como B0, B5, B20 e B50, por exemplo.

## 9. Referências Bibliográficas

ABNT, **Biodiesel – Armazenamento, transporte, abastecimento e controle de qualidade de biodiesel e/ou óleo diesel BX**, ABNT NBR 15.512, 2014.

ANP, 2013, **Combustíveis Marítimos Informações Técnicas**, Versão 1.1, Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/>>. Acesso em: 04 jun. 2015.

ANP, 2010, **Manuseio e Armazenamento de Óleo Diesel B – Orientações e Procedimentos**, Ministério de Minas e Energia, Brasil.

ANP, **Biocombustíveis**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?id=470>>. Acesso em: 31 jul. 2015.

ANP, **Biodiesel – Introdução**, Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=73292&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1438568684753>>. Acesso em: 31 jul. 2015.

ASTM, **Standard Test Method for Ignition Quality of Diesel Fuels By the Cetane Method**, ASTM D 613, 1985.

BIODIESELBR, **Diesel marítimo: ainda sem previsão**, Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/revista/027/ainda-sem-previsao.htm>>. Acesso em: 31 jul. 2015.

BOSCH, 2000, **Bombas Injetoras em Linha**, Gerenciamento de motores Diesel, Apostila Técnica, Edição 2000.

BOZBAS, K., 2005, “Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008), pp. 542–552.

BRASIL. Lei Nº 13.033, de 24 de setembro de 2014. Dispõe sobre a adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel comercializado com o consumidor final. Diário Oficial da União DOU, Brasília, DF, 25 set. 2014. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2014/Lei/L13033.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2014/Lei/L13033.htm)>. Acesso em: 27 jan. 2015.

BRASIL. Resolução ANP Nº 42, de 24 de novembro de 2004. Estabelece a especificação de biodiesel. Diário Oficial da União DOU, Brasília, DF, 9 dez. 2004. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2004/novembro/ranp%2042%20-%202004.xml](http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2004/novembro/ranp%2042%20-%202004.xml)>. Acesso em: 27 jan. 2015.

BRASIL. Resolução ANP Nº 45, de 25 de agosto de 2014. Estabelece a especificação de biodiesel. Diário Oficial da União DOU, Brasília, DF, 26 ago. 2014. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2014/agosto/ranp%2045%20-%202014.xml](http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2014/agosto/ranp%2045%20-%202014.xml)>. Acesso em: 6 jun. 2015.

BRASIL. Resolução ANP Nº 50, de 23 de dezembro de 2013. Estabelece as especificações do óleo diesel de uso rodoviário. Diário Oficial da União DOU, Brasília, DF, 24 dez. 2013. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2013/dezembro/ranp%2050%20-%202013.xml?fn=document-frameset.htm\\$f=templates\\$3.0](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2013/dezembro/ranp%2050%20-%202013.xml?fn=document-frameset.htm$f=templates$3.0)>. Acesso em: 04 jun. 2015.

BRASIL. Resolução ANP Nº 52, de 29 de dezembro de 2010. Estabelece as especificações dos combustíveis aquaviários. Diário Oficial da União DOU, Brasília, DF, 30 dez. 2010. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2010/dezembro/ranp%2052%20-%202010.xml](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2010/dezembro/ranp%2052%20-%202010.xml)>. Acesso em: 04 jun. 2015.

ÇENGEL Y.A, Boles M.A., 2006, **Termodinâmica**. 6ª ed. São Paulo. McGraw-Hill.

GELSON, C.S.J., BELCHIOR, C.R.P., 2010, “Simulação Termodinâmica de Motores Diesel Utilizando Óleo Diesel e Biodiesel para Verificação dos Parâmetros de Desempenho e Emissões”, 23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, Rio de Janeiro.

GÖKALP, B., SOYHAN, H.S., SARAC, H.I., *et al.*, 2009, “Biodiesel Addition to Standard Diesel Fuels and Marine Fuels Used in a Diesel Engine: Effects on Emission Characteristics and First and Second-Law Efficiencies”, *Energy & Fuels* 2009, 23, pp. 1849–1857.

GUPTA, H.N., 2013, **Fundamentals of Internal Combustion Engines**, 2ª ed, PHI Learning Private, India.

HEYWOOD, J.B., 1988, **Internal Combustion Engines Fundamentals**, 1ª ed, McGrawHill, EUA.

JORNAL ZERO HORA, **Produção de biodiesel deve crescer 25% no Brasil em 2015**, Disponível em: <<http://zh.clicrbs.com.br/rs/noticias/campo-e-lavoura/noticia/2015/04/producao-de-biodiesel-deve-crescer-25-no-brasil-em-2015-4731798.html>>. Acesso em: 31 jul. 2015.

JUNIOR, D.P.O., 2003, **Motores de combustão interna**, Apostila Técnica, São Paulo: FATEC-SP.

KALLIGEROS, S., ZANNIKOS, F., STOURNAS, S., *et al.*, 2003, “An investigation of using biodiesel/marine diesel blends on the performance of a stationary diesel engine”, *Biomass and Bioenergy* 24 (2003), pp. 141 – 149.

KNOTHE, G., KRAHL, J., GERPEN, J.V., *et al.*, 2006, **Manual de Biodiesel**, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 2006.

LIN, C.Y., LI, R.J., 2009, “Engine performance and emission characteristics of marine fish-oil biodiesel produced from the discarded parts of marine fish”, *Fuel Processing Technology* 90 (2009), pp. 883–888.

OLIVARES, V.M., 2012, **Estudo Experimental do Uso de Misturas de Bicomcombustíveis Em um Motor CFR/ASTM**, Dissertação de Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PARENTE, E.J.S., 2003, **Biodiesel: Uma aventura tecnológica num país engraçado**, 1ª edição, Fortaleza.

RATHMANN, R., BENDETTI, O., PLÁ, J.A., *et al.*, 2005, “Biodiesel: uma Alternativa Estratégica na Matriz Energética Brasileira”. II Seminário de Gestão de Negócios, v. 1.

ROCHA, H.L., 2014, **Estudo Experimental do Uso de Misturas Combustíveis Ternárias em um Motor CFR/ASTM-Cetano**, Dissertação de Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SOUZA, L.S.A., 2011, **Avaliação Experimental do Desempenho de Motores do Ciclo Diesel Utilizando Misturas Biodiesel/Diesel Marítimo**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador.

TAPANES, N.C.O., ARANDA, D.A.G., PEREZ, R.S., *et al.*, 2013, “Biodiesel no Brasil: Matérias Primas e Tecnologias de Produção”, *Acta Scientiae & Technicae*, Volume 1, Number 1, Feb. 2013.

TESTO, 2003, **Short Operation Instruction Manual: Testo 350 M/XL**, Rev. 11/03 Instrument Software Version 1.30, Flanders-NJ.

VALENTE, O.S., 2007, **Desempenho de um motor e gerador de energia elétrica operando com biodiesel**, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

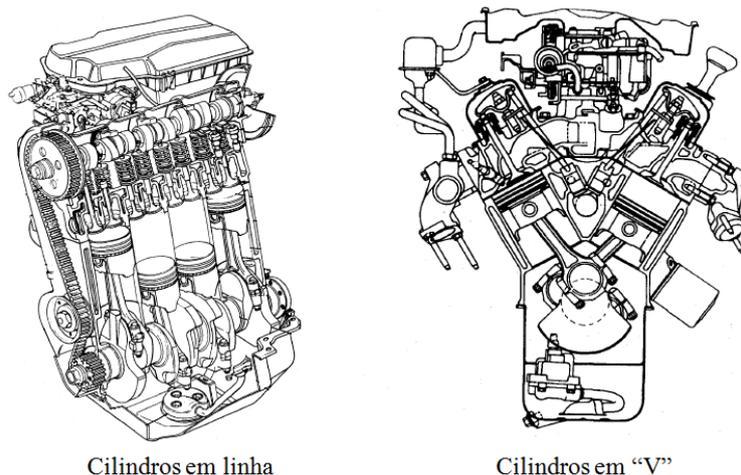
VOLPATO, C.E.S., CONDE, A.P., BARBOSA, J.A., *et al.*, 2009, “Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B 100)”, *Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 33, n. 4, pp. 1125-1130, jul./ago. 2009.

# Apêndice A – Motores: aspectos gerais

## Disposição dos cilindros

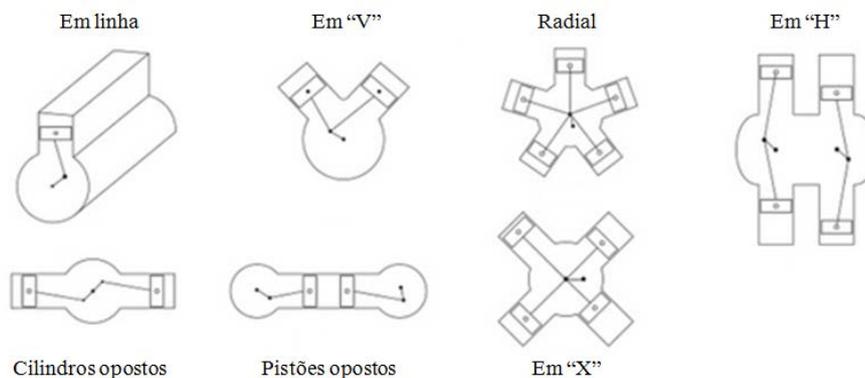
O tamanho dos cilindros de um motor possui limitações ditadas por condições dinâmicas, como as forças de inércia criadas pela constante aceleração e desaceleração do pistão e da biela, durante o movimento alternativo. É desejável que essas forças de inércia sejam canceladas, para melhor balanceamento do motor. Uma estratégia para conseguir uma condição de funcionamento mais suave é fazer uma escolha adequada do número e do arranjo dos cilindros no motor (HEYWOOD, 1988).

Usualmente, há três configurações possíveis para organizar os cilindros dentro do motor. Eles podem estar dispostos: em linha, em “V” ou opostos (JUNIOR, 2003). A Figura 43 mostra exemplos de motores com cilindros dispostos em linha e em “V”.



**Figura 43:** Exemplos da disposição dos cilindros em motores (HEYWOOD, 1988)

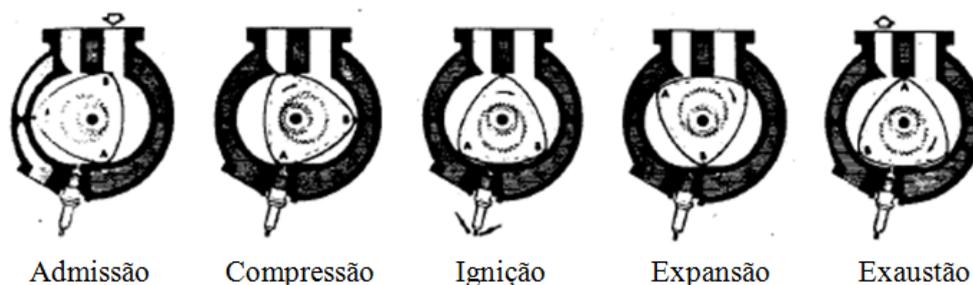
Outras possíveis configurações, porém menos comuns, podem ser visualizadas na Figura 44.



**Figura 44:** Possíveis configurações dos cilindros de um MCI (GUPTA, 2013)

## Movimento característico

Em motores de combustão interna, existem dois tipos básicos de movimento: o rotativo e o alternativo. O exemplo clássico de motor rotativo é o Wankel, que possui um rotor em forma de triângulo com faces abauladas girando excentricamente no interior de uma carcaça. Este tipo de motor trabalha em quatro tempos, passando pelas mesmas etapas que um motor alternativo (HEYWOOD, 1988). A Figura 45 ilustra o movimento rotativo do rotor de um motor Wankel e também como ele opera em quatro tempos.



**Figura 45:** Os quatro tempos do motor rotativo Wankel (HEYWOOD, 1988)

O motor alternativo é aquele que trabalha através do movimento de pistões em um cilindro. Este motor é utilizado em automóveis e, no caso deste trabalho, também é usado um motor alternativo para os ensaios.

## Número de cursos do pistão por ciclo motor

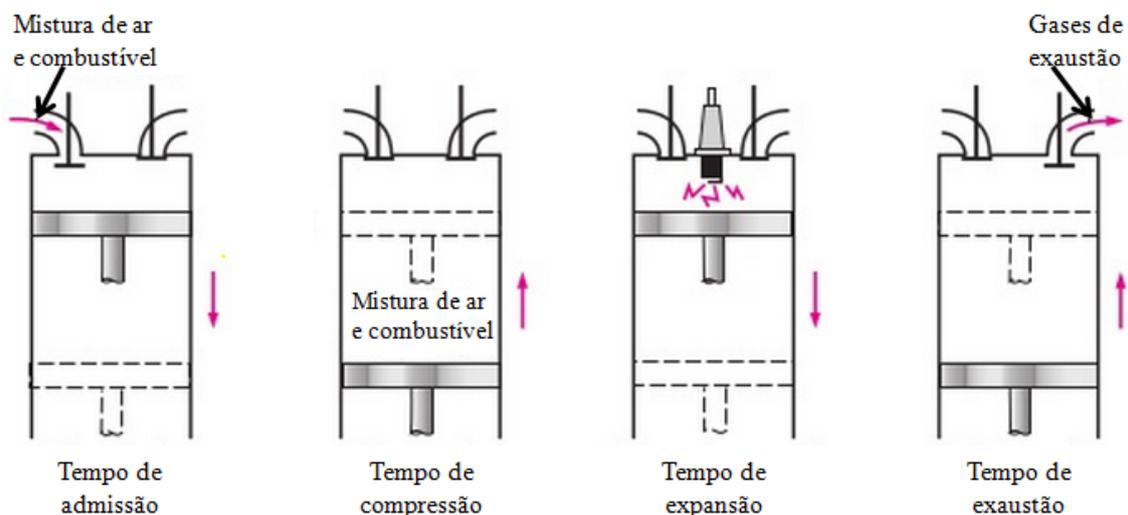
Como já ilustrado na Figura 5, um curso compreende a distância entre o PMI e o PMS. Já o ciclo motor é o conjunto de quatro eventos necessários à combustão, sendo eles: admissão, compressão, expansão e exaustão. Esses eventos podem ocorrer em quatro ou em dois tempos (ÇENGEL, 2006).

A maioria dos motores alternativos trabalha com ciclos de quatro tempos, requerendo duas subidas e descidas do pistão, ou duas revoluções do virabrequim, para completar a sequência de eventos que gera potência. As quatro fases de um ciclo são explicadas a seguir para um motor Otto de quatro tempos (HEYWOOD, 1988):

- **Admissão:** começa com o pistão localizado no PMS e termina com ele no PMI. Durante esta etapa, a válvula de admissão se abre para permitir a entrada de mistura ar-combustível (HEYWOOD, 1988) – ou apenas ar, no caso de motores de ignição por compressão (ÇENGEL, 2006).

- **Compressão:** a válvula de admissão se fecha para que, com a subida do pistão, a mistura seja comprimida, aumentando sua pressão e temperatura. Isto faz com que a combustão se inicie (HEYWOOD, 1988). Para motores Otto, como no caso da Figura 46, ao final da compressão (início da expansão) a vela dispara uma centelha nos gases comprimidos dando início a combustão, porém, nos motores Diesel, isto não acontece, não há a presença de vela de ignição (ÇENGEL, 2006).
- **Expansão:** esta etapa começa com o pistão no PMS e termina com ele no PMI. Os gases de combustão, a alta temperatura e pressão, empurram o pistão para baixo, forçando a manivela a girar e produzindo trabalho útil. Quando é atingido o PMI, a válvula de exaustão se abre (HEYWOOD, 1988).
- **Exaustão:** o pistão volta a subir e os gases resultantes da combustão são expulsos do cilindro, saindo pela válvula de exaustão. Quando ele atinge o PMS, a válvula de exaustão se fecha, dando lugar a abertura da válvula de admissão, para o início de um novo ciclo (HEYWOOD, 1988).

A Figura 46 apresenta esquematicamente o que acontece no interior do cilindro de um motor operando a ciclo Otto, em quatro tempos. Seu primeiro exemplar foi desenvolvido em 1876, por Nicolaus Otto (HEYWOOD, 1988).

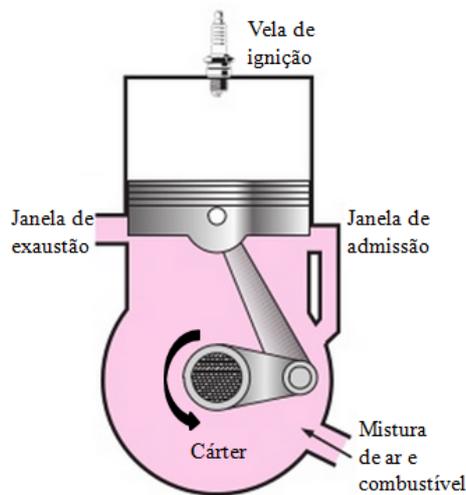


**Figura 46:** Os quatro tempos para um motor alternativo Otto (ÇENGEL, 2006)

Existem também ciclos motores compostos de apenas dois tempos. Isto significa que os quatro eventos, que compõem um ciclo, possuem apenas um tempo motor e um tempo de compressão (ÇENGEL, 2006). O motor de dois tempos foi desenvolvido para obter uma potência maior para um dado tamanho de motor e um projeto de válvulas simplificado. Ele é aplicável a motores tanto de ignição por compressão como por

centelha (HEYWOOD, 1988). A Figura 47 mostra um esquema de um motor alternativo de dois tempos, cujos tempos são detalhados a seguir (HEYWOOD, 1988):

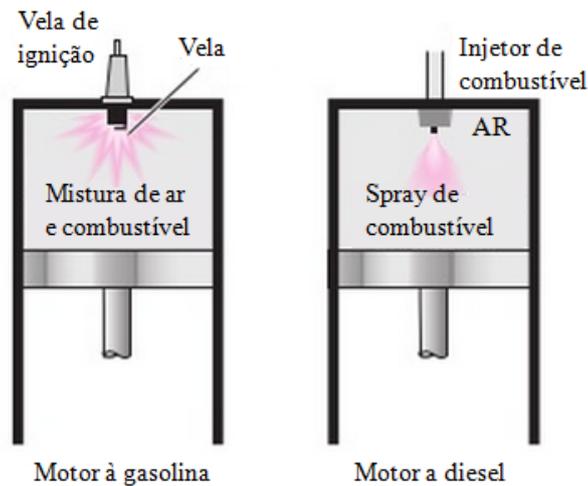
- **Compressão:** começa com o fechamento das janelas de admissão e exaustão, pelo movimento do pistão. Assim, é comprimido o conteúdo do cilindro e é permitida a entrada de mistura ar-combustível. Quando o pistão alcança o PMS, a combustão é iniciada.
- **Expansão:** o pistão é empurrado para baixo pelos gases à alta pressão e temperatura, descobrindo inicialmente a válvula de exaustão, para saída dos gases, e posteriormente a de admissão, para entrada de nova mistura ar-combustível, impulsionada pelo movimento do pistão, que a comprime no cárter.



**Figura 47:** Esquema de um motor alternativo de dois tempos (ÇENGEL, 2006)

## Tipos de ignição

A ignição em motores pode acontecer de duas formas: por centelha ou por compressão. A ignição por centelha é característica dos motores a gasolina, que trabalham com ciclo Otto. Já a ignição por compressão é comum a motores que trabalham com ciclo Diesel, em geral, alcançando maiores razões de compressão. A Figura 48 representa, de forma simplificada, a ignição para os dois casos.



**Figura 48:** Diferenças da ignição em motores Otto e Diesel (ÇENGEL, 2006)

Entre as diferenças principais entre essas duas formas, temos que em motores de ignição por centelha, o ar e o combustível estão misturados no sistema de admissão antes da entrada no cilindro (HEYWOOD, 1988) e a mistura é comprimida a uma temperatura inferior à de autoignição do combustível. Além disso, há a presença de uma vela de ignição, que libera a centelha, dando início a combustão (ÇENGEL, 2006). Motores Diesel, por sua vez, admitem apenas ar e o combustível somente é injetado pouco antes do início da combustão (HEYWOOD, 1988). A compressão acontece até que a temperatura do combustível fique acima de sua temperatura de autoignição, neste momento, combustível é pulverizado, isto é, injetado em pequenas gotículas, como em um spray, diretamente dentro do cilindro. O contato entre o ar quente e o combustível atomizado faz com que a mistura entre em combustão. Neste caso, não existe vela, apenas um bico injetor de combustível (ÇENGEL, 2006).

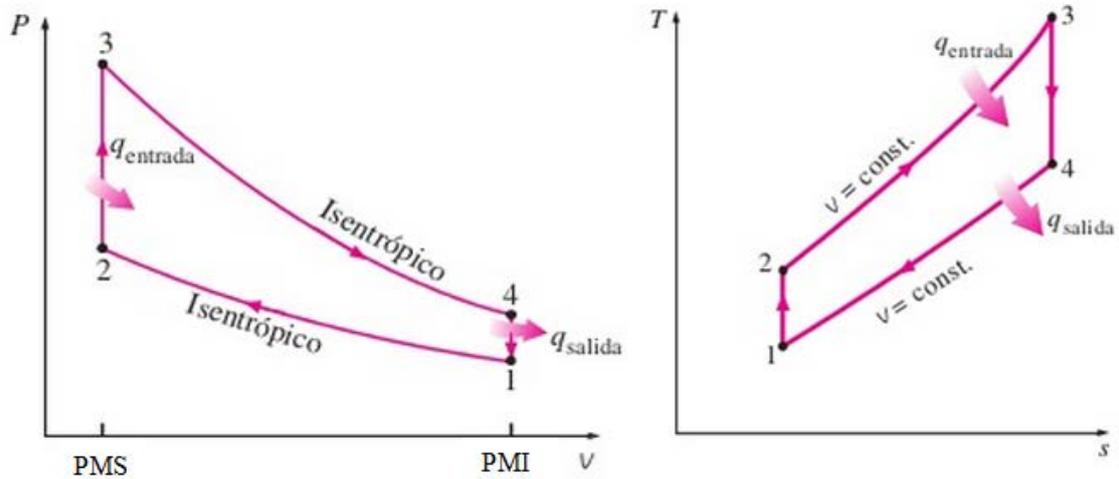
## Tipos de ciclos termodinâmicos

Existem alguns tipos de ciclos para motores térmicos além dos já citados – como o Stirling e o Ericsson – porém, aqui serão apenas comentados os ciclos Otto e Diesel. Para uma análise termodinâmica simplificada dos ciclos, consideram-se as hipóteses do padrão a ar (ÇENGEL, 2006):

- Ar como fluido de trabalho, circulando internamente em volume fechado e podendo ser modelado como um gás ideal;
- Processos internamente reversíveis;
- Combustão modelada como uma adição de calor;

- Exaustão modelada como uma rejeição de calor, após a qual o fluido restaura seu estado inicial.

A Figura 49 traz os gráficos P-v e T-s para um ciclo Otto ideal.

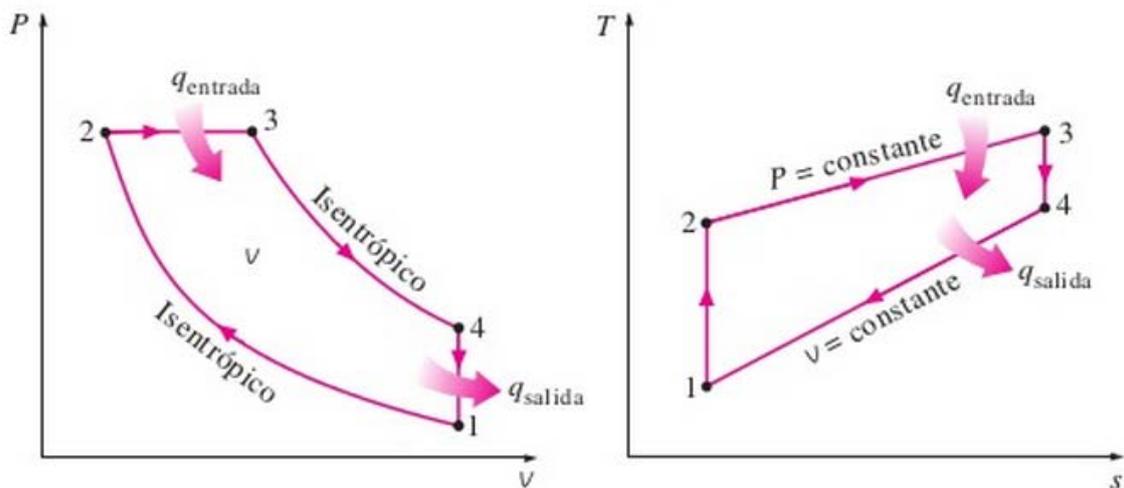


**Figura 49:** Ciclo Otto ideal (ÇENGEL, 2006)

O ciclo Otto ideal é simplificado como os seguintes processos (ÇENGEL, 2006):

- **1-2:** Compressão isentrópica
- **2-3:** Fornecimento de calor a volume constante
- **3-4:** Expansão isentrópica
- **4-1:** Rejeição de calor a volume constante

A Figura 50 traz os gráficos P-v e T-s para um ciclo Diesel ideal.



**Figura 50:** Ciclo Diesel ideal (ÇENGEL, 2006)

O ciclo Diesel ideal é simplificado como os seguintes processos (ÇENGEL, 2006):

- **1-2:** Compressão isentrópica
- **2-3:** Fornecimento de calor a pressão constante
- **3-4:** Expansão isentrópica
- **4-1:** Rejeição de calor a volume constante

Nota-se que a única diferença entre os diagramas dos ciclos Otto e Diesel está no processo 1-2, que compreende os tempos de admissão e compressão. Isto ocorre por conta das diferenças nos processos de ignição de ambos os ciclos. A combustão em motores de ignição por compressão ocorre em um intervalo de tempo maior, fazendo com que a combustão seja modelada como um processo de fornecimento de calor a pressão constante, não mais a volume constante, como acontece em motores de centelha (ÇENGEL, 2006).

# Apêndice B – Certificado Biodiesel Agropalma

	<b>COPPEComb</b>														
	<b>CENTRO DE PESQUISAS E CARACTERIZAÇÃO DE PETRÓLEO E COMBUSTÍVEIS</b>														
<b>CERTIFICADO DE ENSAIO</b>															
Emissão: 10/02/2010	Revisão: 00	DQC-009	Página 1 de 1												
SOLICITANTE: LMT			Data da Solicitação 04/10/2011												
Endereço:															
Amostra: B100 AGROPALMA Nov.2009		Volume recebido: 01 litro													
<b>RESULTADOS</b>															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Características</th> <th>Norma Utilizada</th> <th>Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Viscosidade Cinemática a 40°C, mm<sup>2</sup>/s</td> <td>ASTM D7042</td> <td>4,551</td> </tr> <tr> <td>Índice de Acidez, mgKOH/g</td> <td>ASTM D664</td> <td>0,71</td> </tr> <tr> <td>Estabilidade Oxidativa a 110° C, h</td> <td>EN ISO12185</td> <td>5,94</td> </tr> </tbody> </table>				Características	Norma Utilizada	Resultado	Viscosidade Cinemática a 40°C, mm <sup>2</sup> /s	ASTM D7042	4,551	Índice de Acidez, mgKOH/g	ASTM D664	0,71	Estabilidade Oxidativa a 110° C, h	EN ISO12185	5,94
Características	Norma Utilizada	Resultado													
Viscosidade Cinemática a 40°C, mm <sup>2</sup> /s	ASTM D7042	4,551													
Índice de Acidez, mgKOH/g	ASTM D664	0,71													
Estabilidade Oxidativa a 110° C, h	EN ISO12185	5,94													
Obs:															
Emissão:	28/10/2011														
		<b>Marcileny B. Porto</b> <b>Gerente Técnico</b> <b>CRQ 3ª 03415130</b>													
<b>Responsável Técnico: Beatriz Cohen Chaves ( CRQ 3ª - 033017198 )</b>															
Os resultados reportados neste documento referem-se a amostra ensaiada. Dúvidas e sugestões, favor contactar o responsável pela aprovação deste documento. UFRJ/COPPE/PEQ/COPPEComb Av.: Pedro Calmon, s/nº Prédio anexo ao CT - Cidade Universitária - Ilha do Fundão CEP.: 21949-900 Telefone: 2562-8153															

# Apêndice C – Dados técnicos Testo 350XL

Probe type	Temperature	O <sub>2</sub>	CO (H <sub>2</sub> compensated)	COlow	CO <sub>2</sub>	NO	NOlow
<b>Measuring range</b>	-40... +2192 °F	0... +25 Vol.% O <sub>2</sub>	0... +10000 ppm CO	0... +500 ppm CO	0... CO <sub>2</sub> max Vol.% CO <sub>2</sub>	0... +3000 ppm NO	0... +300 ppm NO
<b>Accuracy ± 1 digit</b>	<33 °F (-40... +212 °F) <0.5% m.v. (+212...+2192 °F)	±0.8% of f.v. (0...+25 Vol.%O <sub>2</sub> )	±5% of mv (+100...+2000 ppm CO) ±10% of mv (+2001...+10000 ppm CO) ±10 ppm CO (0...+99 ppm CO)	±5% of mv (+40...+500 ppm CO) ±2 ppm CO (0...+39.9 ppm CO)	Calculated from O <sub>2</sub>	±5% of mv (+100...+1999.9 ppm NO) ±10% of mv (+2000...+3000 ppm NO) ±5 ppm NO (0...+99 ppm NO)	±5% of mv (+40... +300 ppm NO) ±2 ppm NO (0...+39.9 ppm NO)
<b>Resolution</b>		0.1 Vol.% (0... +25 Vol. O <sub>2</sub> )	1 ppm CO (0...+10000 ppm CO)	0.1 ppm CO (0...+500 ppm CO)	0.01 Vol. % CO <sub>2</sub>	1 ppm NO (0...+3000 ppm NO)	0.1 ppm NO (0...+300 ppm NO)
<b>Reaction time</b>		20 s	40 s	40 s	20 s	30 s	30 s
<b>Reaction type</b>		t95	t90	t90	t95	t90	t90
<b>Probe type</b>	<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>Efficiency</b>	<b>Flue gas loss</b>	<b>Differential pressure 1</b>	<b>Differential pressure 2</b>	<b>Flow Velocity</b>
<b>Measuring range</b>	0... +500 ppm NO <sub>2</sub>	0... +5000 ppm SO <sub>2</sub>	0... +120 %	-20... +99.9 % qA	± 80" H <sub>2</sub> O	± 16" H <sub>2</sub> O	0... 7900 ft/min
<b>Accuracy ± 1 digit</b>	±5% of mv (+100... +500 ppm NO <sub>2</sub> ) ±5 ppm NO <sub>2</sub> (0...+99.9 ppm NO <sub>2</sub> )	±5% of mv (+100...+2000 ppm SO <sub>2</sub> ) ±10% of mv (+2001...+5000 ppm SO <sub>2</sub> ) ±5 ppm SO <sub>2</sub> (0...+99 ppm SO <sub>2</sub> )			<1% of m.v. (-20" ...-80" H <sub>2</sub> O) <1% of m.v. (+20" ...+80" H <sub>2</sub> O) <0.5% (-19" ...+19" H <sub>2</sub> O)	<1% of m.v. (-16" ...1.2" H <sub>2</sub> O) <1% of m.v. (+16" ...+1.2" H <sub>2</sub> O) <0.5% (-1.2" ...+1.2" H <sub>2</sub> O)	
<b>Resolution</b>	0.1 ppm NO <sub>2</sub> (0... +500 ppm NO <sub>2</sub> )	1 ppm SO <sub>2</sub> (0...+5000 ppm SO <sub>2</sub> )	0.1 % (0... +120 %)	0.1 % qA (-20...+99.9 % qA)	0.01" H <sub>2</sub> O	0.01" H <sub>2</sub> O	10 ft/min
<b>Reaction time</b>	40 s	30 s					
<b>Reaction type</b>	t90	t90					

## Apêndice D – Propagação de Incertezas

### Incerteza do volume a ser aferido na proveta de 250mL

Já que a calibração da proveta está sendo aferida, não se pode considerar a incerteza da proveta pela sua resolução. Por isso, para o cálculo da incerteza do volume aferido da proveta, considera-se a fórmula pela qual o volume pode ser calculado:

$$V_p = \frac{m_{MQ}}{\rho_{0MQ}}$$

onde:  $\rho_{0MQ}$  – massa específica nominal da água Milli-Q

$m_{MQ}$  – massa de água Milli-Q indicada pela balança, para o volume a ser aferido

A água milli-Q, que foi cedida pelo Laboratório GreenTec – UFRJ, possui massa específica nominal de:

$$\rho_{0MQ} = (1,00952 \pm 0,00002)g/mL$$

Assim, a equação que traz a incerteza do volume aferido na proveta é:

$$\sigma_{V_p}^2 = \left( \frac{\partial V_p}{\partial \rho_{0MQ}} \right)^2 \sigma_{\rho_{0MQ}}^2 + \left( \frac{\partial V_p}{\partial m_{MQ}} \right)^2 \sigma_m^2$$
$$\sigma_{V_p}^2 = \left( -\frac{m_{MQ}}{\rho_{0MQ}^2} \right)^2 \sigma_{\rho_{0MQ}}^2 + \left( \frac{1}{\rho_{0MQ}} \right)^2 \sigma_m^2$$

onde:  $\sigma_m$  – incerteza da massa indicada pela balança

$\sigma_{\rho_{0MQ}}$  – incerteza da massa específica nominal da água Milli-Q

Substituindo essa equação com os valores correspondentes, chega-se a:

$$\sigma_{V_p}^2 = \left( -\frac{250,0}{1,00952^2} \right)^2 0,00002^2 + \left( \frac{1}{1,00952} \right)^2 0,1^2$$

$$\sigma_{V_p} = 0,1mL$$

### Incerteza da massa específica calculada da água Milli-Q

A massa específica da água Milli-Q, calculada para aferir a calibração da proveta, é dada pela seguinte equação:

$$\rho_{MQ} = \frac{m_{MQ}}{V_p}$$

onde:  $V_p$  – volume a ser aferido na proveta de 250mL

$m_{MQ}$  – massa de água Milli-Q indicada pela balança, para o volume aferido

Assim sendo, a relação para o cálculo da incerteza da massa específica calculada da água Milli-Q é:

$$\sigma_{\rho_{MQ}}^2 = \left( \frac{\partial \rho_{MQ}}{\partial m_{MQ}} \right)^2 \sigma_m^2 + \left( \frac{\partial \rho_{MQ}}{\partial V_p} \right)^2 \sigma_{V_p}^2$$

$$\sigma_{\rho_{MQ}}^2 = \left( \frac{1}{V_p} \right)^2 \sigma_m^2 + \left( \frac{-m_{MQ}}{V_p^2} \right)^2 \sigma_{V_p}^2$$

onde:  $\sigma_m$  – incerteza da massa indicada pela balança

$\sigma_{V_p}$  – incerteza do volume sendo aferido

Substituindo os valores encontrados no experimento, obtém-se:

$$\sigma_{\rho_{MQ}}^2 = \left( \frac{1}{250,0} \right)^2 0,1^2 + \left( \frac{-250,0}{250,0^2} \right)^2 0,1^2$$

$$\sigma_{\rho_{MQ}} = 0,1 \text{ g/mL}$$

## **Incerteza da massa específica calculada do diesel marítimo**

O cálculo da massa específica do diesel marítimo é semelhante ao da massa específica da água Milli-Q:

$$\rho_{DM} = \frac{m_{DM}}{V_p}$$

onde:  $V_p$  – volume aferido na proveta

$m_{DM}$  – massa de diesel marítimo indicada pela balança, para o volume aferido

Assim sendo, a relação para o cálculo da incerteza da massa específica calculada para o diesel marítimo é:

$$\sigma_{\rho_{DM}}^2 = \left( \frac{\partial \rho_{DM}}{\partial m_{DM}} \right)^2 \sigma_m^2 + \left( \frac{\partial \rho_{DM}}{\partial V_p} \right)^2 \sigma_{V_p}^2$$

$$\sigma_{\rho_{DM}}^2 = \left(\frac{1}{V_p}\right)^2 \sigma_m^2 + \left(\frac{-m_{DM}}{V_p^2}\right)^2 \sigma_{V_p}^2$$

onde:  $\sigma_m$  – incerteza da massa indicada pela balança

$\sigma_{V_p}$  – incerteza do volume aferido

Substituindo os valores encontrados no experimento, obtém-se:

$$\sigma_{\rho_{DM}}^2 = \left(\frac{1}{250,0}\right)^2 0,1^2 + \left(\frac{-214,4}{250,0}\right)^2 0,1^2$$

$$\sigma_{\rho_{DM}} = 0,09 \text{ g/mL}$$

### **Incerteza da massa específica calculada do biodiesel**

Para o cálculo da incerteza da massa específica do biodiesel, o caminho é semelhante ao da incerteza anterior. A massa específica do biodiesel vem da seguinte fórmula:

$$\rho_B = \frac{m_B}{V_p}$$

onde:  $V_p$  – volume aferido na proveta

$m_B$  – massa de biodiesel indicada pela balança, para o volume aferido

Assim sendo, a relação para o cálculo da incerteza da massa específica calculada para o biodiesel é:

$$\sigma_{\rho_B}^2 = \left(\frac{\partial \rho_B}{\partial m_B}\right)^2 \sigma_m^2 + \left(\frac{\partial \rho_B}{\partial V_p}\right)^2 \sigma_{V_p}^2$$

$$\sigma_{\rho_B}^2 = \left(\frac{1}{V_p}\right)^2 \sigma_m^2 + \left(\frac{-m_B}{V_p^2}\right)^2 \sigma_{V_p}^2$$

onde:  $\sigma_m$  – incerteza da massa indicada pela balança

$\sigma_{V_p}$  – incerteza do volume a ser aferido

Substituindo os valores encontrados no experimento, obtém-se:

$$\sigma_{\rho_B}^2 = \left(\frac{1}{250,0}\right)^2 0,1^2 + \left(\frac{-216,8}{250,0}\right)^2 0,1^2$$

$$\sigma_{\rho_B} = 0,09 \text{ g/mL}$$

## Incertezas dos Números de Cetano

As incertezas dos valores finais de número de cetano, para as quatro amostras (B0, B5, B10 e B15), foram baseadas nos valores de repetibilidade do método descrito pela norma ASTM D 613, os quais são apresentados na Figura 51.

**TABLE 2 Cetane Number Repeatability and Reproducibility Limits**

Average Cetane Number Level <sup>A</sup>	Repeatability Limits, Cetane Number	Reproducibility Limits Cetane Number
40	0.8	2.8
44	0.9	3.3
48	0.9	3.8
52	0.9	4.3
56	1.0	4.8

<sup>A</sup> Values for cetane numbers intermediate to those listed above, may be obtained by linear interpolation.

**Figura 51:** Repetibilidade e reprodutibilidade do método (ASTM, 1985)

## Incertezas das Emissões

Para as emissões, o cálculo de incertezas foi baseado nas informações do manual técnico contido no Apêndice C – Dados técnicos Testo 350XL. Elas fornecem os valores de resolução e acurácia, para cada um dos poluentes. Como a resolução e acurácia de um instrumento de medição possuem erros embutidos, a incerteza final foi calculada através da incerteza combinada desses dois parâmetros. Da seguinte forma:

$$\sigma_{combinada,a} = \sqrt{\sigma_{ac}^2 + \sigma_{res,a}^2}$$

onde:  $\sigma_{combinada,a}$  – é a incerteza combinada do analisador de gases, para um dado poluente

$\sigma_{ac}$  – é a acurácia para determinado poluente, fornecida pelo manual

$\sigma_{res,a} = \frac{ResA}{\sqrt{12}}$  – é a incerteza devido à resolução do analisador de gases, para determinado poluente, fornecida pelo manual

Assim sendo, obtém-se as seguintes incertezas:

- NO<sub>x</sub> [ppm]:

$$\sigma_{combinada,a} = \sqrt{\sigma_{ac}^2 + \sigma_{res,a}^2} = \sqrt{(0,05 \times \text{valor em ppm})^2 + \left(\frac{0,1}{\sqrt{12}}\right)^2}$$

- CO [ppm]:

$$\sigma_{combinada,a} = \sqrt{\sigma_{ac}^2 + \sigma_{res,a}^2} = \sqrt{(0,05 \times \text{valor em ppm})^2 + \left(\frac{0,1}{\sqrt{12}}\right)^2}$$

- CO<sub>2</sub> (%):

$$\sigma_{combinada,a} = \sqrt{\sigma_{ac}^2 + \sigma_{res,a}^2} = \sqrt{(0,05 \times \text{valor em ppm})^2 + \left(\frac{0,01}{\sqrt{12}}\right)^2}$$

Nota-se que para cada um dos diferentes valores de cada poluente, haverá uma incerteza diferente. Isto porque a acurácia é 5% do valor medido.

### **Incerteza do Consumo**

Para o consumo, também é calculada a incerteza combinada, levando em consideração a incerteza da resolução do cronometro e a incerteza tipo A, que leva em conta o desvio padrão da média aritmética das medições. Os valores de desvio padrão utilizados encontram-se nas tabelas do Apêndice H – Dados do Teste de Consumo. Assim sendo, a fórmula para o cálculo das incertezas dos tempos de consumo é:

$$\sigma_{combinada,c} = \sqrt{\sigma_{tipoA}^2 + \sigma_{res,c}^2}$$

onde:  $\sigma_{combinada,c}$  – é a incerteza combinada do cronômetro

$\sigma_{tipoA} = \frac{DP}{\sqrt{n}}$  – é a incerteza que leva em conta os desvios padrões das medições

$\sigma_{res,c} = \frac{Res}{\sqrt{12}}$  – é a incerteza associada à resolução do cronômetro

Para todos os valores medidos, a resolução é a mesma, pois ela só depende do instrumento. Logo:

$$\sigma_{res,c} = \frac{Res}{\sqrt{12}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,03s$$

Os desvios padrões variam para os diferentes resultados de consumo. Logo, cada um pode apresentar diferentes valores para a incerteza tipo A.

# Apêndice E – Números de Cetano tabelados

POSIÇÃO DO VOLANTE x Nº DE CETANO DO MOTOR CFR DO LMT(UFRJ / COPPE)				
LEITURAS COM OS PADRÕES	POSIÇÃO DO VOLANTE	NÚMERO DE CETANO ESTIMADO	NÚMERO DE CETANO COM PADRÕES	DIFERENÇA EM PERCENTUAL
<b>1</b>	<b>900</b>	<b>21,5</b>	<b>21,5</b>	<b>0,00%</b>
	910	21,7		
	920	21,9		
	930	22,2		
	940	22,4		
	950	22,6		
	960	22,8		
	970	23,1		
	980	23,3		
	990	23,5		
	1000	23,7		
	1010	23,9		
	1020	24,2		
	1030	24,4		
	1040	24,6		
	1050	24,8		
	1060	25		
	1070	25,2		
	1080	25,4		
	1090	25,6		
	1100	25,8		
	1110	25,9		
	1120	26,1		
	1130	26,3		
	1140	26,5		
	1150	26,6		
	1160	26,8		
	1170	26,9		
	1180	27,1		
<b>2</b>	<b>1187</b>	<b>27,2</b>	<b>27,1</b>	<b>&gt;0,4%</b>
	1190	27,2		
	1200	27,3		
	1210	27,5		
	1220	27,6		
	1230	27,7		
	1240	27,9		
	1250	28		
	1260	28,1		
	1270	28,3		
	1280	28,4		
	1290	28,6		
	1300	28,8		
	1310	29		
	1320	29,2		
	1330	29,4		
	1340	29,7		
	1350	29,9		
	1360	30,2		
	1370	30,5		
	1380	30,9		
	1390	31,3		
	1400	31,7		
	1410	32,1		
	1420	32,6		
	1430	33,1		
<b>3</b>	<b>1437</b>	<b>33,3</b>	<b>32,7</b>	<b>&gt;1,8%</b>
	1440	33,6		
	1450	34,2		

LEITURAS COM OS PADRÕES	POSIÇÃO DO VOLANTE	NÚMERO DE CETANO ESTIMADO	NÚMERO DE CETANO COM PADRÕES	DIFERENÇA EM PERCENTUAL
	1460	34,8		
	1470	35,5		
	1480	36,3		
	1490	37,2		
	1500	38,2		
<b>4</b>	<b>1503</b>	<b>38,5</b>	<b>38,3</b>	<b>&gt;0,5%</b>
	1510	39,3		
	1520	40,4		
	1530	41,6		
	1540	42,8		
<b>5</b>	<b>1545</b>	<b>43,4</b>	<b>43,4</b>	<b>0,00%</b>
	1550	43,9		
	1560	45		
	1570	46,1		
	1580	47,4		
	1590	48,8		
<b>6</b>	<b>1596</b>	<b>49,8</b>	<b>49,5</b>	<b>&gt;0,6%</b>
	1600	50,5		
	1610	52,5		
	1620	54,4		
<b>7</b>	<b>1622</b>	<b>54,8</b>	<b>55,1</b>	<b>&lt;0,5%</b>
	1630	56,1		
	1640	57,6		
	1650	58,8		
	1660	59,8		
<b>8</b>	<b>1667</b>	<b>60,5</b>	<b>60,8</b>	<b>&lt;0,5%</b>
	1670	60,8		
	1680	61,7		
	1690	62,5		
	1700	63,3		
	1710	64,1		
	1720	65		
	1730	65,7		
<b>9</b>	<b>1740</b>	<b>66,4</b>	<b>66,4</b>	<b>0,00%</b>
	1750	67,2		
	1760	68		
	1770	68,8		
	1780	69,5		
	1790	70,3		
	1800	71		
<b>10</b>	<b>1807</b>	<b>71,4</b>	<b>72,0</b>	<b>&lt;0,8%</b>
	1810	71,5		
	1820	72,1		
	1830	72,6		
	1840	73		
	1850	73,3		
	1860	73,6		
	1870	73,9		
	1880	74,1		
	1890	74,3		
	1900	74,4		
	1910	74,5		
	1920	74,6		
	1930	74,7		
	1940	74,7		
	1950	74,7		
	1960	74,8		
<b>11</b>	<b>1964</b>	<b>74,8</b>	<b>74,8</b>	<b>0,00%</b>

## Apêndice F – Dados do Teste Número de Cetano

Neste apêndice encontram-se os dados coletados para cada um dos parâmetros do motor durante a obtenção dos números de cetano das amostras de combustível. As médias aritméticas, após aplicação do critério de Chauvenet também estão disponíveis.

Diesel Marítimo - 100% (cuba 2)	Amostra B0 (Diesel Marítimo Puro)					Média	DP
	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	5º Ensaio		
	24/06/15	24/06/15	26/06/15	26/06/15	29/06/15		
Operadores	Laura Faria / Eng. Nauberto Pinto						
Temp. do ar de admissão (°F)	135	148	148	148	148	<b>145,4</b>	<b>5,8</b>
Temp. do bico injetor (°F)	100	101	101	99	101	<b>100,4</b>	<b>0,9</b>
Temp. do óleo lubrificante (°F)	114	116	98	112	110	<b>110,0</b>	<b>7,1</b>
Tempo de consumo 13mL (s)	59,5	59,5	59	60	60,5	<b>59,7</b>	<b>0,6</b>
Posição da cremalheira	700	700	700	710	705	<b>703,0</b>	<b>4,5</b>
Posição do avanço da injeção	1217	1218	1202	1199	1203	<b>1207,8</b>	<b>9,0</b>
Posição do volante	1520	1524	1550	1530	1535	<b>1531,8</b>	<b>11,7</b>
Número de Cetano	40,4	40,9	43,9	41,6	42,2	<b>41,8</b>	<b>1,36</b>

Biodiesel – 5% Diesel Marítimo - 95% (cuba 1)	Amostra B5			Média	DP
	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio		
	26/06/15	26/06/15	29/06/15		
Operadores	Laura Faria / Eng. Nauberto Pinto				
Temp. do ar de admissão (°F)	148	150	149	<b>149</b>	<b>1</b>
Temp. do bico injetor (°F)	99	99	100	<b>99,3</b>	<b>0,6</b>
Temp. do óleo lubrificante (°F)	112	110	106	<b>109,3</b>	<b>3,1</b>
Tempo de consumo 13mL (s)	60,7	60,7	61,2	<b>60,9</b>	<b>0,3</b>
Posição da cremalheira	710	710	710	<b>710</b>	<b>0</b>
Posição do avanço da injeção	1280	1182	1194	<b>1218,7</b>	<b>53,5</b>
Posição do volante	1530	1530	1535	<b>1531,7</b>	<b>2,9</b>
Número de Cetano	41,6	41,6	42,2	<b>41,8</b>	<b>0,35</b>

<b>Biodiesel – 10% Diesel Marítimo – 90% (cuba 1)</b>	<b>Amostra B10</b>		<b>Média</b>	<b>DP</b>
	1º Ensaio	2º Ensaio		
	26/06/15	29/06/15		
<b>Operador</b>	Laura Faria / Eng. Nauberto Pinto			
<b>Temp. do ar de admissão (°F)</b>	148	149	<b>148,5</b>	<b>0,7</b>
<b>Temp. do bico injetor (°F)</b>	100	99	<b>99,5</b>	<b>0,7</b>
<b>Temp. do óleo lubrificante (°F)</b>	114	104	<b>109,0</b>	<b>7,1</b>
<b>Tempo de consumo 13mL (s)</b>	60,4	60,1	<b>60,3</b>	<b>0,2</b>
<b>Posição da cremalheira</b>	710	710	<b>710</b>	<b>0</b>
<b>Posição do avanço da injeção</b>	1200	1285	<b>1242,5</b>	<b>60,1</b>
<b>Posição do volante</b>	1545	1535	<b>1540,0</b>	<b>7,1</b>
<b>Número de Cetano</b>	43,4	42,2	<b>42,8</b>	<b>0,85</b>

<b>Biodiesel – 15% Diesel Marítimo – 85% (cuba 2)</b>	<b>Amostra B15</b>		<b>Média</b>	<b>DP</b>
	1º Ensaio	2º Ensaio		
	26/06/15	29/06/15		
<b>Operador</b>	Laura Faria / Eng. Nauberto Pinto			
<b>Temp. do ar de admissão (°F)</b>	148	149	<b>148,5</b>	<b>0,7</b>
<b>Temp. do bico injetor (°F)</b>	100	100	<b>100</b>	<b>0</b>
<b>Temp. do óleo lubrificante (°F)</b>	120	100	<b>110,0</b>	<b>14,1</b>
<b>Tempo de consumo 13mL (s)</b>	59,8	60,4	<b>60,1</b>	<b>0,4</b>
<b>Posição da cremalheira</b>	708	708	<b>708</b>	<b>0</b>
<b>Posição do avanço da injeção</b>	1297	1180	<b>1238,5</b>	<b>82,7</b>
<b>Posição do volante</b>	1557	1550	<b>1553,5</b>	<b>4,9</b>
<b>Número de Cetano</b>	44,7	43,9	<b>44,3</b>	<b>0,54</b>

## Apêndice G – Dados do Teste de Emissões

Nas tabelas abaixo, encontram-se os dados coletados nos 16 testes de emissões. A última linha de cada tabela, em negrito, representa o valor final utilizado nos gráficos, que é a média entre as três linhas anteriores. Vale lembrar que foram analisados em gráficos apenas os poluentes: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e CO<sub>2</sub>.

<b>Amostra B0 (Padrão ASTM)</b>									
<b>Ensaio 1</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> (%)	<b>CO</b> (ppm)	<b>CO<sub>2i</sub></b> (%)	<b>NO</b> (ppm)	<b>NO<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>FT</b> (°C)	<b>NO<sub>x</sub></b> (ppm)	<b>SO<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>H<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>CO<sub>2</sub></b> (%)
6,95	360	10,36	927	20,5	23,8	986	0	32	10,23
6,88	376	10,43	937	37,5	23,9	965	0	36	10,27
6,9	374	10,44	938	30,5	24,3	971	0	37	10,28
<b>6,91</b>	<b>370</b>	<b>10,41</b>	<b>934</b>	<b>29,5</b>	<b>24,0</b>	<b>974</b>	<b>0</b>	<b>35</b>	<b>10,26</b>

<b>Amostra B5 (Condição padrão ASTM para B0)</b>									
<b>Ensaio 2</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> (%)	<b>CO</b> (ppm)	<b>CO<sub>2i</sub></b> (%)	<b>NO</b> (ppm)	<b>NO<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>FT</b> (°C)	<b>NO<sub>x</sub></b> (ppm)	<b>SO<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>H<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>CO<sub>2</sub></b> (%)
6,94	365	10,47	983	38,1	26	987	0	35	10,63
6,9	359	10,42	978	26,1	26,3	1009	0	26	10,13
6,89	356	10,43	979	29,1	26,5	986	0	29	9,93
<b>6,91</b>	<b>360</b>	<b>10,44</b>	<b>980</b>	<b>31,1</b>	<b>26,3</b>	<b>994</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>10,23</b>

<b>Amostra B10 (Condição padrão ASTM para B0)</b>									
<b>Ensaio 3</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> (%)	<b>CO</b> (ppm)	<b>CO<sub>2i</sub></b> (%)	<b>NO</b> (ppm)	<b>NO<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>FT</b> (°C)	<b>NO<sub>x</sub></b> (ppm)	<b>SO<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>H<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>CO<sub>2</sub></b> (%)
7,1	347	10,25	970	39,6	26,4	1002	0	29	11,01
7,03	355	10,24	963	29,6	26,7	1016	0	34	10,01
7,05	354	10,29	965	31,6	26,9	1021	0	33	10,21
<b>7,06</b>	<b>352</b>	<b>10,26</b>	<b>966</b>	<b>33,6</b>	<b>26,7</b>	<b>1013</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>10,41</b>

<b>Amostra B15 (Condição padrão ASTM para B0)</b>									
<b>Ensaio 4</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> (%)	<b>CO</b> (ppm)	<b>CO<sub>2i</sub></b> (%)	<b>NO</b> (ppm)	<b>NO<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>FT</b> (°C)	<b>NO<sub>x</sub></b> (ppm)	<b>SO<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>H<sub>2</sub></b> (ppm)	<b>CO<sub>2</sub></b> (%)
7,15	336	10,25	939	30,9	25,8	1036	10	33	10,24
7,04	329	10,3	950	29,9	26,1	1053	10	40	10,64
7,08	331	10,29	949	37,9	26,2	1040	10	35	10,74
<b>7,09</b>	<b>332</b>	<b>10,28</b>	<b>946</b>	<b>32,9</b>	<b>26,0</b>	<b>1043</b>	<b>10</b>	<b>36</b>	<b>10,54</b>

<b>Amostra B15 (Padrão ASTM)</b>									
<b>Ensaio 5</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,55	364	9,92	1067	33,5	25,2	1122	7	21	10,19
7,6	356	9,87	1053	50,5	25,5	1101	8	29	9,79
7,59	357	9,85	1054	43,5	25,7	1110	9	28	10,29
<b>7,58</b>	<b>359</b>	<b>9,88</b>	<b>1058</b>	<b>42,5</b>	<b>25,5</b>	<b>1111</b>	<b>8</b>	<b>26</b>	<b>10,09</b>

<b>Amostra B0 (Condição padrão ASTM para B15)</b>									
<b>Ensaio 6</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,3	331	10,09	1048	29	24,4	1116	12	28	10,11
7,37	343	10,01	1064	45	24,5	1097	12	23	9,61
7,32	334	10,02	1047	43	24,8	1099	17	21	9,71
<b>7,33</b>	<b>336</b>	<b>10,04</b>	<b>1053</b>	<b>39,0</b>	<b>24,6</b>	<b>1104</b>	<b>14</b>	<b>24</b>	<b>10,81</b>

<b>Amostra B5 (Condição padrão ASTM para B15)</b>									
<b>Ensaio 7</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,56	349	9,94	1031	49	25,9	1087	18	26	10,41
7,49	330	9,89	1045	32	26	1064	19	21	9,51
7,48	332	9,96	1029	36	26,3	1065	22	19	9,81
<b>7,51</b>	<b>337</b>	<b>9,93</b>	<b>1035</b>	<b>39,0</b>	<b>26,1</b>	<b>1072</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>9,91</b>

<b>Amostra B10 (Condição padrão ASTM para B15)</b>									
<b>Ensaio 8</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,64	307	9,81	1042	47,6	25,2	1087	26	26	10,09
7,57	314	9,84	1027	31,6	25,4	1086	27	27	10,19
7,62	297	9,9	1039	45,6	25,6	1061	30	22	9,69
<b>7,61</b>	<b>306</b>	<b>9,85</b>	<b>1036</b>	<b>41,6</b>	<b>25,4</b>	<b>1078</b>	<b>28</b>	<b>25</b>	<b>9,99</b>

<b>Amostra B10 (Padrão ASTM)</b>									
<b>Ensaio 9</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,5	347	9,86	1008	54,1	24,5	1072	17	25	10,41
7,54	332	9,91	1022	39,1	24,6	1050	18	15	9,71
7,61	341	9,93	1018	45,1	25	1058	20	17	9,91
<b>7,55</b>	<b>340</b>	<b>9,90</b>	<b>1016</b>	<b>46,1</b>	<b>24,7</b>	<b>1060</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>10,01</b>

<b>Amostra B0 (Condição padrão ASTM para B10)</b>									
<b>Ensaio 10</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,27	321	10,09	1052	34	25,2	1118	19	15	10,2
7,22	333	10,07	1047	51	25,5	1117	22	13	10
7,26	324	10,14	1060	41	25,6	1101	23	20	9,5
<b>7,25</b>	<b>326</b>	<b>10,10</b>	<b>1053</b>	<b>42,0</b>	<b>25,4</b>	<b>1112</b>	<b>21</b>	<b>16</b>	<b>9,9</b>

<b>Amostra B15 (Condição padrão ASTM para B10)</b>									
<b>Ensaio 11</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,6	332	9,81	1000	46,3	25,5	1033	29	22	13,09
7,62	329	9,86	994	47,3	25,6	1027	31	24	5,09
7,67	338	9,85	982	36,3	25,9	1051	34	17	12,09
<b>7,63</b>	<b>333</b>	<b>9,84</b>	<b>992</b>	<b>43,3</b>	<b>25,7</b>	<b>1037</b>	<b>31</b>	<b>21</b>	<b>10,09</b>

<b>Amostra B5 (Condição padrão ASTM para B10)</b>									
<b>Ensaio 12</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,38	341	9,96	966	30,8	25,4	1025	45	27	9,66
7,47	358	10,01	977	50,8	25,6	1004	46	37	9,76
7,44	351	9,97	970	37,8	26	1023	50	29	10,16
<b>7,43</b>	<b>350</b>	<b>9,98</b>	<b>971</b>	<b>39,8</b>	<b>25,7</b>	<b>1017</b>	<b>47</b>	<b>31</b>	<b>9,86</b>

<b>Amostra B5 (Padrão ASTM)</b>									
<b>Ensaio 13</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,58	326	9,82	973	39,4	25,6	1032	38	26	9,86
7,57	343	9,91	990	34,4	25,7	1054	39	19	9,46
7,5	327	9,88	983	50,4	26,1	1040	41	24	9,96
<b>7,55</b>	<b>332</b>	<b>9,87</b>	<b>982</b>	<b>41,4</b>	<b>25,8</b>	<b>1042</b>	<b>39</b>	<b>23</b>	<b>9,76</b>

<b>Amostra B0 (Condição padrão ASTM para B5)</b>									
<b>Ensaio 14</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,26	348	10	944	31,5	27,2	986	42	28	10,18
7,31	334	10,02	959	48,5	27,4	968	47	19	9,28
7,27	347	10,07	950	35,5	27,6	983	49	22	9,58
<b>7,28</b>	<b>343</b>	<b>10,03</b>	<b>951</b>	<b>38,5</b>	<b>27,4</b>	<b>979</b>	<b>46</b>	<b>23</b>	<b>9,68</b>

<b>Amostra B15 (Condição padrão ASTM para B5)</b>									
<b>Ensaio 15</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,73	293	9,74	981	47,3	27,8	1033	33	20	10,23
7,75	282	9,79	967	32,3	27,9	1011	37	22	9,73
7,8	280	9,78	971	41,3	28,1	1010	39	15	10,43
<b>7,76</b>	<b>285</b>	<b>9,77</b>	<b>973</b>	<b>40,3</b>	<b>27,9</b>	<b>1018</b>	<b>36</b>	<b>19</b>	<b>10,13</b>

<b>Amostra B10 (Condição padrão ASTM para B5)</b>									
<b>Ensaio 16</b>					<b>Data da medição: 01/06/2015</b>				
<b>O<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CO</b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2i</sub></b> <b>(%)</b>	<b>NO</b> <b>(ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>FT</b> <b>(°C)</b>	<b>NO<sub>x</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>H<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>
7,55	326	9,88	956	51,1	27,1	999	47	26	9,74
7,6	313	9,81	939	31,1	27,2	996	49	27	10,14
7,59	321	9,83	949	38,1	27,4	978	51	19	9,64
<b>7,58</b>	<b>320</b>	<b>9,84</b>	<b>948</b>	<b>40,1</b>	<b>27,2</b>	<b>991</b>	<b>49</b>	<b>24</b>	<b>9,84</b>

## Apêndice H – Dados do Teste de Consumo

Neste apêndice, encontram-se as tabelas com os valores dos intervalos de tempos das três repetições coletadas para os testes de consumo.

<b>Condição Padrão Amostra B0</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>	<b>Tempo médio [s]</b>	<b>Desvio Padrão [s]</b>
<b>B0</b>	60.2	60.0	60.1	<b>60.1</b>	0.1
<b>B5</b>	59.2	59.3	59.2	<b>59.2</b>	0.1
<b>B10</b>	59.4	59.1	58.8	<b>59.1</b>	0.3
<b>B15</b>	58.1	58.4	58.1	<b>58.2</b>	0.2

<b>Condição Padrão Amostra B5</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>	<b>Tempo médio [s]</b>	<b>Desvio Padrão [s]</b>
<b>B0</b>	60.8	61.2	61.2	<b>61.1</b>	0.2
<b>B5</b>	60.7	61.1	60.9	<b>60.9</b>	0.2
<b>B10</b>	60.4	60.8	60.9	<b>60.7</b>	0.3
<b>B15</b>	60.6	60.8	60.4	<b>60.6</b>	0.2

<b>Condição Padrão Amostra B10</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>	<b>Tempo médio [s]</b>	<b>Desvio Padrão [s]</b>
<b>B0</b>	60.5	60.6	60.7	<b>60.6</b>	0.1
<b>B5</b>	60.1	60.4	60.4	<b>60.3</b>	0.2
<b>B10</b>	60.0	60.2	60.1	<b>60.1</b>	0.1
<b>B15</b>	59.8	59.8	59.9	<b>59.8</b>	0.1

<b>Condição Padrão Amostra B15</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>	<b>Tempo médio [s]</b>	<b>Desvio Padrão [s]</b>
<b>B0</b>	61.9	62.2	61.9	<b>62.0</b>	0.2
<b>B5</b>	60.2	60.9	60.7	<b>60.6</b>	0.4
<b>B10</b>	59.6	59.9	59.6	<b>59.7</b>	0.2
<b>B15</b>	59.8	59.6	59.5	<b>59.6</b>	0.2