



## USO DO BIODIESEL EM MOTORES MARÍTIMOS PARA A NAVEGAÇÃO

Gabriel Alves Romero

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

Orientadores: Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior, D.Sc. e Prof. Marcelo José Colaço, D.Sc.

Rio de Janeiro

Abril de 2013

# USO DO BIODIESEL EM MOTRES MARÍTIMOS PARA A NAVEGAÇÃO

Gabriel Alves Romero

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

Examinado por:

---

Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior, D.Sc

---

Prof. Marcelo José Colaço, D.Sc

---

Prof. Manuel Ernani de Carvalho Cruz, PhD

---

Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro  
Pinto, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2013

Romero, Gabriel Alves

Uso de Biodiesel em Motores Marítimos para a Navegação  
Projeto/ Gabriel Alves Romero. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola  
Politécnica, 2013.

VIII, 51 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Carlos Rodrigues Pereira Belchior e Marcelo  
José Colaço.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de  
Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 38-40.

1. Motor Diesel Marítimo. 2. Biocombustíveis. 3. Biodiesel. 4.  
Análise de Performance. 5. Análise de Emissões. I. Belchior,  
Carlos Rodrigues Pereira. Colaço, Marcelo José II. Universidade  
Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia  
Mecânica. III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos ao Professor Su Jian e aos amigos do laboratório LASME pelo companheirismo e primeiros ensinamentos em Engenharia.

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

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

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

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

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

Uso do biodiesel em motores marítimos para a navegação

Gabriel Alves Romero

Abril/2013

Orientadores: Carlos Rodrigues Pereira Belchior e Marcelo José Colaço.

Curso: Engenharia Mecânica

Este trabalho propõe a avaliação técnica e operacional da utilização do biodiesel como combustível em motores diesel marítimos. No Brasil, a utilização da mistura entre biodiesel e diesel mineral em motores é permitida para veículos terrestres. Contudo, a falta de confiabilidade do biodiesel em ambiente marítimo tornou proibida sua utilização, até que as condições técnico-operacionais para uso seguro da mistura estiverem estabelecidas. É inegável a importância dos motores ciclo diesel na rede de transportes fluvial e marítima brasileira, e do biodiesel como alternativa à substituição parcial do óleo diesel. Porém, ensaios em motores de combustão interna são necessários para validação do uso de misturas de biodiesel ao diesel de origem mineral.

*Palavras-chave:* Motor diesel marítimo, Biocombustível, Biodiesel, Análise de Performance, Análise de Emissões.

# Índice

Lista de Figuras .....	vii
<b>Nomenclatura.....</b>	<b>viii</b>
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Biocombustíveis - O biodiesel.....	1
1.2. Motivação .....	1
1.3. Objetivo .....	5
Capítulo 2 - Revisão da Literatura.....	6
2.1. Biodiesel em Motores Diesel.....	6
2.2. Biodiesel de Soja Motores Diesel Marítimos - Gökalp et al. (2008) .....	8
2.3. Biodiesel de Óleo de Cozinha em Pequenos Motores Diesel Marítimos - A.P.Roskilly et al. (2007).....	10
2.4. Biodiesel de Peixe em Motores Marítimos - Cherng-Yuan Lin et. al. (2009) .....	13
Capítulo 3 - Aparato Experimental.....	15
3.1. Motor Utilizado .....	15
3.2. Dinamômetro e outros Equipamentos .....	16
3.3. Sistema de Controle e Aquisição de Dados.....	17
3.4. Analisador dos Gases de Exaustão .....	18
3.5. Cálculo das Incertezas .....	18
Capítulo 4 - Metodologia dos Testes.....	21
4.1. Combustíveis Utilizados.....	21
4.2. Definição dos Pontos de Medição .....	22
4.3. Teste .....	24
4.4. Tratamento dos Dados de Performance e Emissões .....	24
Capítulo 5 - Resultados e Discussão .....	26

5.1. Temperatura dos Gases de Exaustão .....	26
5.2. Consumo Específico de Combustível.....	27
5.3. Eficiência Global .....	30
5.4. Emissões de NO <sub>x</sub> .....	30
5.5. Emissões de CO <sub>2</sub> .....	32
5.6. Emissões de O <sub>2</sub> .....	34
Capítulo 6 - Conclusão .....	36
Capítulo 7 - Referências Bibliográficas .....	38
Apêndice A - Tabelas dos Testes de Performance do Motor .....	41
Apêndice B - Tabelas das Médias dos Testes de Performance do Motor .....	45
Apêndice C - Tabelas dos Testes de Emissões .....	46
Apêndice D - Tabelas das Médias dos Testes de Emissões .....	49
Apêndice E - Tabelas das Incertezas para os Testes de Performance e Emissões .....	50
Apêndice F - Dados do Dinamômetro .....	51

## Lista de Figuras

Figura 3.1 – Motor Scania DI12 59 M acoplado ao dinamômetro.....	15
Figura 3.2 – Dinamômetro da AVL. ....	16
Figura 3.3 – Controle e monitoração dos parâmetros pelo software AVL PUMA OPEN...	17
Figura 3.4 – Analisador dos gases de exaustão.....	18
Figura 4.1 – Curva Potência x Rotação.....	23
Figura 4.2 – Interface do AVL PUMA OPEN no modo automático. ....	24
Figura 5.1 – Temperatura dos gases de exaustão. ....	27
Figura 5.2 – Consumo Específico de Combustível. ....	28
Figura 5.3 – Consumo de Combustível .....	29
Figura 5.4 – Emissões de NO <sub>x</sub> .....	32
Figura 5.5 – Emissões de CO <sub>2</sub> .....	33
Figura 5.6 – Emissões de O <sub>2</sub> .....	34



## Nomenclatura

$Ac$	Percentagem de aceleração do motor.
$CEC$	Consumo Específico de Combustível. [g / kWh]
$PCI$	Poder Calorífico Inferior. [kJ/kg]
$PCI_v$	Poder Calorífico Inferior em base volumétrica. [GJ/m <sup>3</sup> ]
$PCS$	Poder Calorífico Superior. [kJ/kg]
$P_e$	Potência no eixo do motor. [kW]
$P_{atm}$	Pressão atmosférica. [bar]
$P_{adm}$	Pressão manométrica de admissão do ar no cilindro. [bar]
$P_c$	Pressão do combustível. [bar]
$P_o$	Pressão do óleo. [bar]
$Rot$	Rotação do motor. [rpm]
$T_{atm}$	Temperatura do ar atmosférico. [°C]
$T_{adm}$	Temperatura de admissão. [°C]
$T_e$	Temperatura dos gases de exaustão. [°C]
$T_o$	Temperatura do óleo. [°C]
$Torque$	Torque do motor. [Nm]
$V_c$	Vazão mássica de combustível. [kg/s]
$\eta_g$	Eficiência global do motor.
$\rho$	Massa específica. [kg/m <sup>3</sup> ]

# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1. Biocombustíveis - O biodiesel

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

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

## 1.2. Motivação

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

frota de veículos terrestres, e álcool do bagaço da cana na gasolina. O biodiesel foi introduzido na matriz energética brasileira com a publicação da lei 11.097/2005. A partir da publicação dessa lei, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) foi elaborado através de uma parceria entre um grupo de trabalho interministerial, encarregado de apresentar estudos sobre a viabilidade de utilização de óleo vegetal para produção de biodiesel. Os estudos de viabilidade foram coordenados pelo Ministério de Ciência e Tecnologia, e em janeiro de 2008 iniciou-se a obrigatoriedade da adição de 2% de biodiesel ao óleo diesel. Essa proporção foi aumentada em janeiro de 2010 para 5% de biodiesel, fazendo que os veículos abastecidos em território brasileiro utilizem um combustível com 95% de óleo diesel e 5% de biodiesel. Contudo, apesar do incentivo governamental aos biocombustíveis, a adição de biodiesel ao óleo diesel marítimo para a utilização em motores para navegação ainda não é regulamentado em nosso país.

Segundo a Agência Nacional do Petróleo existem características críticas requeridas para o combustível marítimo [1]. Todas essas características devem ser atendidas para que a mistura de biodiesel ao diesel marítimo seja permitida em nosso país. Essas características são:

1. Estabilidade em longos períodos de armazenamento.
2. Baixa miscibilidade com a água.
3. Propriedades químicas, de ignição e combustão.
4. Resistente a contaminação microbológica - Maior dificuldade segundo ANP.
5. Compatibilidade com o material da embarcação - Não corrosivo.
6. Atendimento a legislação ambiental.

Em relação as características acima, pode-se correlaciona-las com os estudos realizados sobre a utilização do biodiesel em ambiente marítimo pela U.S. Maritime Administration (MARAD) [2]. Esses estudos concluíram que:

1. O biodiesel degrada duas vezes mais rápido que o diesel comum, o que obriga o seu consumo mais rápido após o abastecimento.
2. O biodiesel não deve ser utilizado com tanques de lastro, por sua tendência para absorver a umidade. O tanque de lastro é responsável por manter a estabilidade do navio e se localiza na parte inferior do casco do navio, abaixo da linha d'água. Esse

tanque usualmente é repleto de água do mar ou combustível, utilizando o último quando se necessita aumentar a autonomia da embarcação.

3. O biodiesel tem menor poder calorífico que o diesel de petróleo, resultando no aumento do consumo de combustível. Isso afeta a autonomia dos navios, pois com a mesma quantidade de combustível, a embarcação abastecida com biodiesel percorrerá uma menor distância ao consumi-lo completamente.
4. A ação solvente do biodiesel libera resíduos no fundo do tanque e obstrui os filtros, levando a trocas mais constantes desses filtros.
5. O tratamento do combustível com biocida deve ser aplicado sempre que houver suspeita de que foi adicionado biocombustível ao combustível recebido para aplicações marítimas. No entanto, não há nenhuma especificação nem normas internacionais para o uso de biocidas em biodiesel para aplicações marítimas.
6. O cobre não é compatível com algumas misturas de biodiesel. Muitas embarcações de navegação interior e costeira têm redes de combustível de cobre. Problemas com a estabilidade do biodiesel no armazenamento causa deteriorização das borrachas de vedação, das mangueiras, juntas e selos, principalmente em embarcações antigas.
7. O biodiesel não contém enxofre em sua composição, e assim reduz as emissões de SO<sub>x</sub> em relação ao atual diesel marítimo com altos níveis de enxofre.

O Brasil, por ser um país com grande extensão de costa marítima e cortado por rios e afluentes, tem grande potencial para transportar pessoas, alimentos e outros produtos utilizando embarcações de pequeno porte e navios. Desta forma, é de grande importância estratégica e econômica que haja estudos técnicos e operacionais que viabilizem a utilização do biodiesel em motores diesel marítimos. Recentemente, o biodiesel tem recebido atenção significativa tanto como um possível combustível alternativo renovável e como um aditivo ao diesel marítimo. Muitas pesquisas têm mostrado que as emissões de particulados, hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono e níveis de enxofre são significativamente menores nos gases de exaustão quando se utiliza biodiesel em motores para navegação. Segundo matéria publicada no Wall Street Journal em Dezembro de 2009, o óleo diesel marítimo queimado pela indústria de transporte marítimo é responsável por 3% à 5% do total de emissão de carbono na atmosfera, contribuindo para o efeito estufa [2].

Além disso, algumas características conferem ao biodiesel importância técnica, ambiental e econômica, são elas [1, 2] :

- O biodiesel é energia renovável. As terras cultiváveis podem produzir uma enorme variedade de oleaginosas como fonte de matéria-prima para o biodiesel. Segundo ANP um dos princípios do marco regulatório para produção de biodiesel é o aproveitamento das oleaginosas de acordo com as diversidades regionais, fortalecendo as potencialidades de cada região para produção da matéria-prima.
- É constituído por carbono neutro, ou seja, o combustível tem origem renovável ao invés da fóssil. Desta forma, sua obtenção e queima contribuem menos para o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera.
- Apresenta excelente lubricidade, fato que vem ganhando importância com a utilização do diesel de baixo teor de enxofre, cuja lubricidade é parcialmente perdida durante o processo de produção.
- Possui um alto ponto de fulgor, conferindo ao biodiesel manuseio e armazenamento mais seguros.
- Nenhuma modificação nos atuais motores do tipo ciclo diesel faz-se necessária para misturas de biodiesel com diesel de até 20% (B20), sendo que percentuais acima de 20% requerem avaliações mais elaboradas do desempenho do motor.

Em muitos países tem se estudado a performance e as emissões dos gases de exaustão de motores à diesel marítimos usando misturas de biodiesel. Contudo, um dos grandes entraves que existem para utilização de biodiesel misturado ao óleo diesel em motores marítimos é a falta de confiabilidade do motor diesel sujeito a essa mistura. Esse entrave é agravado pelas condições extremas que uma embarcação está sujeita, por exemplo: uma pane do motor em alto mar é extremamente perigosa. Por isso, a Resolução nº52 da ANP publicada em 29 de dezembro de 2010 proíbe a adição de biodiesel ao óleo diesel para utilização em motores marítimos, até que as condições técnico-operacionais para uso seguro da mistura estiverem estabelecidas. É do interesse da ANP que essa barreira técnica seja removida e permita a disseminação do uso do biodiesel aos combustíveis aquaviários. E é a finalidade e motivação do presente trabalho, a contribuição

para o aumento da confiabilidade dessa mistura através de ensaios em motores diesel marítimos.

### **1.3. Objetivo**

É inegável a importância dos motores ciclo diesel na rede de transportes fluvial e marítima brasileira, e do biodiesel como alternativa à substituição parcial do óleo diesel. Contudo, ensaios em motores de combustão interna são necessários para validação do uso de misturas de biodiesel ao diesel de origem mineral. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é pesquisar e estudar a viabilidade técnica e operacional da utilização de biodiesel em motores diesel marítimos.

## Capítulo 2 - Revisão da Literatura

### 2.1. Biodiesel em Motores Diesel

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

Segundo Grando et al. [3], a crescente demanda por combustíveis renováveis como alternativa aos combustíveis fósseis e a maior preocupação internacional com o aquecimento global, amplificada com a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto em 2005, evidencia os benefícios dos biocombustíveis. O biodiesel contribuirá para melhorar as condições ambientais a partir da redução da emissão de gases poluentes e particulados.

A utilização de óleos vegetais em motores já ocorre há alguns anos no Brasil, em Curitiba testes com Biodiesel foram realizados no sistema de transporte coletivo da cidade na proporção de 20% de biodiesel para 80% de óleo diesel, e o ônibus circulou em condições normais de trabalho, apresentando desempenho semelhante ao do uso do diesel convencional(Zagonel et al. [5]). Grotta [4] testou a mistura de óleo vegetal em um motor ciclo diesel de um trator agrícola, e observou que o uso de biodiesel até a proporção de 50% de mistura não alterou substancialmente o consumo específico, porém, quando o motor funcionou com 100% de biodiesel o consumo aumentou em 11%, devido ao menor poder calorífico do biodiesel.

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

dinamômetro. Para confirmar isso, Ali & Hanna [7] estudaram o efeito à longo prazo de uma mistura de óleo diesel e biodiesel (B20) em relação ao desempenho e desgaste de um motor diesel. Constataram que o motor operou satisfatoriamente por 148 horas, e a potência, o torque e o consumo específico mantiveram-se constantes. A análise do óleo do motor a intervalos de 45 horas mostrou que a redução na necessidade após 100 horas de operação foi típica de uma operação normal com diesel. O desgaste do motor, avaliado com base na concentração de metais no óleo lubrificante, permaneceu dentro do limite normal recomendado para aquele tipo de motor.

Barbosa et al.[8] avaliando o desempenho de um motor alimentado com óleo diesel e misturas deste com biodiesel nas proporções equivalentes a B2 (98% de óleo diesel e 2% de biodiesel), B5(95% de óleo diesel e 5% de biodiesel), B20 (80% de óleo diesel e 20% de biodiesel) e B100 (100% de biodiesel), concluíram que a potência do motor com o uso de biodiesel em 100% ou, em misturas com diesel, foi pouco inferior à potência apresentada com o óleo diesel comercial.

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

Analisando a área de motores marítimos, grande parte das empresas fabricantes já têm posições definidas sobre a utilização dessa mistura. O documento intitulado “The Use of Biodiesel Fuels in the U.S. Marine Industry” [2] que se encontra no site do Departamento de Transporte, Pesquisa e Inovação Tecnológica dos EUA, especifica as garantias dadas por diversos fabricantes de motores marítimos, como a Caterpillar, Cummins Inc, Fairbanks Morse, Detroit Diesel e Volvo. Todas as fabricantes são categóricas em afirmar que não fornecem garantia se o defeito for causado pela utilização de um combustível que não se encontra catalogado em suas especificações. Contudo, a Caterpillar permite a mistura de até 30% de biodiesel em alguns de seus motores, desde que o biodiesel esteja dentro de suas especificações antes de ser misturado. A Cummins permite a utilização do B5 em todos os motores marítimos e do B20 para algumas de suas máquinas. As fabricantes Volvo e Detroit Diesel permitem a mistura em seus motores desde que a porcentagem em volume de biodiesel não exceda em 5%. As pesquisas mais evoluídas são da fabricante Fairbanks Morse, que anunciou em fevereiro de 2007, a



aprovação da utilização de B100 (100% biodiesel) em seu motor modelo 38D 8 1/8. Segundo a fabricante, a utilização do B100 obedeceu aos requisitos técnicos da norma ASTM D6751, observando pouco impacto no consumo de combustível e nos valores da potência, e impactos positivos nas emissões pela diminuição da quantidade de particulados e CO.

## 2.2. Biodiesel de Soja Motores Diesel Marítimos - Gökalp et al. (2008)

Gökalp et al. [10] utilizou um motor marítimo da "TZDK Basak" projetado para operar com diesel, 4 cilindros, 4 tempos, razão de compressão de 16,8:1 e cilindrada de 3,14 L. No dinamômetro hidráulico conectado ao eixo do motor ajusta-se o torque resistente e controla-se também a porcentagem da injeção de combustível. Todo esse controle tem como objetivo atingir os pontos de potência e rotação determinados para realizar a medição. O analisador de gases utilizado é o Horiba MEXA 574-GE. Na realização dos ensaios foram utilizados o diesel marítimo e o biodiesel de soja misturado nas seguintes proporções com o diesel marítimo: B5, B20 e B50.

Nos ensaios com os diferentes combustíveis, foram medidos:

- Consumo Específico de Combustível (*CEC*)
- Eficiência global
- Temperatura dos gases de exaustão.
- Níveis de emissão de: *CO*, *CO<sub>2</sub>* e *NO<sub>x</sub>*.

Analisando os dados do consumo específico Gökalp et al. [10] concluiu que a utilização de Biodiesel aumenta o consumo específico de combustível devido ao menor poder calorífico do biodiesel de soja comparado ao diesel mineral. Consequentemente, a economia de combustível é menor com o biodiesel. E mais, o consumo específico cresce com o aumento da porcentagem da mistura de biodiesel.

Eficiência global ( $\eta_g$ ) é definida como a potência no eixo sobre o produto da vazão mássica de combustível pelo poder calorífico do mesmo, e indica a performance do motor. Através dos testes Gökalp et al.[10] mostrou que as misturas de Biodiesel fez o motor apresentar as maiores eficiências globais. Isso também é apresentado em outras referências e o motivo é que o biodiesel, rico em oxigênio, promove uma melhor combustão

aumentando a eficiência global. Desta forma, o biodiesel puro (B100) apresenta maior eficiência do que sua mistura com diesel marítimo.

A Eficiência Mecânica é definida como a potência de eixo sobre a potência indicada dentro da câmara de combustão. Essa potência indicada é maior do que a potência no eixo porque existem muitas perdas no motor durante o processo de geração de potência. Gökalp et al. [10] apresentou em seus resultados que a utilização de Diesel Marítimo aumenta a eficiência mecânica devido ao poder calorífico do diesel marítimo ( $PCI=44308 \text{ KJ/Kg}$ ) ser maior que a do biodiesel de soja ( $PCI=37388 \text{ KJ/Kg}$ ).

A temperatura de exaustão dos gases da combustão depende tanto do poder calorífico do combustível quanto da eficiência da combustão. A temperatura aferida por Gökalp et al. [10] foi maior para o biodiesel e suas misturas pois a presença de oxigênio na composição do biodiesel de soja aumenta significativamente a eficiência da combustão. A temperatura de exaustão também é muito afetada pelo atraso da ignição. O biodiesel possui um menor número de cetano o que resulta em um maior atraso na ignição e alta liberação de energia na queima das primeiras parcelas de combustível (combustão pré-misturada). Portanto, esse grande atraso na ignição acarreta maiores temperaturas de exaustão quando se utiliza biodiesel.

As emissões de  $\text{NO}_x$  variam com a velocidade de rotação, a carga no motor e com as propriedades do combustível. Gökalp et al. [10] observou que o biodiesel apresentou maiores emissões de nitratos comparado à outros combustíveis, que pode ser atribuído a maior quantidade de oxigênio na composição. O biodiesel rico em oxigênio promove uma melhor combustão, e a formação de óxidos de nitrogênio cresce com o uso de biodiesel e suas misturas. Rakopoulos et al. [9] utilizando biodiesel também verificou que as emissões de  $\text{NO}_x$  dependem da carga e crescem proporcionalmente à porcentagem mássica de oxigênio presente na mistura de biodiesel com diesel. Por outro lado, a massa específica do combustível afeta as emissões de  $\text{NO}_x$ . A maior massa específica do biodiesel faz com que os bicos injetores, que sempre injetam um volume constante, injetem uma maior quantidade mássica de biodiesel, e por consequência maior quantidade de oxigênio contida no combustível.

A emissão de CO é resultado da oxidação incompleta do combustível. O biodiesel apresenta em seu peso aproximadamente 11% de oxigênio contribuindo para uma

combustão completa e conseqüentemente formando mais  $\text{CO}_2$  do que  $\text{CO}$ . Desta forma, Gökalp et al. [10] mostrou que o biodiesel de soja apresentou menores emissões de  $\text{CO}$  quando comparados ao diesel marítimo. Além disso, a curva de emissão de  $\text{CO}$  apresentou tendência semelhante com as curvas de  $\text{CEC}$  e  $\text{NO}_x$ . A curva de emissão de  $\text{CO}$  com função da rotação mostra que os níveis dessa emissão diminuem com o aumento da quantidade de biodiesel misturado no diesel marítimo.

A quantidade de  $\text{CO}_2$  emitido na exaustão é uma indicação da combustão completa do combustível. As altas temperaturas de exaustão utilizando o biodiesel vegetal possibilitou uma combustão mais completa, produzindo emissões de gás carbônico pouco maior do que o Diesel. Contudo, as emissões de gás carbônico pelo uso de biodiesel são parcialmente absorvidas pelo efeito da fotossíntese do vegetal que serve de matéria prima para produção do biodiesel.

Para todos os combustíveis a máxima eficiência global ocorreu em 1600 rpm, onde o consumo de combustível é mínimo. A adição de biodiesel aumenta a eficiência global. A máxima eficiência global pode ser observada quando se utiliza o B100 e as menores foram observadas quando se utilizou o diesel marítimo. Isso mostra que a utilização de biodiesel aumenta a performance do motor e melhora as emissões comparados ao diesel de origem mineral. Desta maneira, Gökalp et al. [10] mostrou que o biodiesel pode ser utilizado como um substituto ao óleo diesel, contudo utilizando-o como um aditivo ao diesel, a mistura é mais efetiva em reduzir as emissões e aumentar a performance, especialmente em motores marítimos.

### **2.3. Biodiesel de Óleo de Cozinha em Pequenos Motores Diesel Marítimos - A.P.Roskilly et al. (2007)**

A.P.Roskilly et al. [11] realizaram testes em pequenos motores diesel em duas embarcações. O motor Perkins 404C-22 foi utilizado na embarcação 1 e o motor Nanni Diesel 3.100HE no barco 2. Nos ensaios foram utilizados biodiesel de óleo de cozinha (B100) e diesel fóssil, e realizados de acordo com o procedimento descrito na ISO 8174-4 Test Cycle E5, para a análise e comparação da performance e gases da exaustão. Os testes mostraram que a potência de saída para ambos os motores operando com biodiesel foram

comparáveis com os motores operando à diesel fóssil, mas com aumento do consumo do combustível. As emissões de NO<sub>x</sub> foram reduzidas utilizando o biodiesel. E as emissões de CO foram menores em motores operando em altas cargas e usando biodiesel. Existem poucas pesquisas utilizando biodiesel em motores marítimos em grande parte as pesquisas são a respeito de veículos terrestres como: ônibus e tratores. O objetivo de A.P. Roskilly et al. [11] foi estudar a viabilidade operacional de barcos abastecidos com biodiesel, analisar a performance do motor e os benefícios ambientais da utilização de combustíveis alternativos.

Os procedimentos experimentais foram realizados de acordo com a ISO 8174. A utilização da norma objetiva simular em uma bancada dinamométrica um motor marítimo acionando uma hélice para propulsão de uma embarcação. Essa norma define as velocidades e potências do motor para medição de dados de performance e emissões de um motor para a navegação.

**Tabela 2.1 – ISO 8178 utilizada em aplicações marítimas**

ISO 8178				
Aplicação Marítima				
Pontos	1	2	3	4
Potência	25%	50%	75%	100%
Velocidade	63%	80%	91%	100%

A.P.Roskilly [11] encontrou a máxima diferença nos testes de apenas 1% na potência de saída quando comparou os motores abastecidos com biodiesel e diesel marítimo. Concluindo que a utilização de biodiesel é comparável e não difere significativamente do uso de diesel fóssil. Contudo, o consumo de biodiesel foi maior que o diesel fóssil, a razão desse maior consumo específico deve-se a massa de oxigênio contida no biodiesel (39,66 MJ/Kg), que resulta em baixo poder calorífico quando comparado ao diesel (45,00 MJ/Kg). Portanto a necessidade de manter a mesma potência de saída acarreta maior consumo de combustível.

Para as emissões de óxidos de nitrogênio A.P.Roskilly et. al. [11] mostrou que motores abastecidos com biodiesel apresentaram menores níveis de NO<sub>x</sub> na exaustão do que abastecidos com diesel. A redução dessas emissões deve-se a dois motivos principais: o

menor poder calorífico e o maior número de cetano do biodiesel. Sendo a segunda um fator mais determinante para a formação de  $\text{NO}_x$ . O número de cetano é a medida em motores diesel do atraso de ignição do combustível. O atraso de ignição é o tempo entre o início da injeção e o começo da combustão (ignição) do combustível. O maior número de cetano do biodiesel contribuiu para um pequeno atraso na ignição aumentando o tempo para que o processo da combustão seja completo. Portanto a combustão no motor diesel ocorre de forma gradativa e menos acentuada, contribuindo para a redução de  $\text{NO}_x$ .

A.P.Roskilly et. al. [11] apresentou que os níveis de CO são maiores com a utilização de biodiesel apenas para baixas rotações, isso deve-se à alta viscosidade do biodiesel que afeta a injeção do mesmo e sua atomização. Essa baixa atomização gera áreas no interior do cilindro com misturas muito ricas, contribuindo para combustão incompleta e maior geração de CO. Quando a carga no motor aumenta, as emissões de CO diminuem com a operação com biodiesel. Uma razão para esse efeito, é que a temperatura no cilindro do motor é maior quando a carga no motor aumenta. Essa maior temperatura faz com que o biodiesel diminua a sua viscosidade e se atomize resultando numa maior homogeneidade da relação ar/combustível em todo cilindro e conseqüentemente melhorado a combustão. Outra razão é a maior quantidade de oxigênio no biodiesel favorece a combustão completa aumentando a quantidade de  $\text{CO}_2$  em detrimento à quantidade de CO.

Segundo A.P.Roskilly et. al. [11] as emissões de  $\text{CO}_2$  foram de 0,3% a 3,1% maiores quando utilizou o biodiesel como combustível. Contudo, as quando analisamos a cadeia do combustível observa-se que o biodiesel contribui menos com o efeito estufa mesmo emitindo mais dióxido de carbono. Isso se deve a origem de cada combustível, pois o biodiesel é de origem vegetal e a planta absorve  $\text{CO}_2$  durante seu ciclo de vida. A temperatura de exaustão também foi um pouco maior quando os motores foram abastecidos com biodiesel. Essa pequena diferença mostra que os motores não estavam termicamente sobrecarregados mesmo operando com uma quantidade maior de combustível.

Os resultados de A.P.Roskilly et. al. [11] mostraram que a performance dos motores e barcos quando abastecidos com biodiesel foram comparáveis quando abastecidos com diesel marítimo. Os testes validaram a utilização de biodiesel vegetal óleo de cozinha reciclado em pequenos motores diesel.

## 2.4. Biodiesel de Peixe em Motores Marítimos - Cherng-Yuan Lin et. al. (2009)

Cherng-Yuan Lin et. al. [12] estudou a performance e as emissões de um motor diesel utilizando biodiesel de peixe. O biodiesel de peixe é feito aproveitando as partes descartáveis dos peixes como vísceras, rabo, olhos e barbatanas. Essas partes passam por diversos pré-tratamentos para se obter um óleo que sofrerá o processo de transesterificação com metanol para formar o biodiesel. Cherng-Yuan Lin et. al. [12] através de testes laboratoriais mostrou que o biodiesel de peixe tem poder calorífico e número de cetano maiores do que o biodiesel de óleo de cozinha.

Nos testes, Cherng-Yuan Lin et. al. [12] utilizou um motor de injeção direta, 4 cilindros, 4 tempos de aspiração natural e acoplado a um dinamômetro. Os testes foram realizados com biodiesel de óleo de cozinha, biodiesel de peixe e diesel marítimo, variando a faixa de velocidades entre 800 a 2000 RPM e mantendo o torque constante à 98N-m, Cherng-Yuan Lin et. al. obteve os seguintes resultados:

A temperatura dos gases de exaustão foram maiores para o diesel mineral, seguido pelo biodiesel de peixe e por último o biodiesel de óleo de cozinha. De acordo com Cherng-Yuan Lin et. al [12] isso está relacionado a quantidade de oxigênio presente no combustível. A percentagem mássica de oxigênio no diesel marítimo, biodiesel de peixe, biodiesel óleo de cozinha são 0%, 7,19% e 9,63%. A existência de oxigênio na composição do combustível aumenta a taxa de queima do combustível, diminuindo a duração da combustão e também por consequência a temperatura dos gases de exaustão.

O consumo específico do combustível reduziu com o aumento da rotação e manutenção do torque em 98 N-m. Os valores do *CEC* apresentados por Cherng-Yuan Lin et. al [12] foram maiores para o biodiesel de óleo de cozinha, seguido pelo biodiesel de peixe e pelo diesel marítimo. Como apresentado em outras referências, o consumo específico é inversamente proporcional ao poder calorífico do combustível, ou seja, motores que utilizam combustíveis com maior poder calorífico tem menor consumo para entregar a mesma potência no eixo.

Para rotações abaixo de 1400 RPM observou-se uma eficiência global maior para o biodiesel de peixe em relação ao biodiesel de óleo de cozinha e Diesel. Contudo, para

rotações acima de 1400 a eficiência de conversão de combustível foi maior para o Diesel em relação ao biodiesel. Isso ocorre pois em baixa carga, a presença de oxigênio no biodiesel aumenta a eficiência da combustão, se aproximando mais da combustão completa. O crescimento da eficiência da combustão aumenta a potência de eixo ( $P_e$ ), resultando em uma maior eficiência global. Quando a carga aumenta ocorre um maior e uniforme alcance da chama de combustão no cilindro, diminuindo consideravelmente a vantagem do biodiesel possuir oxigênio em sua composição.

A formação de óxidos de nitrogênio é afetada pela temperatura máxima de combustão, pelo atraso de ignição, pela permanência por um período grande de gases com alta temperatura dentro do cilindro e pelo teor de oxigênio na mistura. Em seus testes, Cherng-Yuan Lin et. al [12] mostrou que o aumento da rotação diminuiu a emissão de  $\text{NO}_x$  para os três combustíveis. Essa menor emissão deve-se ao aumento de carga no motor que diminui o atraso de ignição e resulta em menores temperaturas dentro do cilindro e menor formação de  $\text{NO}_x$ . Contudo, o biodiesel de peixe e de óleo de cozinha apresentaram maiores emissões de óxidos de nitrogênio devido a significativa presença de oxigênio na composição de ambos.

No estudo de Cherng-Yuan Lin et. al [12] a formação de CO diminui com o aumento da velocidade do motor, significando que o aumento de carga e temperatura dos gases no interior do cilindro contribuem para oxidação do CO e maior taxa de formação de  $\text{CO}_2$ . As emissões de CO foram menores para o biodiesel de peixe, seguido pelo biodiesel de origem vegetal. A presença de oxigênio na composição do biodiesel aumenta a taxa de oxidação de CO, transformando-o em  $\text{CO}_2$ .

## Capítulo 3 - Aparato Experimental

### 3.1. Motor Utilizado

O motor diesel marítimo utilizado nos testes foi um motor SCANIA DI12 59 M que pode fornecer um potência de saída de até 294 kW (400 HP) a uma rotação de 1800 RPM. O motor possui 6 cilindros em linha, opera em 4 tempos e o ar é comprimido por um turbocompressor antes de entrar nos cilindros. Abaixo estão listados os dados técnicos e geométricos do motor.

- Número de Cilindros: 6 em linha
- Diâmetro do Cilindro: 127 mm
- Curso do Pistão: 154 mm
- Cilindrada Total: 11,7 L
- Sistema de Injeção: do tipo Common Rail



Figura 3.1 – Motor Scania DI12 59 M acoplado ao dinamômetro.



### 3.2. Dinamômetro e outros Equipamentos

No motor foi instalado um dinamômetro DynoPerform 500 da fabricante AVL com potência nominal de 500 kW e capacidade de torque nominal de 2000 Nm. Esse dinamômetro tem um circuito próprio de resfriamento por água e pode atingir uma velocidade máxima de 8000 rpm (Apêndice F - Dados do Dinamômetro). O torque resistente, a rotação e potência foram monitorados por um sistema de aquisição de dados também da fabricante AVL.



Figura 3.2 – Dinamômetro da AVL.

Além do dinamômetro, o banco de provas do motor marítimo é composto por uma combinação de dois sistemas: o primeiro mede vazão mássica do combustível e o segundo a controla a temperatura do combustível. O medidor de vazão é do tipo coriolis que mede a vazão através da massa do fluido. A vantagem desse medidor de vazão é a capacidade de medir diretamente a vazão mássica, já com os medidores de vazão volumétrica deve-se atentar para os efeitos da temperatura e pressão sobre a massa específica. A combinação entre o medidor de vazão e o controlador de temperatura permite medir o consumo de

combustível de forma mais acurada, fazendo que o combustível seja aquecido até uma temperatura pré-determinada antes da medição. Em testes com diferentes combustíveis é necessário que todos eles entrem com a mesma temperatura na câmara de combustão, para que seus resultados possam ser comparados.

O sistema de aceleração possui um atuador que foi utilizado nos testes para aumentar ou diminuir a injeção de combustível e conseqüentemente ajustar a potência requerida para cada ponto de medição. Permitindo que a aquisição de dados fosse realizada nos pares potência e rotação pré-determinados.

### 3.3. Sistema de Controle e Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados AVL PUMA OPEN instalado no banco de provas do motor marítimo apresenta vantagens em sua operação. Existe a possibilidade de programação e gerenciamento, sem a intervenção humana, desde os testes mais simples como levantamento de curvas de potência até os testes mais complexos com a possibilidade de aquisição e monitoramento de diversos parâmetros como: torque, rotação, consumo de combustível, pressão do óleo e água, temperatura dos gases de exaustão, entre outros. Como vantagens do sistema destacam-se uma elevada taxa de aquisição de dados e a programação orientada ao objeto, mais amigável na criação das sequências operacionais dos testes.



Figura 3.3 – Controle e monitoração dos parâmetros pelo software AVL PUMA OPEN.

### 3.4. Analisador dos Gases de Exaustão

Foram avaliadas as emissões de gases durante a realização dos ensaios, com o intuito de observar as tendências de redução ou aumento, com os combustíveis ensaiados. Dessa forma, o analisador utilizado foi o NAPRO PC-MULTIGÁS que mediu as emissões do poluente NO<sub>x</sub>, além do O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. Esse analisador é utilizado diretamente em escapamentos, normalmente utilizado para medições em veículos de motores operando em ciclo Otto. Esse equipamento utiliza o método de medição por infravermelho não dispersivo para medir as emissões de CO<sub>2</sub> e o método da quimioluminescência para medição das emissões de NO<sub>x</sub>.



Figura 3.4 – Anlisador dos gases de exaustão.

### 3.5. Cálculo das Incertezas

Existem dois tipos que de incertezas que devem ser consideradas para o cálculo da incerteza de medição. A incerteza do Tipo A ( $I_A$ ) é aquela que ocorre devido a repetitividade e pode ser calculada pelo desvio padrão dividido pela raiz do número de

amostras. Contudo, quando um parâmetro é função de outros dados que contém incertezas do tipo A, deve-se aplicar a lei de propagação das incertezas. Como nesse projeto os parâmetros calculados são função apenas de produtos e/ou quocientes de outros dados, a incerteza padrão-combinada pode ser escrita como a equação (3.1). Sendo  $X_n$  e  $I_{x_n}$  a média e as incertezas das variáveis independentes, respectivamente. Essa equação foi utilizada para o cálculo da incerteza do consumo específico de combustível (*CEC*) e da eficiência global.

$$I_y = Y \sqrt{\left(\frac{I_{x1}}{X1}\right)^2 + \left(\frac{I_{x2}}{X2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{xn}}{Xn}\right)^2} \quad (3.1)$$

A incerteza do Tipo B ( $I_B$ ) está relacionada com resoluções, padrões e calibração. A incerteza de medição é a calculada através da combinação dessas duas incertezas, e o procedimento para o seu cálculo foi realizado por MELO et al. [20]. A incerteza do tipo B pode ser calculada como apresentada na equação (3.2), onde  $S1, S2, \dots, Sn$  são as diferentes componentes da incerteza como: resolução do instrumento, padrão de calibração, etc.

$$I_B = \sqrt{S1^2 + S2^2 + \dots + Sn^2} \quad (3.2)$$

Para encontrar a incerteza combinada ( $I_C$ ) entre as incertezas do tipo A e B, pode ser utilizada a equação (3.3).

$$I_C = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \quad (3.3)$$

Segundo Melo et al. [20] a incerteza expandida ( $I_E$ ) é obtida pela multiplicação da incerteza combinada pelo fator de abrangência ( $K$ ), que pode ser assumido com o valor 2 para um grau de confiança de 95 %.

$$I_E = K.I_C \quad (3.4)$$

As incertezas do tipo A foram calculadas na planilha do programa Excel e as incertezas do tipo B foram calculadas somente quando aplicáveis e utilizadas quando a ordem de grandeza foi a mesma ou superior da incerteza do tipo A. As tabelas das incertezas encontram-se no apêndice E.

## Capítulo 4 - Metodologia dos Testes

### 4.1. Combustíveis Utilizados

Os ensaios foram realizados, utilizando diesel marítimo puro e misturas do biodiesel de óleo dendê com diesel marítimo. O biodiesel de palma ou dendê vem ganhando aceitação devido a economia de sua produção, pois possui alta produtividade, baixo custo e produção distribuída ao longo de todo o ano, com oferta regular e crescente [2] [18]. O biodiesel foi adquirido da empresa AGROPALMA pelo Laboratório de Máquinas Térmicas (LMT) - COPPE/UFRJ. As misturas do diesel e biodiesel foram realizadas no Laboratório de Máquinas Térmicas utilizando recipientes com medidor de volume, pois as misturas previstas em lei são feitas em proporções volumétricas. As proporções de misturas foram de 5% de biodiesel e 95% de diesel (B5) e 20% de biodiesel com 80% de diesel (B20). Essas percentagens foram escolhidas porque o B5 já é regulamentado para a utilização em veículos terrestres e o B20 é a maior percentagem de biodiesel que pode ser misturado ao diesel sem que haja a necessidade de modificações nos motores diesel. As características físico-químicas do biodiesel de palma e diesel marítimo utilizados nesse projeto foram retiradas de ensaios realizados em 2011 no Laboratório de Energia, Biomassa e Meio Ambiente (EBMA) da faculdade de engenharia mecânica da UFPA [15], e podem ser observadas abaixo.

Tabela 4.1 – Análise Físico-Química dos combustíveis [15]

PROPRIEDADE		Biodiesel de Palma	Diesel
Análise Química	C [%]	78,93	85,8
	H [%]	13,45	13,5
	O [%]	3	0
	N [%]	3,25	0
Poder calorífico superior - PCS [MJ/kg]		33,11	42,2
Poder calorífico inferior - PCI [MJ/kg]		30,11	39,2
Água [ppm]		56	-
Massa Específica [kg/m <sup>3</sup> ] à 25°C		861,25	839,7
Ponto de fulgor [°C]		162	60
Viscosidade à 60°C [cSt]		8,54	2,1

## 4.2. Definição dos Pontos de Medição

Os testes foram realizados utilizando um combustível por vez. Para a programação da rotina inserida no software AVL PUMA foi necessário definir os pares potência e rotação nos quais queríamos que a aquisição de dados fosse realizada.

Os pontos de medição foram definidos segundo a norma ISO 8178. A utilização da norma objetiva simular em uma bancada dinamométrica um motor marítimo acionando uma hélice para propulsão de uma embarcação. Essa norma define as rotações e potências do motor para medição de dados de performance e emissões de um motor para a navegação. Sendo a potência e rotação máximas do motor SCANIA DI12 59M iguais a 294 kW e 1800 rotações por minuto, os pontos de medição de performance e emissões são definidos abaixo.

Tabela 4.2 – Pontos de Potência e Rotação das medições segundo norma ISO 8178

ISO 8178				
Aplicação Marítima				
Pontos	1	2	3	4
Potência	25%	50%	75%	100%
Potência Motor SCANIA (kW)	<b>73,5</b>	<b>147</b>	<b>220,5</b>	<b>294</b>
Rotação	63%	80%	91%	100%
Rotação do Motor SCANIA(RPM)	<b>1134</b>	<b>1440</b>	<b>1638</b>	<b>1800</b>

A utilização da norma acima faz com que a potência varie com o cubo da rotação. A curva Potência versus rotação pode ser visualizada abaixo:

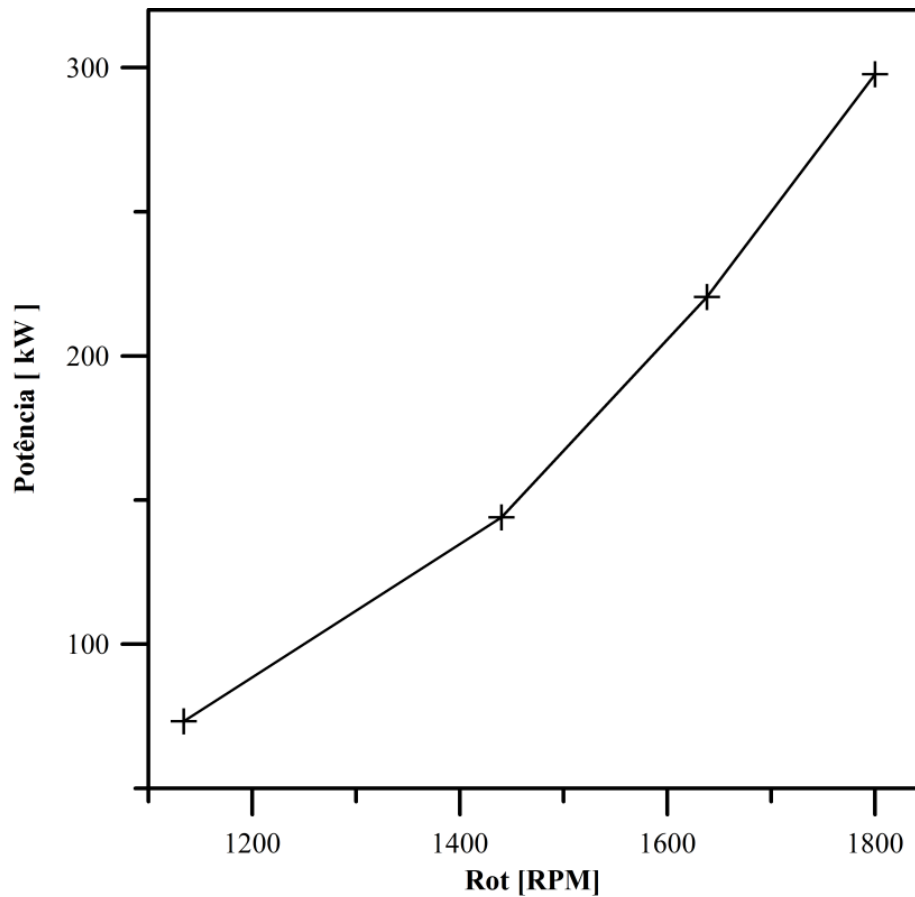


Figura 4.1 – Curva Potência x Rotação.

Tendo definido os pontos de medição, inserimos uma rotina no software PUMA da AVL. Contudo, a rotina só aceitava pares de percentagem da aceleração ( $A_c$ ) e rotação do motor. Por isso, para definição dos pontos na rotina foi necessário determinar qual era a percentagem de aceleração com a qual o motor atingia as potências determinadas pela norma ISO 8178. Foram realizados testes e chegamos a seguinte correspondência entre a aceleração do motor e os pontos de potência e rotação:

Tabela 4.3 – Pontos de Percentagem de Aceleração e Rotação das medições realizadas nos testes

Pontos	$A_c$ %	$P_e$ kW	$Rot$ rpm
1	52,0	73,5	1134
2	77,0	147	1440
3	84,9	220,5	1638
4	99,9	294	1800



### 4.3. Teste

Após o motor ligado a rotina foi acionada, e realizou de forma automatizada o pré-aquecimento do motor, e o aumento gradativo de sua potência e velocidade salvando na memória do computador os dados de performance nos pontos de medição.

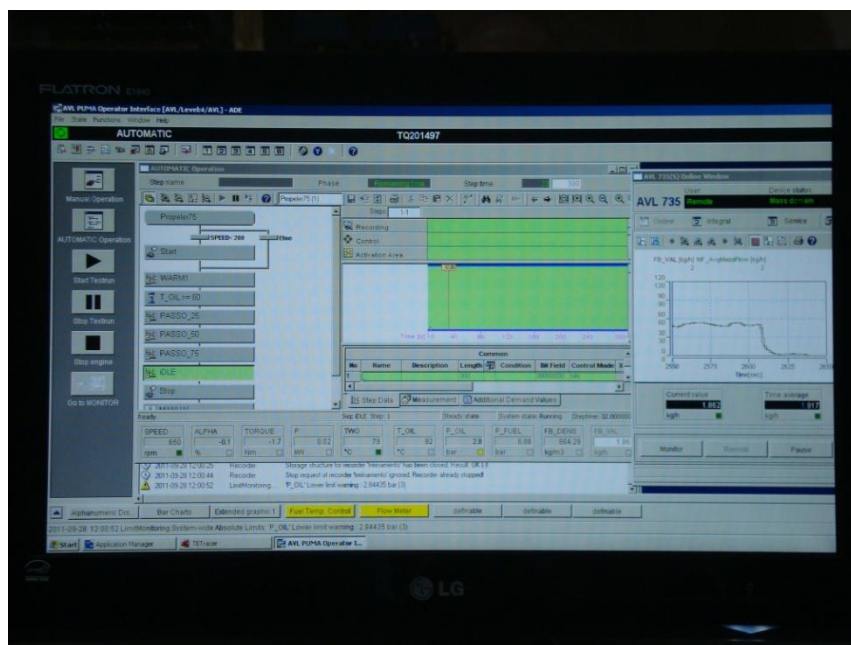


Figura 4.2 – Interface do AVL PUMA OPEN no modo automático.

A medição dos gases de exaustão foi realizada utilizando o medidor NAPRO PC-MULTIGÁS. A aquisição dos dados de emissões não foi automatizada, sempre devendo haver um comando de um operador em cada par rotação e potência, para salvar os dados das emissões.

### 4.4. Tratamento dos Dados de Performance e Emissões

Os parâmetros medidos foram salvos em arquivos .txt e convertidos em arquivos .xls para leitura no software EXCEL. Os cálculos de consumo específico de combustível, eficiência global,  $PCI_v$ , bem como as médias e as incertezas foram realizadas no software EXCEL. Os resultados e as médias encontram-se nos apêndices A, B, C e D.

A seguir são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo do consumo específico de combustível, do poder calorífico em base volumétrica e da eficiência global do motor.

$$CEC = \frac{V_c}{P_e} \quad (4.1)$$

$$PCI_v = \rho * PCI \quad (4.2)$$

$$\eta_g = \frac{P_e}{V_c * PCI} \quad (4.3) \quad \text{ou} \quad \eta_g = \frac{1}{CEC * PCI} \quad (4.4)$$

As médias em excel foram exportadas para o programa GRAPHER 5, onde foram gerados gráficos comparativos dos combustíveis.

## Capítulo 5 - Resultados e Discussão

### 5.1. Temperatura dos Gases de Exaustão

Em relação à temperatura dos gases de exaustão medidas nos ensaios, com o aumento da carga do motor essa temperatura aumenta. E a utilização de diesel marítimo resulta em maiores temperaturas dos gases de exaustão, seguido pelo B5 e B20. Segundo Cherng-Yuan Lin et. al [12] a temperatura dos gases deve-se a presença de oxigênio. Como visto na tabela de composição dos combustíveis, o biodiesel de palma tem 3% de sua massa em oxigênio, enquanto o diesel não apresenta oxigênio em sua composição. A existência de oxigênio na composição do combustível aumenta a taxa de queima do combustível, diminuindo a duração da combustão e também por consequência a temperatura dos gases de exaustão.

Outro fator importante que aumenta a temperatura de exaustão é o atraso de ignição. Quanto maior o atraso, maior a massa de combustível evaporada causando um pico de liberação de energia e aumentando assim a temperatura de exaustão. A capacidade de ignição do combustível é medida pelo índice de cetano, quanto maior o índice menor é o atraso de ignição. Em ensaio realizado pelo DPM-CENPES, o número de cetano da amostra de óleo diesel marítimo disponibilizada pelo Laboratório de Máquinas Térmicas da UFRJ, foi de 48,3. Porém, para misturas com pouca percentagem de biodiesel como no caso desse projeto, o valor do número de cetano dos combustíveis são muito próximos, fazendo com que as misturas de biodiesel e o diesel possuam aproximadamente o mesmo tempo de retardo da ignição.

A temperatura de exaustão também é afetada pelo poder calorífico em base volumétrica  $\text{GJ/m}^3$  [15]. No sistema de injeção, a bomba rotativa injeta a volume constante e não massa constante. Portanto, o combustível que entrega maior quantidade de energia por unidade de volume, sua combustão alcança maiores temperaturas.

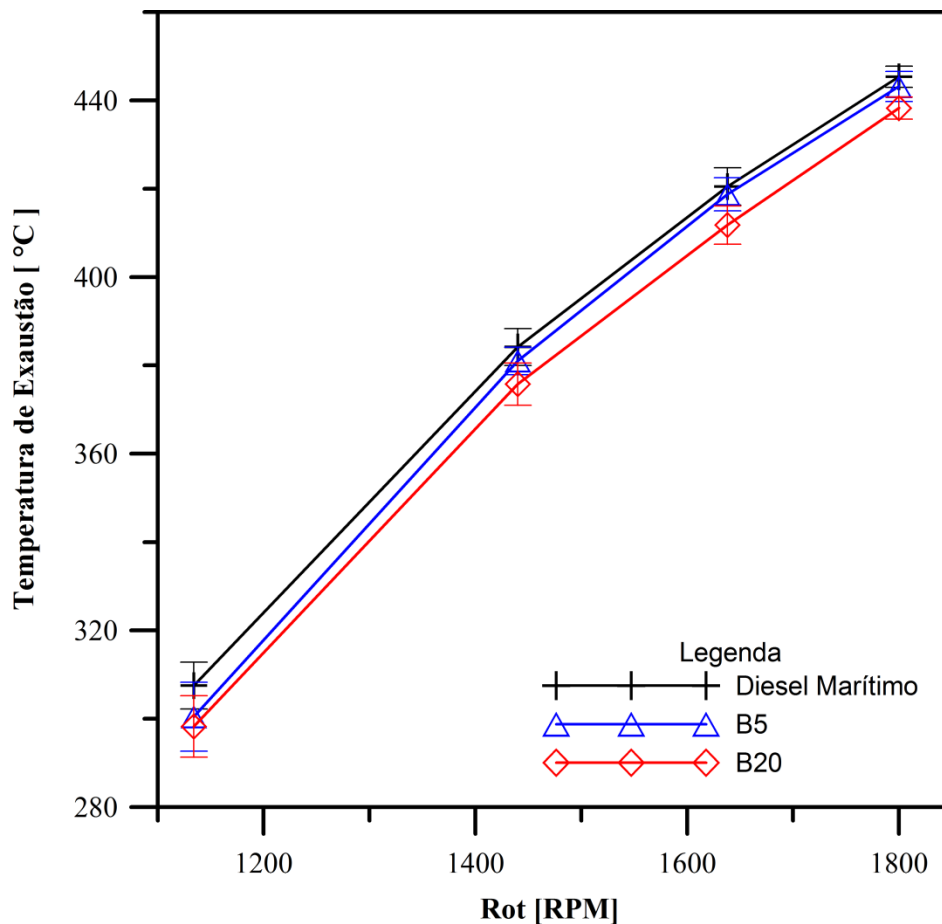


Figura 5.1 – Temperatura dos gases de exaustão.

$$PCI_v \text{ diesel marítimo} = 35,435 \text{ GJ/m}^3$$

$$PCI_v \text{ B5} = 35,089 \text{ GJ/m}^3$$

$$PCI_v \text{ B20} = 34,051 \text{ GJ/m}^3$$

Desta forma, como apresentado acima, o diesel marítimo entrega maior quantidade de energia por unidade de volume, acarretando em maiores temperaturas no processo de combustão.

## 5.2. Consumo Específico de Combustível.

O consumo específico de combustível (*CEC*) é um parâmetro comparativo que indica o quão eficiente é um motor em converter a energia contida no combustível em trabalho.

$$CEC = \frac{V_c}{P_e}$$

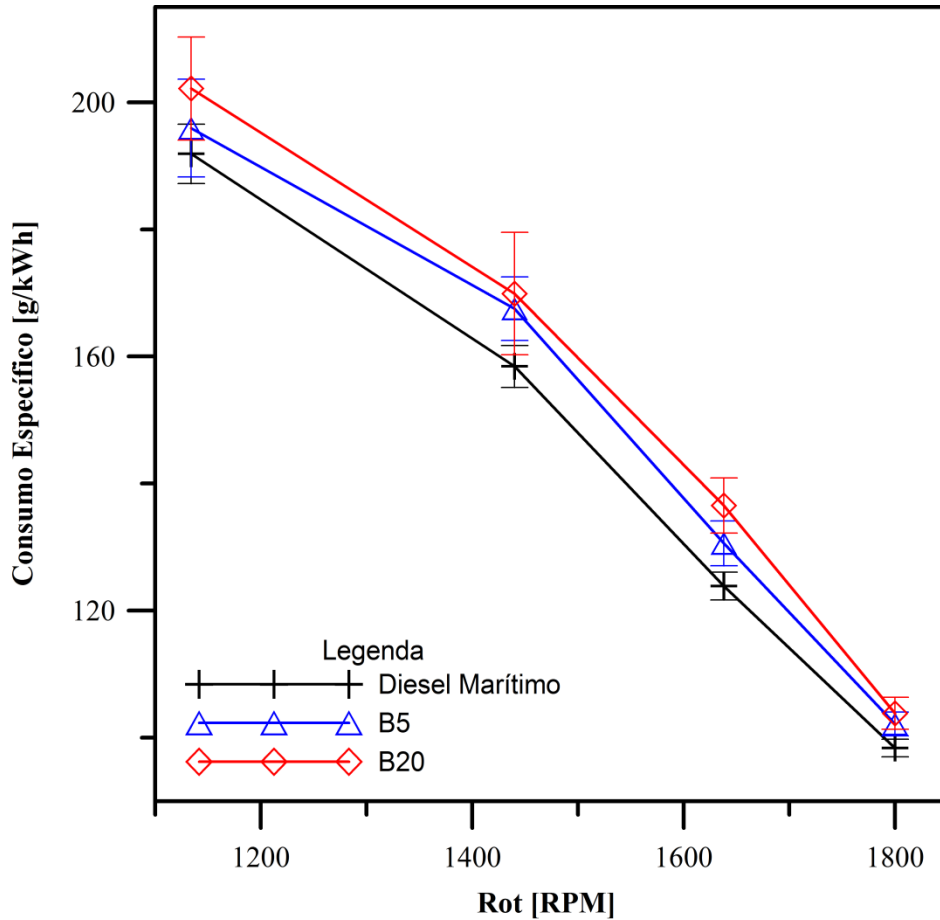


Figura 5.2 – Consumo Específico de Combustível.

Nos ensaios, as misturas de biodiesel apresentaram maiores consumos específicos em relação ao diesel marítimo puro. Como apresentado por Gökalp et al e outros pesquisadores [10,12], isso ocorre pois o biodiesel apresenta menor poder calorífico que o diesel, fazendo que o consumo de combustível seja maior para a mesma potência de eixo. Pois, a necessidade de manter aproximadamente a mesma potência de saída acarreta maior consumo de combustível. O consumo específico cresce com o aumento da percentagem da mistura de biodiesel de palma, ou seja, a economia de combustível é menor com o biodiesel.

Tabela 5.1 –Consumo Específico de Combustível

<i>CEC (g/kWh)</i>			
	<b>Diesel Marítimo</b>	<b>B5</b>	<b>B20</b>
<b>Ponto 1</b>	191,89	195,94	202,17
<b>Ponto 2</b>	158,43	167,52	169,90
<b>Ponto 3</b>	123,85	130,58	136,53
<b>Ponto 4</b>	98,37	102,15	103,83

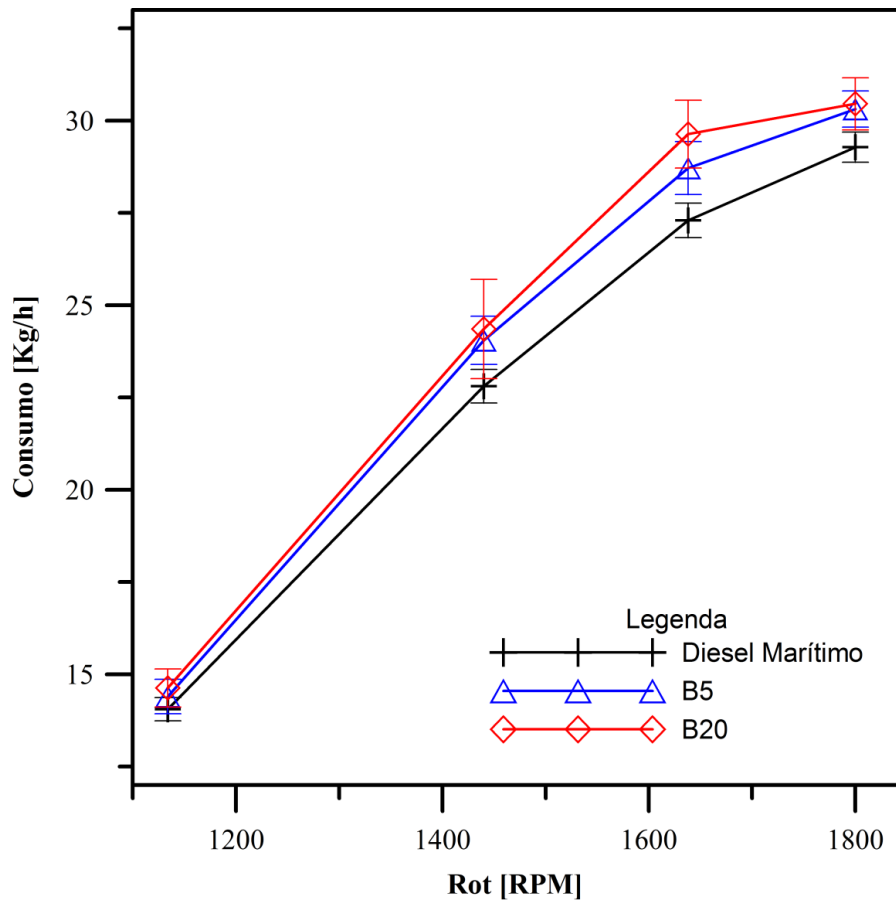


Figura 5.3 – Consumo de Combustível

### 5.3. Eficiência Global

A Eficiência Global é um parâmetro adimensional que indica o quão eficiente é um motor em converter a energia contida no combustível em potência de eixo.

$$\eta_g = \frac{P_e}{V_c * PCI} \quad \text{ou} \quad \eta_g = \frac{1}{CEC * PCI}$$

A Eficiência global cresce com o aumento da rotação e a presença de biodiesel no diesel marítimo em pequenas quantidades não acarretou em diminuição da eficiência global, mesmo o biodiesel apresentando um maior consumo de combustível. Segundo Cherng-Yuan Lin et. al [12] a presença de oxigênio no biodiesel aumenta a eficiência da combustão, resultando em maior potência de eixo e consequente aumento da eficiência global quando o motor encontra-se em baixa carga. Para o motor em alta carga essa vantagem torna-se menos relevante, visto que a chama se propaga com maior alcance e uniformemente no interior do cilindro.

Tabela 5.2 –Eficiência Global

Eficiência Global			
	Diesel Marítimo	B5	B20
Ponto 1	0,44	0,44	0,44

### 5.4. Emissões de NO<sub>x</sub>

Os óxidos de nitrogênio são formados na reação de combustão devido à presença do nitrogênio no ar e do oxigênio na mistura. Analisando a cinética química da produção de NO<sub>x</sub>, mostra-se que a taxa de formação desses óxidos aumenta com a concentração de oxigênio na mistura e principalmente quanto maior for a temperatura no processo de combustão [17]. Muitas pesquisas divergem sobre qual combustível emite maior quantidade de NO<sub>x</sub>, o biodiesel ou o diesel mineral. Gökalp et al. [10] observou que o

biodiesel de soja apresentou maiores emissões de óxidos de nitrogênio comparado ao diesel marítimo, que pode ser atribuído a maior quantidade de oxigênio na composição do biodiesel. Enquanto, A.P.Roskilly et. al. [11] mostrou que motores marítimos abastecidos com biodiesel de óleo de cozinha apresentaram menores níveis de NO<sub>x</sub> na exaustão do que abastecidos com diesel. Para A.P.Roskilly et. al os motivos são o menor poder calorífico e o maior número de cetano do biodiesel de óleo de cozinha.

Nos ensaios realizados, as emissões de NO<sub>x</sub> cresceram com o aumento da carga do motor devido ao aumento da temperatura no processo de combustão. Com o motor em carga média, as misturas de biodiesel - B5 e B20 - apresentaram uma pequena redução nas emissões de NO<sub>x</sub> em relação ao diesel. Essa pequena redução das emissões deve-se à menor temperatura de exaustão quando utilizamos biodiesel, pois o esse biocombustível apresenta menor poder calorífico que o diesel, entregando menor quantidade de energia por unidade de volume. A presença de água no combustível também é um fator que diminuí as emissões de NO<sub>x</sub>, pois a vaporização da água absorve calor diminuindo a temperatura no interior do cilindro [19]. A concentração de oxigênio na mistura contribui para a formação de NO<sub>x</sub>. A maior emissão de óxidos na mistura B20 em relação ao B5 deve-se a maior quantidade de oxigênio presente no B20 [10] e [12].

**Tabela 5.3 –Emissões de NO<sub>x</sub>**

<b>NO<sub>x</sub> (PPM Vol)</b>			
	<b>Diesel Marítimo</b>	<b>B5</b>	<b>B20</b>
<b>Ponto 1</b>	72	58	69
<b>Ponto 2</b>	127	114	126
<b>Ponto 3</b>	225	196	213
<b>Ponto 4</b>	407	382	407



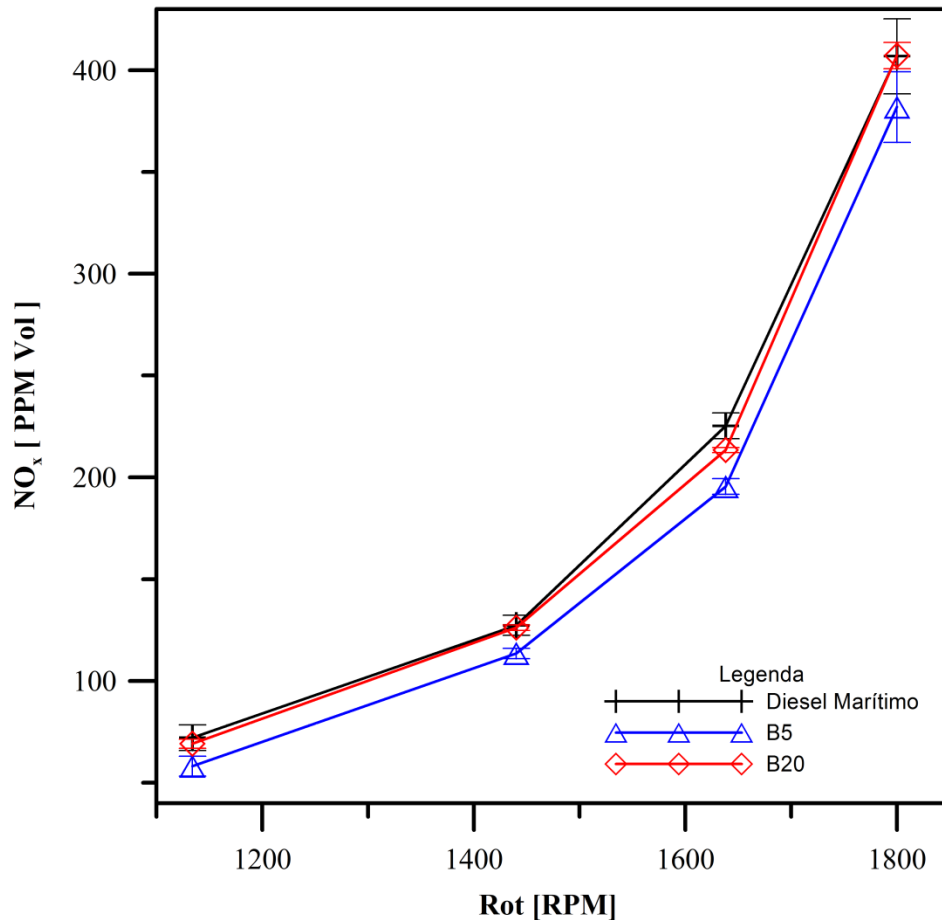


Figura 5.4 – Emissões de NO<sub>x</sub>.

## 5.5. Emissões de CO<sub>2</sub>

A quantidade de CO<sub>2</sub> emitido na exaustão indica o quanto a combustão é completa. A emissão de CO<sub>2</sub> cresceu com o aumento da rotação, pois o aumento da carga e temperatura dos gases no interior do cilindro contribui para oxidação do CO e maior taxa de formação de CO<sub>2</sub>. A quantidade de dióxido de carbono emitido não apresentou diferenças significativas entre os combustíveis B5, B20 e Diesel. Isso se deve pois os motores diesel operam com excesso de ar, contribuindo para a oxidação do combustível. Contudo, deve ser observado que as emissões de gás carbônico pelo uso de biodiesel são parcialmente absorvidas pelo efeito da fotossíntese do vegetal que serve de matéria prima para produção do biodiesel, fazendo do biodiesel um potencial combustível para redução do efeito estufa [9,12].

Tabela 5.4 –Emissões de CO<sub>2</sub>

CO <sub>2</sub> (%Vol)			
	Diesel Marítimo	B5	B20
Ponto 1	0,5	0,5	0,5
Ponto 2	1,4	1,5	1,3
Ponto 3	2,8	2,8	2,8
Ponto 4	5,4	5,2	5,4

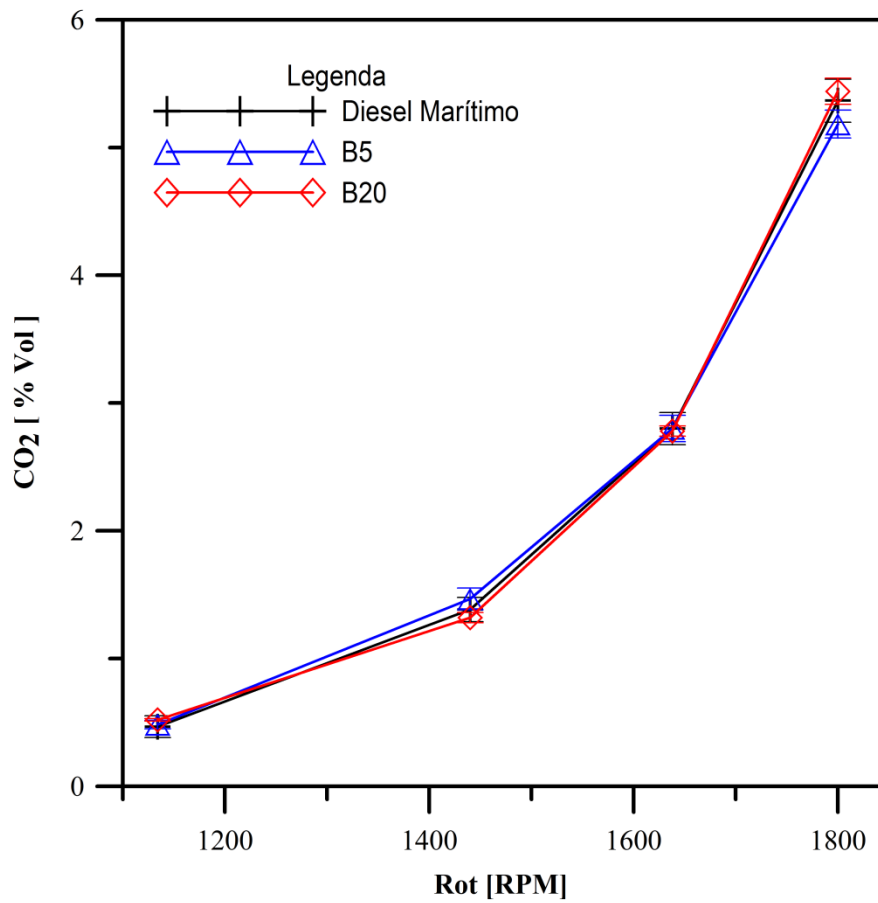


Figura 5.5 – Emissões de CO<sub>2</sub>.

## 5.6. Emissões de O<sub>2</sub>

Conforme a carga aumenta, a oxidação do combustível aumenta formando mais CO, CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, e diminuindo as emissões de O<sub>2</sub>. Comparativamente, os combustíveis utilizados não implicaram em significativas diferenças na emissão de oxigênio, sendo a diferença máxima entre as emissões atingindo 3%. Apesar do biodiesel de palma ter oxigênio em sua composição os motores diesel operam com excesso de ar, e por isso a razão ar/combustível é mais relevante na análise da emissão do oxigênio [12].

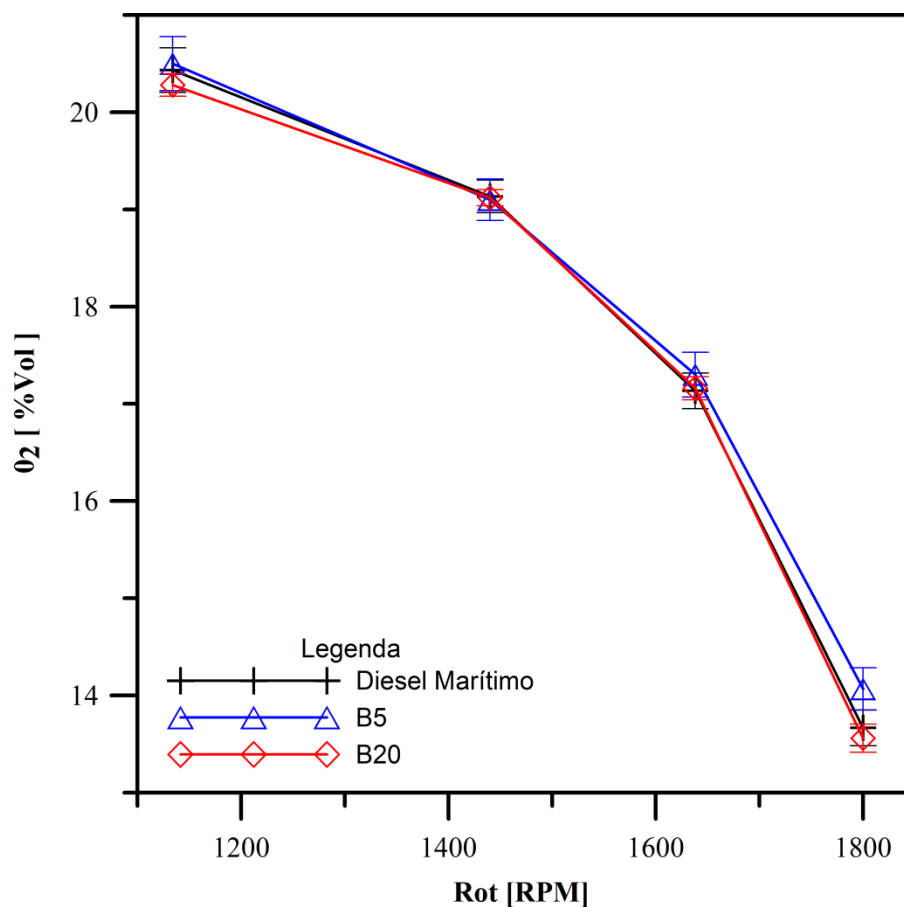


Figura 5.6 – Emissões de O<sub>2</sub>.

**Tabela 5.5 –Emissões de O<sub>2</sub>**

	<b>O2 (% Vol)</b>		
	<b>Diesel Marítimo</b>	<b>B5</b>	<b>B20</b>
<b>Ponto 1</b>	20,4	20,5	20,3
<b>Ponto 2</b>	19,1	19,1	19,1
<b>Ponto 3</b>	17,1	17,3	17,2
<b>Ponto 4</b>	13,7	14,1	13,6

## Capítulo 6 - Conclusão

Nos ensaios, o motor marítimo SCANIA operando com percentagens de biodiesel aumentou o consumo específico de combustível, ou seja, para produzir uma mesma potência de eixo é necessária uma maior vazão mássica de combustível. Portanto, o aumento do consumo quando se utiliza o biodiesel diminui a autonomia da embarcação, contudo essa diminuição é pouco relevante para misturas com baixa percentagem de biodiesel misturado ao diesel marítimo.

Como apresentado nas referências a formação de  $\text{NO}_x$  ocorre devido as altas temperaturas do processo de combustão. Apesar da concentração de NO ser maior do que  $\text{NO}_2$ , o NO é rapidamente convertido em  $\text{NO}_2$  na presença de oxigênio. Esse último possui odor forte, é tóxico e ataca principalmente os tecidos pulmonares. Nos testes, o aumento da carga e conseqüentemente aumento da temperatura do processo de combustão implica em maiores emissões de óxidos de nitrogênio. As emissões de  $\text{NO}_x$  foram semelhantes utilizando os três combustíveis (Diesel Marítimo, B5 e B20), mostrando que a utilização de biodiesel de palma em pequenas quantidades misturado ao diesel não acarreta no aumento das emissões de  $\text{NO}_x$ .

As altas temperaturas de exaustão e o sistema de injeção common rail, possibilitaram uma combustão mais completa e controlada, produzindo emissões de gás carbônico maiores em relação às emissões de CO. A emissão de  $\text{CO}_2$  não apresentou diferenças significativas entre os combustíveis B5, B20 e Diesel. Contudo, as emissões de gás carbônico pelo uso de biodiesel são parcialmente absorvidas pelo efeito da fotossíntese do vegetal que serve de matéria prima para produção do biodiesel. Portanto, sua obtenção e queima contribuem menos para o aumento das emissões de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, fazendo as misturas de biodiesel com diesel marítimo um potencial combustível para redução do efeito estufa.

O motor operou sem problemas utilizando as misturas de biodiesel e apresentou resultados de emissões e desempenho que reforçam a utilização das misturas de biodiesel com diesel em motores marítimos.

O presente estudo e as evidências científicas descritas no trabalho, sugerem que a legalização da utilização do biodiesel em pequenas proporções com o diesel em motores

marítimos trará benefícios econômicos e ambientais, sem comprometer significativamente a performance do motor. Sugere-se que novos estudos sejam realizados para que o biodiesel tenha as características físico-químicas otimizadas para a utilização eficiente e segura dessa mistura, além de uma realização contínua de ensaios para avaliar a performance e os benefícios ambientais da utilização do biodiesel em motores marítimos. A partir da realização de novos estudos que comprovem o uso seguro e eficiente da mistura de biodiesel com diesel marítimo, este trabalho contribuirá para o incentivo da legalização da utilização do biodiesel em motores marítimos para a navegação.

## Capítulo 7 - Referências Bibliográficas

- [1] Rosângela Moreira de Araujo - Superintendente de Biocombustíveis e Qualidade do Produto da ANP, 2012, Biocombustíveis: Panoramas e Ações da ANP , palestra ministrada no Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica COPPE-UFRJ. Consta no site do PRH-37 <http://prh.mecanica.ufrj.br/>
- [2] US. MARITIME ADMINISTRATION, 2010, The Use of Biodiesel in the U.S. Marine Industry.
- [3] GRANDO, F., 2005, A força do combustível verde. Revista do CONFEA, Brasília, v. 9, n. 22, p. 14-17.
- [4] GROTTA, D. C. C. Desempenho de um trator agrícola em operação de gradagem utilizando biodiesel etílico filtrado de óleo residual como combustível. Jaboticabal: UNESP, 2003. 44p. Dissertação Mestrado.
- [5] ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P.; COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja em frituras. Química Nova, v.23, n.4, p.531- 537, 2000.
- [6] ALI, Y.; HANNA, M. A. Durability testing of a diesel fuel, methyl tallowate and ethanol blend in a Cummins N14 410 diesel engine. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.39, n. 3 p. 793-797, 1996.
- [7] ALI, Y.; HANNA, M. A.; BORG, J. E. Effect of alternative diesel fuels on heat release curves for Cummins N 14 410 diesel engine. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.39, n. 3, p. 407-414, 1996.
- [8] BARBOSA, R. L.; SILVA, F. M. DA; SALVADOR, N. VOLPATO, C. E. S. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. Ciência e Agro tecnologia, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, set./out., 2008.
- [9] RAKOPOULOS, C. D.; ANTONOPOULOS, K. A.; RAKOPOULOS, D. C.; HOUNTALAS, D. T.; GIAKOUMIS, E. G. Comparative performance and emissions study of a direct injection diesel engine using blends of diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins. Energy ConVers. Manage. 2006, 47, 3272–3287.

- [10] GÖKALP, B.; SOYHAN, H.S.; SARAÇ, I. H.; BOSTAN, D.; SENGÜN, Y. 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, 1849–1857.
- [11] ROSKILLY, A.P.; NANDA S.K.; WANG Y.D.; CHIRKOWSKI J. The performance and the gaseous emissions of two small marine craft diesel engines fuelled with biodiesel. *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 872–880.
- [12] CHERNG-YUAN LIN, RONG-JI LI. Engine performance and emission characteristics of marine fish-oil biodiesel produced from the discarded parts of marine fish. *Fuel Processing Technology* 90 (2009) 883–888.
- [13] JAYARAM, V.; AGRAWAL, H.; WELCH, W. A.; MILLER, J. W.; COCKER, D. R. Real-Time Gaseous, PM and Ultrafine Particle Emissions from a Modern Marine Engine Operating on Biodiesel. *Environmental Science Technology*, 2011, 45, 2286–2292.
- [14] KALLIGEROS, S.; ZANNIKOS, F.; STOURNAS, S.; LOIS, E.; ANASTOPOULOS, G.; TEAS, C.; SAKELLAROPOULOS, F. An investigation of using biodiesel/marine diesel blends on the performance of a stationary diesel engine. *Biomass and Bioenergy* 24 (2003) 141 – 149.
- [15] Prof. Manoel Fernandes Martins Nogueira, 2012, Geração de Energia a Partir de Biomassa Vegetal, palestra ministrada no Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica COPPE-UFRJ. Consta no site do PRH-37 <http://prh.mecanica.ufrj.br/>
- [16] RAMADHAS A.S.; JAYARAJ S.; MURALEEDHARAN C., 2006, Theoretical modeling and experimental studies on biodiesel-fueled engine. *Renewable Energy* 31 1813–1826.
- [17] HEYWOOD, J. B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 1 ed, New York, USA, McGraw-Hill.
- [18] <http://www.biodieselbr.com/noticias/biodiesel/biodiesel-dende-alternativa-ecologica-07-07-08.htm> (acessado em 08/03/2013)



- [19] MELO; MACHADO; OLIVEIRA; BELCHIOR; COLAÇO; OLIVEIRA, 2011, Different Hydrous Ethanol-Gasoline Blends - FTIR Emissions of a Flex-Fuel Engine and Chemical Properties of the Fuels, SAE 2011.
- [20] MELO, T.C.C, 2006, “Incerteza de Medição em Ensaios de Emissões Veiculares - Proposta de Metodologia de Cálculo”, INMETRO – Fórum de discussão de ensaios de proficiência, Maio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, [www.inmetro.gov.br](http://www.inmetro.gov.br).

## Apêndice A - Tabelas dos Testes de Performance do Motor

### Combustível: Diesel Marítimo

#### Teste A

Pontos	AC %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	14,62	0,21	73,37	1016,2	7,20	5,3	1134	53,4	27	307	76	617,8
2	77,0	23,5	0,55	143,61	1016,1	6,35	5,7	1440	55,2	27	379	78	952,3
3	85,0	27,72	1,15	221,09	1016,1	5,60	5,7	1638	64,1	28	414	83	1288,9
4	99,9	28,74	1,96	298,28	1016,0	4,90	5,6	1800	85,5	30	441	90	1582,4

#### Teste B

Pontos	Ac %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	14,04	0,20	72,35	1016,0	7,17	5	1134	57,5	28	312	83	609,3
2	77,0	22,61	0,55	142,77	1015,9	6,31	5,6	1440	58,7	29	385	84	946,8
3	85,0	26,37	1,14	219,32	1015,9	5,60	5,7	1638	67,2	30	420	88	1278,6
4	99,9	29,39	1,94	296,78	1015,9	4,95	5,5	1800	86,7	31	445	94	1574,5

#### Teste C

Pontos	Ac %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	14,38	0,20	74,46	1015,9	7,14	5,3	1134	51,3	28	295	77	627,0
2	77,0	23,45	0,55	145,25	1015,9	6,29	5,7	1440	53,8	29	377	79	963,2
3	85,0	27,06	1,15	222,39	1015,9	5,57	5,7	1638	63,9	29	415	84	1296,5
4	99,9	29,48	1,95	298,73	1015,9	4,86	5,6	1800	85,6	31	443	92	1584,8

#### Teste D

Pontos	Ac %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	13,8	0,20	72,91	1015,9	7,12	5	1134	57,8	29	309	83	614,0
2	77,0	22,36	0,55	143,45	1015,9	6,28	5,5	1440	59,2	30	386	84	951,3
3	84,9	27,22	1,14	220,07	1015,8	5,55	5,6	1638	68,2	31	423	88	1283,0
4	99,9	29,84	1,94	297,10	1015,8	4,93	5,5	1800	87,3	32	447	95	1576,2

#### Teste E

Pontos	Ac %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	13,57	0,20	72,45	1015,8	7,10	4,9	1134	60,4	32	313	86	610,1
2	77,0	22,16	0,55	143,34	1015,9	6,27	5,4	1440	61,5	32	390	87	950,6
3	84,9	27,41	1,13	219,11	1015,8	5,54	5,5	1638	69,9	33	427	91	1277,4
4	99,9	29,65	1,93	297,32	1015,8	4,92	5,4	1800	88	34	449	97	1577,3

#### Teste F

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	13,92	0,20	73,93	1015,8	7,10	5	1134	58,5	31	309	85	622,6
2	77,0	22,76	0,56	145,32	1015,8	6,25	5,5	1440	60	32	388	86	963,7
3	84,9	28,01	1,14	220,47	1015,8	5,53	5,6	1638	68,8	32	424	90	1285,3
4	99,9	28,6	1,94	297,99	1015,8	4,89	5,4	1800	87,3	34	447	96	1580,9

### Combustível: B5

#### Teste A

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	15,78	0,22	77,29	1013,3	7,12	5,8	1134	37,8	25	319	63	650,9
2	77,0	27,80	0,60	140,52	1013,2	6,27	6,1	1440	43,7	26	379	67	931,9
3	84,9	35,71	1,19	223,17	1013,2	4,74	6,1	1638	65,7	27	421	72	1301,0
4	99,9	36,81	2,00	302,24	1013,2	2,92	5,9	1800	84,3	28	439	82	1603,4

#### Teste B

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	15,21	0,21	75,15	1011,8	7,17	5,8	1134	43,0	27	299	63	632,8
2	77,0	25,10	0,57	147,88	1011,9	6,39	6,1	1440	47,6	27	375	67	980,7
3	85,0	28,03	1,18	224,46	1011,8	5,76	6,0	1638	63,6	28	412	73	1308,6
4	99,9	29,75	1,97	299,98	1011,8	4,99	5,9	1800	84,5	29	439	83	1591,4

#### Teste C

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	14,34	0,21	73,85	1011,7	7,15	5,2	1134	54,5	28	308	78	621,9
2	77,0	23,36	0,55	143,68	1011,7	6,35	5,7	1440	56,3	29	381	79	952,8
3	85,0	26,96	1,15	220,32	1011,7	5,65	5,7	1638	65,3	29	416	84	1284,4
4	99,9	28,61	1,94	296,78	1011,6	4,98	5,6	1800	86,2	31	443	91	1574,5

#### Teste D

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	13,84	0,20	72,58	1011,5	7,15	5,1	1134	57,7	29	291	82	611,2
2	77,0	23,14	0,55	144,42	1011,5	6,33	5,6	1440	58,7	29	382	83	957,7
3	85,0	27,03	1,14	219,52	1011,4	5,63	5,6	1638	67,4	30	419	87	1279,8
4	99,9	29,32	1,94	296,30	1011,4	4,94	5,5	1800	87,0	32	444	94	1571,9

#### Teste E

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	14,41	0,20	71,71	1014,4	7,13	5,1	1134	55,7	28	302	81	603,9
2	77,0	23,35	0,54	142,18	1014,3	6,27	5,6	1440	57,0	28	378	83	942,9
3	85,0	29,28	1,10	215,96	1014,4	5,52	5,7	1638	65,1	29	414	86	1259,0
4	99,9	30,20	1,89	291,95	1014,3	4,71	5,6	1800	84,7	31	439	93	1548,8

Teste F

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	13,52	0,19	71,39	1011,1	7,14	4,9	1134	61,8	31	292	86	601,2
2	77,0	22,64	0,53	142,05	1011,1	6,30	5,5	1440	61,8	31	385	87	942,0
3	84,9	26,82	1,12	218,00	1011,0	5,63	5,6	1638	69,9	32	424	90	1270,9
4	99,9	28,58	1,92	294,94	1011,0	4,90	5,4	1800	88,3	34	449	96	1564,7

Teste G

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	13,69	0,19	72,42	1011,0	7,13	4,9	1134	61,9	30	292	86	609,8
2	77,0	22,94	0,55	144,11	1011,0	6,28	5,4	1440	62,0	31	387	87	955,7
3	84,9	27,21	1,12	218,11	1011,0	5,62	5,5	1638	70,4	32	425	91	1271,5
4	99,9	28,94	1,93	295,15	1010,9	4,90	5,4	1800	88,6	34	449	97	1565,8

## Combustível: B20

Teste A

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	15,54	0,21	74,70	1014,7	7,10	5,8	1134	37,5	26	-	63	629,0
2	77,0	26,90	0,57	146,86	1014,7	6,33	6,1	1440	43,3	26	-	67	973,9
3	85,0	31,42	1,14	219,61	1014,6	5,28	6,1	1638	63,9	27	-	72	1280,3
4	99,9	31,85	1,93	297,26	1014,6	4,42	5,9	1800	82,6	28	-	82	1577,0

Teste B

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	Rot rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	14,74	0,20	72,74	1014,5	7,08	5,4	1134	48,4	26	288	73	612,5
2	77,0	24,44	0,54	143,49	1014,5	6,24	5,8	1440	50,8	27	369	76	951,5
3	85,0	29,06	1,12	218,22	1014,5	5,50	5,9	1638	60,4	27	406	80	1272,2
4	99,9	30,20	1,91	293,72	1014,5	4,78	5,7	1800	83	29	435	88	1558,2

Teste C

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	$Rot$ rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	14,48	0,20	72,19	1014,5	7,14	5,2	1134	53,8	27	300	79	607,9
2	77,0	23,91	0,54	142,40	1014,5	6,26	5,7	1440	55,4	28	376	81	944,3
3	85,0	29,55	1,11	216,42	1014,5	5,51	5,7	1638	63,7	28	411	84	1261,7
4	99,9	30,16	1,89	292,37	1014,4	4,75	5,6	1800	84,1	30	438	92	1551,1

Teste D

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	$Rot$ rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	14,41	0,20	71,71	1014,4	7,13	5,1	1134	55,7	28	302	81	603,9
2	77,0	23,35	0,54	142,18	1014,3	6,27	5,6	1440	57,0	28	378	83	942,9
3	85,0	29,28	1,10	215,96	1014,4	5,52	5,7	1638	65,1	29	414	86	1259,0
4	99,9	30,20	1,89	291,95	1014,3	4,71	5,6	1800	84,7	31	439	93	1548,8

Teste E

Pontos	$A_c$ %	$V_c$ kg/h	$P_{adm}$ bar	$P_e$ kW	$P_{atm}$ mbar	$P_c$ bar	$P_o$ bar	$Rot$ rpm	$T_{adm}$ °C	$T_{atm}$ °C	$T_e$ °C	$T_o$ °C	Torque Nm
1	52,0	13,98	0,19	70,49	1014,4	7,12	5,1	1134	57,2	29	303	83	593,6
2	77,0	23,19	0,53	141,89	1014,4	6,30	5,5	1440	58,4	29	380	84	940,9
3	85,0	28,88	1,10	215,17	1014,3	5,52	5,7	1638	66,3	30	416	88	1254,4
4	99,9	29,88	1,88	291,38	1014,3	4,75	5,5	1800	85,1	31	441	94	1545,8

## Apêndice B - Tabelas das Médias dos Testes de Performance do Motor

### Combustível: Diesel Marítimo

Pontos	$V_c$ kg/h	$P_e$ kW	$Rot$ rpm	$Torque$ Nm	$T_e$ °C	$CEC$ g/kWh
1	14,06	73,25	1134	616,8	308	191,89
2	22,81	143,96	1440	954,6	384	158,43
3	27,30	220,41	1638	1284,9	421	123,85
4	29,28	297,70	1800	1579,3	445	98,37

### Combustível: B5

Pontos	$V_c$ kg/h	$P_e$ kW	$Rot$ rpm	$Torque$ Nm	$T_e$ °C	$CEC$ g/kWh
1	14,40	73,48	1134	618,8	300	195,94
2	24,05	143,55	1440	951,9	381	167,52
3	28,72	219,93	1638	1282,2	419	130,58
4	30,32	296,76	1800	1574,4	443	102,15

### Combustível: B20

Pontos	$V_c$ kg/h	$P_e$ kW	$Rot$ rpm	$Torque$ Nm	$T_e$ °C	$CEC$ g/kWh
1	14,63	72,37	1134	609,4	298	202,17
2	24,36	143,36	1440	950,7	376	169,90
3	29,64	217,08	1638	1265,5	412	136,53
4	30,46	293,34	1800	1556,2	438	103,83

## Apêndice C - Tabelas dos Testes de Emissões

### Combustível: Diesel Marítimo

Teste A

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,5	79
2	1,4	19,2	129
3	2,9	17,1	224
4	5,5	13,5	393

Teste B

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,3	73
2	1,4	19,1	130
3	2,9	17,1	220
4	5,5	13,6	390

Teste C

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,6	20,1	79
2	1,5	18,9	127
3	2,9	16,9	225
4	5,5	13,5	397

Teste D

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,3	20,8	60
2	1,2	19,4	118
3	2,6	17,4	218
4	5,1	13,9	396

Teste E

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,4	20,7	66
2	1,3	19,3	124
3	2,6	17,4	225
4	5,1	14,0	416

Teste F

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,2	76
2	1,5	18,9	136
3	2,9	16,9	240
4	5,5	13,5	449

**Combustível: B5**

Teste A

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,2	59
2	1,6	18,7	117
3	2,9	17	197
4	5,3	13,7	390

Teste B

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,4	54
2	1,5	19,1	114
3	3,0	17,1	190
4	5,3	13,9	373

Teste C

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,7	58
2	1,5	19,2	113
3	2,8	17,4	190
4	5,3	14,1	348

Teste D

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,4	21,1	52
2	1,5	19,5	116
3	2,7	17,8	196
4	5,1	14,5	374

Teste E

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	(*)		
2			
3			
4			

Teste F

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,3	69
2	1,4	19	113
3	2,7	17,3	198
4	5,1	14,1	406

Teste G

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,3	57
2	1,3	19,1	108
3	2,7	17,2	202
4	5,0	14,1	400

\* Para o teste E a aquisição dos dados das emissões não foi realizada. Após o início do teste de performance não foi dado o comando para iniciar o teste de emissões.



**Combustível: B20**

Teste A

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,6	20,0	88
2	1,3	19,0	139
3	2,8	17,0	206
4	5,7	13,0	435

Teste B

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,3	61
2	1,3	19,0	121
3	2,8	17,0	215
4	5,5	13,4	408

Teste C

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,2	68
2	1,4	19,1	123
3	2,8	17,1	216
4	5,4	13,7	403

Teste D

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,4	65
2	1,3	19,2	123
3	2,8	17,3	217
4	5,4	13,8	398

Teste E

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,5	64
2	1,3	19,3	125
3	2,7	17,4	213
4	5,2	13,9	392

## Apêndice D - Tabelas das Médias dos Testes de Emissões

### Combustível: Diesel Marítimo

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,4	72
2	1,4	19,1	127
3	2,8	17,1	225
4	5,4	13,7	407

### Combustível: B5

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,5	58
2	1,5	19,1	114
3	2,8	17,3	196
4	5,2	14,1	382

### Combustível: B20

Pontos	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	0,5	20,3	69
2	1,3	19,1	126
3	2,8	17,2	213
4	5,4	13,6	407

## Apêndice E - Tabelas das Incertezas para os Testes de Performance e Emissões

### Combustível: Diesel Marítimo

Pontos	$V_c$ kg/h	$P_e$ kW	$T_e$ °C	$CEC$ g/kWh	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	± 0,31	± 0,68	± 5	± 4,66	± 0,08	± 0,23	± 6,27
2	± 0,46	± 0,87	± 4	± 3,30	± 0,10	± 0,17	± 4,94
3	± 0,46	± 0,99	± 4	± 2,18	± 0,13	± 0,18	± 6,32
4	± 0,41	± 0,61	± 2	± 1,39	± 0,17	± 0,18	± 18,44

### Combustível: B5

Pontos	$V_c$ kg/h	$P_e$ kW	$T_e$ °C	$CEC$ g/kWh	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	± 0,47	± 1,60	± 8	± 7,68	± 0,03	± 0,28	± 4,83
2	± 0,65	± 1,78	± 3	± 5,01	± 0,08	± 0,21	± 2,57
3	± 0,72	± 2,27	± 4	± 3,53	± 0,10	± 0,23	± 3,86
4	± 0,49	± 2,58	± 3	± 1,88	± 0,11	± 0,22	± 17,38

### Combustível: B20

Pontos	$V_c$ kg/h	$P_e$ kW	$T_e$ °C	$CEC$ g/kWh	CO <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	NO <sub>x</sub> ppm vol
1	± 0,52	± 1,38	± 7	± 8,12	± 0,01	± 0,12	± 2,21
2	± 1,35	± 1,83	± 5	± 9,63	± 0,04	± 0,08	± 1,35
3	± 0,92	± 1,61	± 4	± 4,35	± 0,04	± 0,12	± 1,23
4	± 0,71	± 2,11	± 3	± 2,52	± 0,10	± 0,14	± 6,42

## Apêndice F - Dados do Dinamômetro

Dynamometer type	DynoPerform 500
Nominal torque	2 000 Nm from 1 160 rpm to 2 380 rpm
Nominal power*	500 kW from 2 380 rpm to 8 000 rpm
Maximum speed	8 000 rpm
Permissible additional mass on the coupling flange at a distance of 75 mm	at max. speed: 25 kg at 6 000 rpm: 39 kg
Mass inertia	3.69 kgm <sup>2</sup>
Direction of rotation	2
Coolant	Closed cooling water circuit
Temperature Monitoring	Temperature limit switch in water outlet pipe
Flow Monitoring	Cooling water flow switch in water inlet pipe
Connection Box	with EMC cable glands
Load cell type	HBM U2A (accuracy class 0,1)
Total system torque accuracy (typical)	±0.2% F.S.**
Digital speed measurement accuracy	±1 rpm / ±1 digit
Colour	ultramarine blue RAL 5002
Weight	1 500 kg
Protection class	IP 54C
Ambient temperature conditions	+5 to +40°C
Ambient humidity conditions	< 95% (dew point must not be reached)

*\*Attention: For endurance tests with full power do not exceed 85% of nominal power. For endurance tests with repeated high load variations (i.e. thermo-shock tests) do not exceed 75% of nominal power*

*\*\*FS = dyno full scale (dyno nominal torque)*