

MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO
EM PROPULSÃO NAVAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE FALHA EM MOTOR DIESEL COM ESTUDO DE CASO.

CT HELDER HENRIQUE FERNANDES RENÓ

ORIENTADORES: PROF. CARLOS RODRIGUES PEREIRA BELCHIOR
CMG (RM1) FRANCINET ANTUNES DOS SANTOS

CIAW
Rio de Janeiro
2020

CAPITÃO-TENENTE HELDER HENRIQUE FERNANDES RENÓ
ANÁLISE DE FALHA EM MOTOR DIESEL COM ESTUDO DE CASO

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Orientadores:
Prof. Dr. CARLOS RODRIGUES PEREIRA BELCHIOR
CMG (RM1) FRANCINET ANTUNES DOS SANTOS

ANÁLISE DE FALHA EM MOTOR DIESEL COM ESTUDO DE CASO.

Resumo

O presente estudo teve por objetivo apresentar de forma multidisciplinar o tema: Análise de Falha em Motor a Diesel. Dentre a gama de possibilidades para análise nesse tipo de motor, foram expostas as circunstâncias de falha em bicos injetores, possível fruto de alta concentração de enxofre em Óleo Diesel Marítimo. O tema possui destaque no cenário atual se visto de maneira sistêmica, em virtude da nova regulamentação de limites de enxofre em combustíveis marítimos, pela Organização Internacional Marítima – IMO, que possui normas para reduzir emissões e impactos ambientais relativos ao seu elevado teor em combustíveis marítimos. Uma abordagem com estudo de caso que não se distanciou das explicações técnicas, trazendo informações relevantes sobre as diferenças entre Óleo Diesel Rodoviário e Óleo Diesel Marítimo, além de trazer possíveis efeitos do enxofre no bico injetor, no motor e na emissão de produtos tóxicos para atmosfera.

Palavras-Chave: Corrosão. Bico Injetor. Diesel. Emissões. Enxofre. Injetores. Motor Diesel.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANP – Agência Nacional de Petróleo;
B – Diâmetro do Cilindro;
BDC – Ponto Morto Inferior;
CODOG – *Combined diesel or gas*;
Cv – Calor específico a volumes constante;
Cp – Calor específico a pressão constante;
DEN – Diretoria de Engenharia Naval;
EPE – Empresa de Pesquisa Energética;
Eq. – Equação;
F – Vetor Força;
IMO – Organização Marítima Internacional;
m: massa;
Marpol – Convenção Marítima Internacional para a Prevenção de Poluição por Navios;
MB – Marinha do Brasil;
MCA – Motor de Combustão Auxiliar;
 η - Rendimento;
n – Rotações por segundo;
N – Quantidade de cilindros;
NBComteVarella – Navio Balizador Comandante Varella;
OCM – Combustível Marítimo;
OCMT – Combustível Marítimo para Turbinas;
ODM – Óleo Diesel Marítimo;
Pmef = Pressão média efetiva;
Q – Vetor quantidade de movimento;
Q – Calor;
q – Calor;
r – Vetor raio de manivela;
Rcrank – Módulo do Vetor **r**;
S – Curso do Pistão;
 τ – vetor torque instantâneo;
T – Temperatura;

TDC – Ponto morto superior;

V – Volume;

v – Volume específico;

\mathbf{v} – Vetor velocidade;

Vcil – Cilindrada;

Wliq – Trabalho Líquido;

wliq – Trabalho Líquido Específico; e

z – Razão de compressão.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO E TABELAS

- Figura 1: apresentação do Motor Diesel 099 MTU;
- Figura 2: Partes relevantes do relatório de serviço MTU N° 4101438/15;
- Figura 3: Partes relevantes do relatório fotográfico emitido pela fábrica da MTU-SP;
- Figura 4: Imagem da rotina de manutenção preventiva prevista pelo manual para os motores 6R099;
- Figura 5: Partes relevantes da carta 120/15 da MTU para o NBCComteVarella;
- Figura 6: Comparação entre a imagem de uma recomendação em um manual antigo do motor 6R099 e a imagem da correspondente manutenção em um manual atualizado;
- Figura 7: Comparação entre ODM de Marinha e Óleo Diesel Rodoviário;
- Figura 8: Ciclo de Carnot;
- Figura 9: Comparações entre ciclo diesel ideal x real;
- Figura 10: Volume de controle termodinâmico do cilindro;
- Figura 11: Imagem das sequências de movimento do pistão;
- Figura 12: Ficha técnica do motor 6R099;
- Figura 13: Sistema de Combustível do motor 6R099;
- Figura 14: Exemplo de Sistema Bomba/ Injetor Individual;
- Figura 15: Ilustração de um bico injetor;
- Figura 16: Comparação entre ODM de Marinha x Óleo Diesel Rodoviário;
- Figura 17: Evolução do padrão de atomização após corrosão em bico injetor; e
- Figura 18: Países membros da IMO que ratificaram o Anexo VI da Marpol.

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÕES (Eq.):

1. $\eta = \frac{w_{liq}}{q}$;
2. $\eta = 1 - T_L/T_H$;
3. $\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{C_v(T_D - T_A)}{C_p(T_C - T_B)} = 1 - Q_L/Q_H$;
4. $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$;
5. $V_{cil} = 0,25\pi B^2 S$;
6. $S = 2R_{crank}$;
7. $z = V_{m\acute{a}x}/V_{m\acute{i}n}$;
8. $w_{liq} = \oint P dv \equiv P_{mef}(v_{max} - v_{min})$;
9. $W_{liq} = m \cdot w_{liq}$;
10. $W_{liq} = P_{mef} \cdot (V_{max} - V_{min})$;
11. $P = N \cdot m \cdot w_{liq} \cdot n$;
12. $\text{Combustível} + \text{Ar} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{CO} + \text{NO}_x + \text{HC} + \text{SO}_x + \text{Material}$
 $\text{Particulado} + \text{Energia}$;
13. $\text{SO}_{2(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_{3(g)}$;
14. $2\text{SO}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow 2\text{SO}_{3(g)}$;
15. $\text{SO}_{3(g)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{HSO}_4^-(aq)$;
16. $\text{N}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} \leftrightarrow 2\text{NO}_{(g)}$;
17. $3\text{NO}_{2(g)} + 3\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow 2\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + 2\text{NO}_3^-(aq) + \text{NO}_{(g)}$.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo Geral	9
1.2 Objetivos Específicos	9
2 O CASO DO NAVIO BALIZADOR COMANDANTE VARELLA	10
3 MOTOR E CICLO DIESEL	16
3.1 Máquinas Térmicas e Ciclo de Carnot	16
3.2 Ciclo Padrão a Ar Diesel	17
3.3 Motor Diesel	18
4 SISTEMA DE COMBUSTÍVEL DO MOTOR DIESEL 6R099	22
5 BICOS INJETORES	24
6 COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS	26
6.1 Combustíveis Marítimos na MB	26
6.2 Óleo Diesel e Óleo Diesel Marítimo	27
6.3 Enxofre e efeitos dos seus ácidos no motor	29
6.4 Emissões, Bunker e IMO2020	32
6.5 Biodiesel	34
7 TÉCNICAS PREDITIVAS	35
CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Segundo Chagas (2014), em concentrações elevadas, os produtos do enxofre, resultado da combustão do óleo diesel, causam prejuízos ao meio ambiente, à saúde humana e no desempenho dos próprios motores, já que, durante a operação, há reações químicas entre compostos do enxofre e a água formando ácidos fortes os quais, a médio e longo prazo, contribuem para corrosão dos componentes metálicos do equipamento, além de provocar outros danos materiais e ambientais. Os injetores são sensíveis e possuem alto grau de precisão. Assim, qualquer falha que descaracterize a forma original de injeção gera a necessidade de substituição de tais elementos; O custo de aquisição de novos bicos injetores em quantidade necessária para atender todos os cilindros de todos os motores de um meio pode ser extremamente oneroso. Ademais, há de ser olhar para os impactos do enxofre na atmosfera, já que a ausência de preocupação ambiental produz repercussões extremamente negativas, além de sanções e multas. Observado o fato de terem entrado em vigor as novas regras sobre emissões de enxofre em relação a navios, não há como negar que o tema é atual, relevante e importante para a sociedade.

1.1 Objetivo Geral

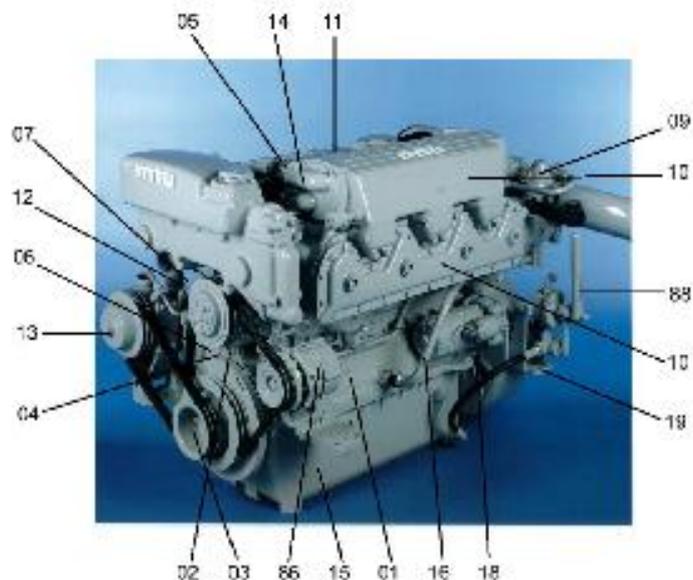
Validar ou não a hipótese de que ODM contribuiu para corrosão dos injetores em algum navio da Marinha do Brasil (MB).

1.2 Objetivos Específicos

1. Expor um caso de falha em bicos injetores de motor diesel;
2. Apresentar o Ciclo Diesel e o motor diesel;
3. Comparar Diesel Rodoviário x Marítimo;
4. Estudar os produtos ácidos do enxofre e emissões;
5. Informar sobre normas da IMO, em relação ao teor de Enxofre em Óleos Combustíveis; e
6. Avaliar o contexto da Marinha do Brasil no que tange as novas regras impostas pela IMO quanto ao seu teor em Óleo Diesel Marítimo; e
7. Verificar se existem técnicas preditivas relacionadas ao assunto.

2 O CASO DO NAVIO BALIZADOR COMANDANTE VARELLA

Ano de 2015, Navio Balizador Comandante Varella (NBComteVarella). O objeto de estudo são os três Motores Diesel MTU 6R099TB90, marinizados de Mercedes – Benz OM 300.



01 Bloco do motor Crankcase	10 Admissão de ar/Escapamento Air/exhaust systems	19 Alojamento do Motor Engine mounting
02 Trem de engrenagens Gear train	11 Sistema de injeção Fuel injection equipment	20 Acionamento ventilador Fan drive
03 Mecanismo de Manivelas Running gear	12 Circuito de combustível Fuel system	27 Aparelhos suplementares Additional controls
04 Tampa fechamento KGS End cover , PTO end	13 Bomba de água Water pump	84 Sistema de Controle Monitoring equipment
05 Cabeçote Cylinder head	14 Circuito de água Cooling system	86 Acessórios eletricos/pneumat. Accessories (electric/pneumatic)
06 Distribuição Valve gear	15 Bomba de óleo Oil pump	87 Acionamento do motor e redutor Engine and gear box control
07 Regulador do motor Engine governor	16 Circuito de óleo Oil system	88 Acessórios mecanicos. Accessories (mechanical)
08 Transmissão de regulagem Governor linkage	17 Acionamento controle rotação Drive for speed monitoring	97 Material de serviço e consumo Operating and expendable materials
09 Turbocompressor Exhaust turbocharger	18 Sistema de partida Starting equipment	

Figura 1: Motor Diesel Marinizado MTU 6R099 (MTU, 2010).

Por ocasião da manutenção preventiva de 2400 horas dos Motores de Combustão Auxiliares, que compunham o sistema de geração de energia elétrica do meio, foi emitido pela fabricante (MTU) relatório, no qual afirmava que durante os testes em bancada todos bicos

injetores dos motores apresentavam pressão de abertura fora do recomendado, além de pulverização e estanqueidade anormais.



RELATÓRIO DE SERVIÇO Nº 4101438/15
MOTORES DE COMBUSTÃO AUXILIARES Nºs 1, 2 E 3 DO NB COMANDANTE VARELLA

Cliente: Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP)
Contrato: 21231.15
OS: 4101438 / 4101439 / 4101440
Navio: Navio Balizador Comandante Varella
Motor: MTU 6R 099 TB50B
N/Sº: MCA 1 - Nº 1009103886 (2.471 horas de funcionamento)
MCA 2 - Nº 1009103887 (2.455 horas de funcionamento)
MCA 3 - Nº 1009103888 (2.434 horas de funcionamento)
Serviço: Rotina de Manutenção "E" de 2400 hs nos MCA's do NB Comandante Varella

MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE 2400 HORAS DO MOTOR

Serviço: Rotina de Manutenção "E" de 2400 hs nos MCA's do NB Comandante Varella

Prezados Senhores,

Durante o período de 09/09/2015 a 28/10/2015, em atendimento à Ordem de Fornecimento nº 21231.15 emitida pela FUNDEP, a MTU do Brasil disponibilizou uma equipe técnica para realização dos serviços de manutenção "E", conforme especificado no Manual de Operação nº 901560178.

Observações de Inspeção:

Foi verificado, através da boroscopia realizada nos motores, que todas as camisas de cilindro apresentam-se em perfeito estado.

Em relação às inspeções e testes dos bicos injetores, todos apresentavam pressão de abertura fora do recomendado, pulverização e estanqueidade anormais.

Por se tratar de uma primeira revisão neste modelo de motor, a MTU resolveu remover as bombas injetoras dos 3 MCA's e enviá-las para fábrica em SP. Realizamos a desmontagem da parte superior das referidas bombas e não encontramos qualquer tipo de oxidação, sendo necessário realizar somente a calibração em bancada. Este serviço não faz parte do escopo da revisão, portanto, não será cobrado ao cliente por se tratar de uma decisão técnica tomada pelo fabricante.

Figura 2: Partes relevantes do primeiro relatório MTU sobre a manutenção (MTU, 2015).

Após o envio dos equipamentos para São Paulo, onde fica localizada a fábrica da MTU, foi emitido, pela empresa, relatório fotográfico, no qual a fabricante constatou corrosão nos bicos injetores, que, segundo o documento, inviabilizava a calibração desses componentes e tornava necessária a substituição desses dezoito elementos – cada motor possui seis cilindros e os componentes eram relativos aos três Motores de Combustão Auxiliar.

Relatório Fotográfico
RF-01-2015



Ordem de Serviço:	4101435 / 4101439 / 4101440
Número de Série do Motor	1009103886 / 1009103887 / 1009103888
Modelo do Motor:	6R099T650B
ID do Equipamento	Navio Baltzador Comandante Vareia
Tipo de Serviço	WS / Reparo
Reportado por:	Antonio Lima
Data:	15/10/2015

Bicos Injetores

Fotos dos bicos injetores dos motores em referência mostrando as marcas de corrosão presentes em todas as peças:



Tal corrosão não permite que os bicos sejam calibrados, tornando-se necessária a substituição do conjunto de injetores e molas.

Figura 3: Partes relevantes do segundo relatório MTU sobre a manutenção (MTU, 2015).

Conforme manual do Motor, não é prevista a troca de tais elementos na revisão de 2400 horas de funcionamento. Apenas testes.

5.4 Procedimentos de Conservação e Manutenção

Tabela de Períodos de Manutenção

Horas de Funcionamento	Categoria de Manutenção Grupo de Aplicação	
	Categoria I 1D /1DS Inicial	Categoria II 1B Inicial
25/30	A	A
100	A	A
150	A	A
200	B	A
300	A	B
400	C	B
450	C	A
500	A	A
600	B	C
700	A	A
750	A	A
800	D	A
900	A	B
1000	B	B
1050	B	A
1100	A	A
1200	C	D
1300	A	A
1350	A	A
1400	B	A
1500	A	B
1600	E	B
1650	E	A
1700	A	A
1800	B	C
1900	A	C
1950	A	A
2000	C	A
2100	A	B
2200	B	B
2250	A	A
2300	A	A
2400	D	E
2500	D	E

5.3 Procedimentos de Conservação e Manutenção

Tabela de Categorias de Manutenção

ITEM	PROC.	PAG.	INICIAL	A	B	C	D	E
MOTOR BÁSICO								
1- Válvulas - verificar folgas	MB01	5-6	<input type="checkbox"/>					
2- Cilindros - medir compressão	MB02	5-6	<input type="checkbox"/>					
3- Elementos de fricção - verificar aperto	MB03	5-7	<input type="checkbox"/>					
SISTEMA DE ARREFECIMENTO								
4- Fluido de arrefecimento - verificar nível	SR01	5-8	<input type="checkbox"/>					
5- Válvula Termostática - verificar	SR06	5-10	<input type="checkbox"/>					
6- Mangueiras - verificar estado de conservação	SR07	5-10	<input type="checkbox"/>					
7- Bomba de Circulação - verificar estanqueidade	SR08	5-10	<input type="checkbox"/>					
8- Conexões e juntas - verificar estanqueidade	SR09	5-11	<input type="checkbox"/>					
9- Trocador de calor do motor - limpar	SR12	5-12	<input type="checkbox"/>					
10- Trocador de calor do motor - verificar estanqueidade	SR13	5-12	<input type="checkbox"/>					
11- Trocador de calor do motor - verificar anodo de sacrifício	SR15	5-13	<input type="checkbox"/>					
12- Filtro de água bruta - limpar	SR16	5-14	<input type="checkbox"/>					
13- Bomba de água bruta - verificar rotor	SR17	5-14	<input type="checkbox"/>					
14- Bomba de água bruta - substituir rotor	SR18	5-14	<input type="checkbox"/>					
SISTEMA DE COMBUSTÍVEL								
15- Pré-filtro separador - drenar água e contaminantes	SC03	5-15	<input type="checkbox"/>					
16- Filtro duplo - substituir elemento	SC05	5-15	<input type="checkbox"/>					
17- Pré-filtro da bomba injetora - limpar elemento	SC08	5-16	<input type="checkbox"/>					
18- Bomba injetora - regular início de fornecimento	SC09	5-17	<input type="checkbox"/>					
19- Bicos injetores - testar	SC12	5-18	<input type="checkbox"/>					

Figura 4: Manual de Manutenção do Motor (MTU, 2010).

A falha precoce dos injetores em questão levantou a dúvida sobre o que poderia ter causado a corrosão, uma vez que, neste caso, a ocorrência impactou diretamente o orçamento e o planejamento do meio para a manutenção geral prevista.

À vista disso, o Comandante do Navio, à época, encaminhou Carta à empresa, solicitando resposta à intrigante falha que, por óbvio, prejudicaria o desempenho do motor, além de possuir potencial para novos danos em outros subsistemas. Como resposta, a empresa encaminhou os seguintes esclarecimentos:

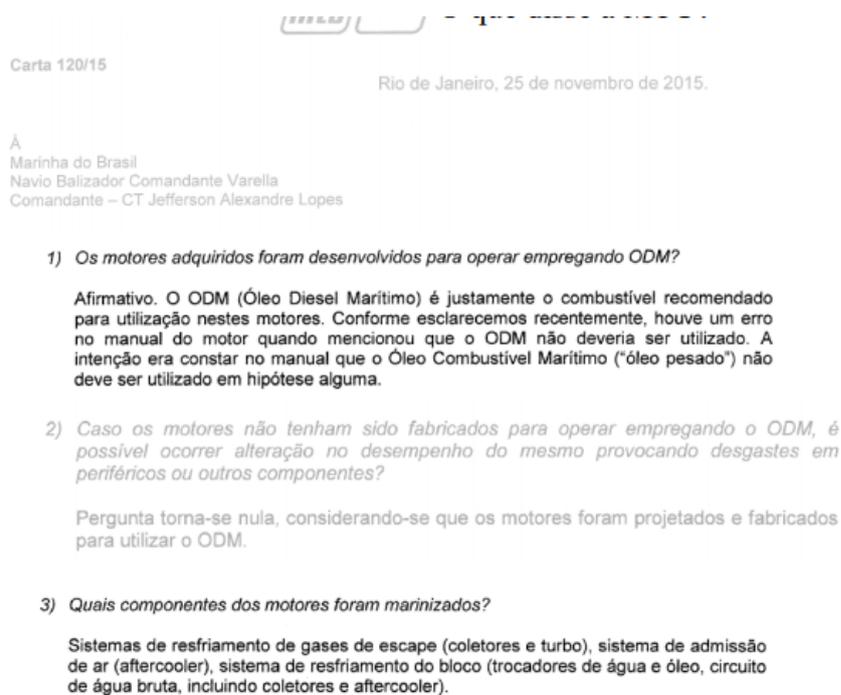


Figura 5: Partes relevantes da Carta da 120/15 da MTU (MTU, 2015).

Nota-se que a empresa respondeu indiretamente que o sistema de injeção do motor não foi contemplado com marinização. A fabricante rechaçou a hipótese de que o equipamento não estivesse preparado para trabalhar com Óleo Diesel Marítimo (ODM), além de acusar erro no manual, que veta ODM como combustível para o Motor em questão, embora marinizado.

A MTU sugeriu que a falha fosse consequência de combustível contaminado, o que soou com estranheza, uma vez que anualmente o Navio realizava o destaqueio para docagem. Tal procedimento era posterior a análise de Óleo Combustível feito pelo Depósito de Combustíveis da Marinha no Rio de Janeiro. A hipótese de combustível contaminado não foi conveniente e tampouco convincente uma vez que, até então, não existira recusa de recebimento

de combustível pelo depósito, tampouco registro de análise de óleo em desacordo com os requisitos mínimos exigidos pela Diretoria de Engenharia Naval. Fato é que, recentemente, houve uma atualização do manual. Da versão antiga para a mais nova manteve-se o veto ao ODM. Houve, portanto, a manutenção das recomendações, o que sugere que o manual está correto.

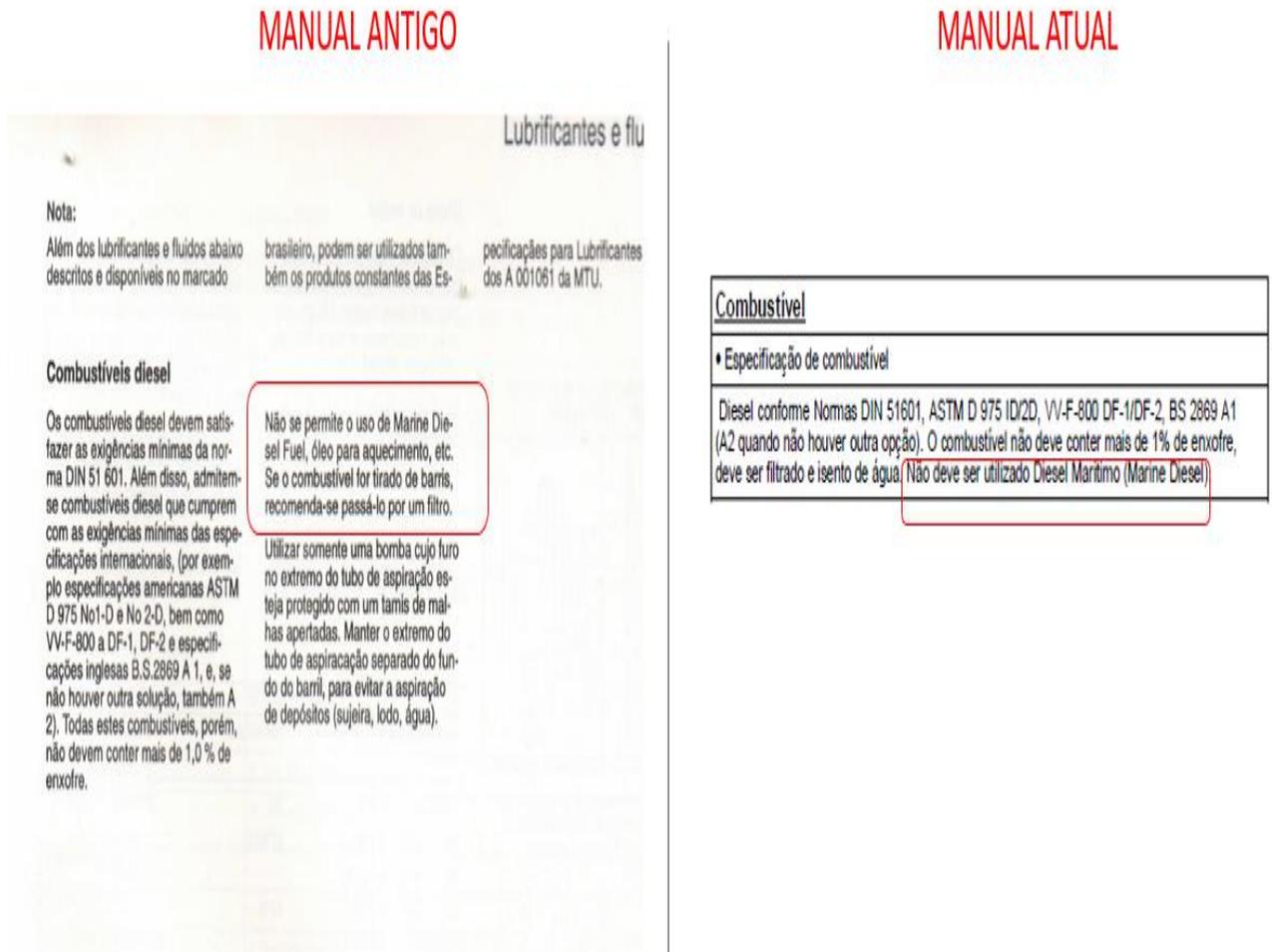


Figura 6: Comparação entre manuais: à esquerda, antigo; à direita, manual atualizado (MTU 1992; MTU 2010).

No intuito de criar hipóteses para a falha em questão, recorreu-se ao artigo Caracterização Físico-Química de Óleo Diesel Rodoviário e Marítimo por Técnicas Convencionais e Destilação Simulada por Cromatografia Gasosa, de Camila Gisele Damasceno Peixoto “et al”, cujas comparações se dão através de Óleo Diesel Marítimo utilizado pela Marinha do Brasil e Óleo Diesel Rodoviário coletado em postos de gasolina da região metropolitana de Natal.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho, foram analisadas três amostras de óleo diesel, sendo uma amostra de diesel marítimo (ODM) e outras duas de diesel automotivo com presença de biodiesel e com diferentes concentrações de enxofre, dos tipos S10 e S500. O diesel marítimo foi fornecido pela Base Naval de Natal e as amostras de óleo diesel rodoviário foram coletadas em posto revendedor da região metropolitana de Natal/RN.

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Instituto de Química, Laboratório de Catálise e Petroquímica
⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Instituto de Química, Laboratório de Catálise e Petroquímica

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização físico-química

As amostras de óleo diesel dos tipos S10, S500 e ODM foram submetidas primeiramente a uma caracterização físico-química. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da caracterização físico-química do S1800, S500 e ODM.

ANÁLISE	RESULTADO		
	S10	S500	ODM
Enxofre Total, mg/kg	7	250	905
Massa Específica a 20° C, kg/m ³	837,2	837,0	848,1
Ponto de Fulgor, °C	63,0	58,0	65,0
Viscosidade Cinemática a 40 °C, mm ² /s	2,622	2,910	3,518
Teor de biodiesel, %v/v	6,8	7,0	Isento

Figura 7: Análise de ODM x Óleo Diesel Rodoviário (PEIXOTO, 2015).

Nitidamente, pode-se observar, na figura anterior, que há considerável concentração de enxofre no ODM utilizado pela Marinha do Brasil, quando comparado ao Óleo Diesel S10. Neste ponto, pode-se aceitar a justificativa de que o resultado era esperado, até porque, os combustíveis são de fato diferentes e, por possuírem aplicações distintas, nada mais justo que suas propriedades sejam distintas. Cabe lembrar, entretanto, que o motor objeto de estudo, na verdade, é genuinamente rodoviário, Mercedes-Benz. Remete-se agora, ao fato de que o sistema de injeção deste motor não é parte contemplada na marinização, conforme atestou o fabricante, como visto anteriormente. Ora, se o motor é primordialmente rodoviário, salvo ser na sua totalidade marinizado, o combustível mais apropriado para este tipo de motor é o rodoviário, uma vez que os demais componentes podem não apresentar as mesmas resistências quando em contato com substâncias para os quais não foram projetados.

A Dissertação de Daniel Mousinho Lago (Universidade Federal do Rio Grande do Norte), 2016, discorre sobre as principais falhas em bicos injetores, apresentando-as como: Desgaste Erosivo; Fadiga de Contato; Desgaste Adesivo; e Corrosão, ligada ao teor de Enxofre, que por sua vez, também relaciona-se com a emissão de gases tóxicos, poluentes do meio ambiente por causarem a chuva ácida.

Percebe-se, deste modo, a forte relação entre o teor de enxofre e a falha do subsistema injetor do Motor, indicando que é válida a hipótese de que, de fato, há falhas em

Motores a Diesel que decorram dos produtos do enxofre.

Aproveitando-se do fato de que entraram em vigor, desde 1º de janeiro de 2020, as novas regras sobre emissões de gases dos navios estabelecida pela Organização Marítima Internacional (IMO) e que deverá ser adotada por todos os países que integram a Organização das Nações Unidas, no intuito de se reduzir as emissões de SO_2 (dióxido de enxofre), este estudo discorrerá sobre assuntos importantes que englobem tanto os problemas no equipamento, cujas consequências são imediatas, quanto aos problemas globais, os quais envolvem o meio ambiente e que, a despeito de suas consequências serem de longo prazo, as discussões no cenário internacional são calorosas e já impactam na economia, uma vez que, não cumpridas as exigências estabelecidas pela IMO, um navio mercante pode não ser autorizado a atracar em determinados portos. Não é exagero imaginar que em um futuro breve essas exigências podem ser estendidas aos navios militares, quando em visita aos portos estrangeiros. Sem contar a possibilidade de tais exigências já impactarem a produção de combustíveis de quem os fornecem para a Marinha.

3 MOTOR E CICLO DIESEL

Para melhor entendimento das discussões e abordagens expostas neste estudo, é necessário apresentar um embasamento teórico sobre Motores Diesel, apresentando de maneira clara algumas características que serão oportunas para o entendimento do caso em questão.

3.1 Máquinas Térmicas e Ciclo de Carnot

De acordo com Heck (2009), uma máquina térmica é um dispositivo – geralmente contendo gás – ao qual se entrega uma quantidade de calor e se recebe em troca uma quantidade de trabalho. Carnot preocupou-se em estudar o rendimento das máquinas térmicas e concluiu que nenhuma máquina térmica terá eficiência maior que aquela obtida operando nas condições do ciclo de Carnot, de transformações termodinâmicas de um gás ideal. Seu funcionamento consiste em duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas (impermeável ao calor) alternadamente, que permite menor perda de energia (Calor) para o meio externo (fonte fria).

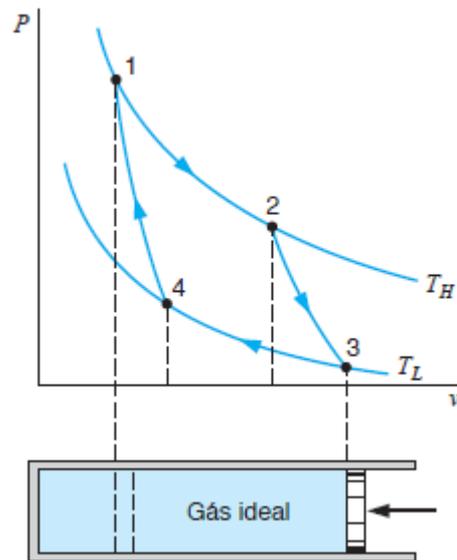


Figura 8: Ciclo de Carnot (BORGNAKKE, 2012).

Carnot definiu o rendimento da máquina térmica como $\eta = \frac{w_{liq}}{q}$ (Eq.1), isto é, trabalho líquido sobre o calor fornecido. Com manipulação algébrica, pode-se chegar à expressão simplificada do rendimento da máquina de Carnot $\eta = 1 - T_L/T_H$ (Eq.2), onde T_L é temperatura da fonte fria e T_H é a temperatura da fonte quente. Ou seja, o rendimento depende apenas das temperaturas da fonte fria e da fonte quente e nenhum outro ciclo termodinâmico pode ultrapassar tal valor, η_{Carnot} , trabalhando entres as temperaturas correspondentes.

3.2 Ciclo Padrão a Ar Diesel

Esse ciclo é o ideal para o motor diesel e no diagrama pode-se observar que há uma compressão adiabática, seguida de uma transformação isobárica, que, por sua vez, precede uma expansão adiabática e termina com uma transformação isocórica, a partir da qual, o ciclo reinicia-se e todas essas etapas são novamente cumpridas.

O ciclo padrão a ar, como próprio nome sugere, não trabalha com combustível. Nos ciclos idealizados, processos complexos de não-equilíbrio e irreversibilidades são desprezados em detrimento de uma análise quantitativa simplificada. Entretanto, apresenta de forma razoável os limites de funcionamento do ciclo real, que contempla os gases não ideais.

Na figura a seguir, discrimina-se graficamente o ciclo ideal quanto ao real, no diagrama PxV.

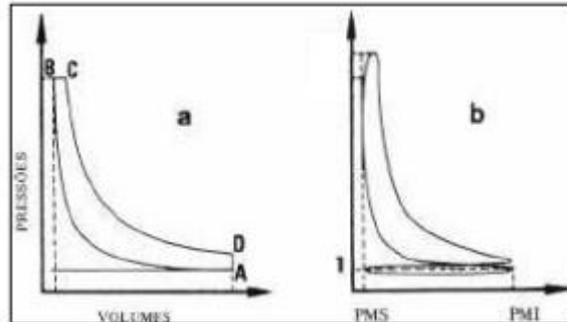


Figura 9: Comparação entre ciclo diesel ideal (a) x ciclo diese real (b) (SILVA, 2012).

De acordo com Borgnakke et al (2012), no ciclo ideal o calor é transferido ao fluido de trabalho a pressão constante (B-C). Esse processo assemelha-se à injeção e queima do combustível no motor a diesel real. Quando atingido o ponto C, a transferência de calor cessa e o gás ideal sofre expansão isentrópica (C-D) até que o pistão atinja o ponto morto inferior (PMI). A rejeição de calor ocorre a volume constante quando o pistão ainda no PMI. Essa rejeição simula os processos de descarga e de admissão do motor real.

O rendimento do ciclo padrão Diesel é dado por:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{Cv(TD - TA)}{Cp(TC - TB)} = 1 - Q_L/Q_H \quad \text{Eq. 3}$$

3.3 Motor Diesel

Os motores a diesel são de autoignição por compressão, automotivos ou de embarcações, de pistão de combustão interna, além de máquinas térmicas que obtêm energia por meio de reações exotérmicas que ocorrem dentro das câmaras. A combustão transforma energia química do combustível em trabalho nos pistões, que por sua vez transmite por conjugados de torque ao eixo de manivelas por meio da conectora. Para melhor entendimento, segue a ilustração e as explicações adiante, retiradas de Fundamentos de Termodinâmica.

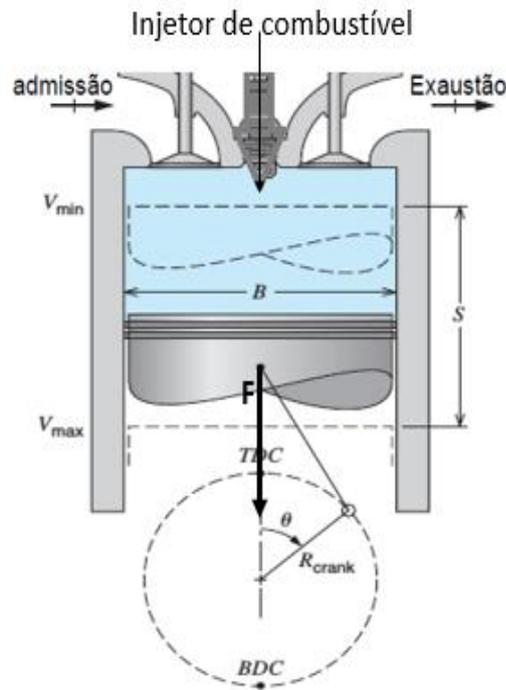
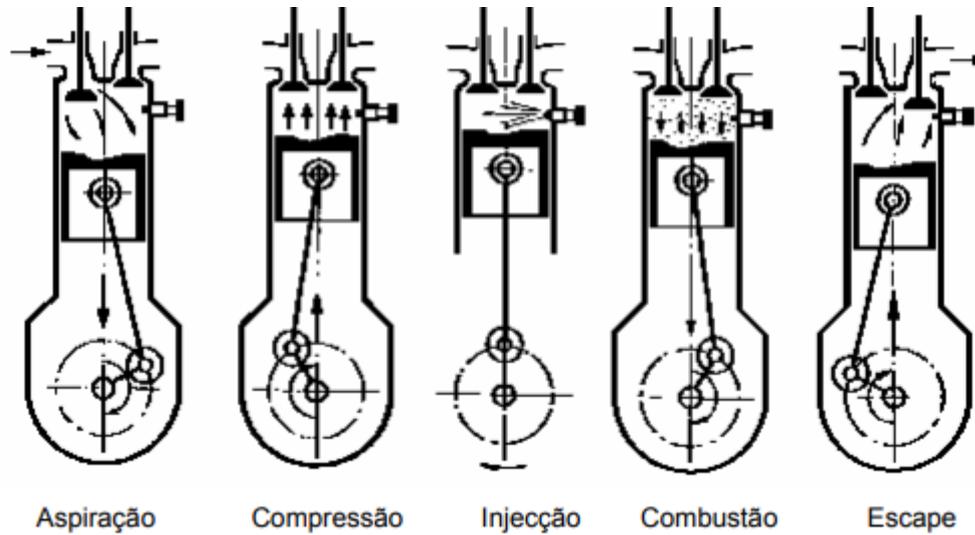


Figura 10: Volume de controle termodinâmico do cilindro (adaptado de BORGNAKKE, 2012).

Na figura, θ é o ângulo da manivela em relação ao eixo do cilindro, BDC significa ponto morto inferior, ao passo que TDC representa o ponto morto superior. \mathbf{F} representa o vetor força total segundo eixo do cilindro e R_{crank} é o módulo do vetor \mathbf{r} , Raio de Manivela, cuja direção é variável conforme θ . O torque instantâneo é dado pelo produto vetorial $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$ (Eq. 4) Esse torque varia de acordo com θ . Borgnakke et al. explica que para se obter a cilindrada de cada cilindro do motor, recorre-se a expressão $V_{\text{cil}} = \frac{\pi}{4} B^2 S$ (Eq.5), onde B é o diâmetro do pistão e S o curso do pistão, dado por $S = 2R_{\text{crank}}$ (Eq.6). A razão de compressão é dada por $z = V_{\text{máx}}/V_{\text{min}}$ (Eq.7), onde $V_{\text{máx}}$ é o volume no cilindro quando o pistão se encontra no ponto morto inferior e V_{min} é o volume da câmara de combustão.

Acrescenta-se a análise da expressão $w_{\text{liq}} = \oint P dv \equiv P_{\text{mef}}(v_{\text{max}} - v_{\text{min}})$ (Eq.8) onde w_{liq} é trabalho líquido específico num ciclo completo, usada para definir a pressão média efetiva. O trabalho líquido realizado por um cilindro em um ciclo é dado pela fórmula $W_{\text{liq}} = m \cdot w_{\text{liq}}$ (Eq.9) onde m é a massa do fluido de trabalho. Chega-se à expressão do trabalho líquido em função da pressão média efetiva, cuja fórmula é $W_{\text{liq}} = P_{\text{mef}} \cdot (V_{\text{max}} - V_{\text{min}})$, Eq.10. Assim, a potência do motor pode ser expressa por $P = N \cdot m \cdot w_{\text{liq}} \cdot n$ (Eq.11), onde n é rotações por segundo, expressão que deve ser corrigida por um fator 0,5 quando utilizada no cálculo de

potência de motores a quatro tempos, uma vez que são necessárias duas revoluções completas para que o motor de quatro tempos complete um ciclo, como mostrado na tabela a seguir:



Processo/Movimento do Pistão	Posição da Manivela/Ângulo da Manivela	Variação de Propriedades
Admissão	PMS a PMI/ 0-180°	$P = \text{cte}$, $V \uparrow$, escoamento de admissão
Compressão	PMI a PMS/180-360°	$V \downarrow$, $P \uparrow$, $T \uparrow$, $Q=0$
Ignição e Combustão	Aproximando-se rapidamente de PMS/360°	$V = \text{cte}$, Q fornecido, $P \uparrow$, $T \downarrow$, $Q=0$
Expansão	PMS a PMI/360-540°	$V \uparrow$, $P \downarrow$, $T \downarrow$, $Q=0$
Exaustão	PMI a PMS/540-720°	$P = \text{cte}$, $V \downarrow$, escoamento de exaustão

Figura 11: A tabela explica a ilustração das sequências dos processos do movimento do pistão em um motor de quatro tempos. Ilustração (DANTE, 1970); tabela adaptada (BORGNAKKE, 2012).

Em face do exposto nesse item, existem elementos suficientes para uma análise das características e dados técnicos, pela ficha técnica do equipamento, conforme manual do motor diesel 6R099 TB, objeto deste estudo:

Indicações Gerais	Dados Técnicos	unidade
Configuração	Vertical, cilindros em linha	x
Princípio de funcionamento	Motor Diesel 4 tempos	x
Número de Cilindros	6	x
Diâmetro Interno dos Cilindros	0,975	dm
Taxa de Compressão	17,4	x
Curso de Pistão	1,33	dm
Pressão de Compressão medida a motor quente	20	bar
Velocidade média dos Pistões a 2800rpm	12,41	m/s
Binário Máximo	808	Nm
Peso do Motor sem água e óleo	620	kg
Potência	320	CV
rotações	2800	RPM
Consumo de combustível na potência nominal	235	g/kWh

Figura 12: Ficha técnica do motor 6R099 (MTU, 1992).

De posse dos dados acima, utilizando-se da Eq.5, já apresentada, calcula-se a cilindrada de cada cilindro do motor 6R099:

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \times (0,975)^2 \times 1,33 = 0,993 \text{ dm}^3 \text{ (0,993 litro)}. \text{ Eq.5.}$$

Como o número de cilindros para este motor é 6, chega-se à denominação:

6 (cilindros) R (*rail*, cilindros em linha) 099 (cilindrada de cada cilindro).

Então, 6 x 0,993 é a cilindrada do motor em dm^3 .

Além de presentes nos sistemas de geração de energia dos Navios da Classe Varella, de acordo com a norma da MB Engenlmarinst 05-10D, os motores 6R099, de igual forma, fazem parte do sistema dos navios da Classe Grajaú, também para geração de energia, contendo três desses motores em cada navio e, como dito anteriormente, são genuinamente rodoviários, porém adaptados para uso em embarcação, por isso, denominados marinizados.

4 SISTEMA DE COMBUSTÍVEL DO MOTOR DIESEL 6R099

Para Brunetti (2012) apud Reis (2018), no motor Diesel o combustível deve ser injetado diretamente na câmara de combustão com alta pressão (acima de 200 bar, podendo alcançar valores superiores a 2000 bar). E, finalmente, atomizado, ao final da compressão, alcançando também parte da expansão. A distribuição e atomização do combustível na câmara de combustão são essenciais no processo de combustão. E, por isso, a importância do desempenho do sistema injeção para o funcionamento do motor. O Sistema de Injeção deve suprir, medir, distribuir, pulverizar e, evidentemente, injetar o óleo combustível que entra na câmara de combustão, no momento certo, com a taxa desejada.

Segundo manual de operação do Motor 6R099, o sistema de combustível dos motores diesel pode ser dividido em dois subsistemas: Sistema de Baixa Pressão e Sistema de Alta-Pressão.

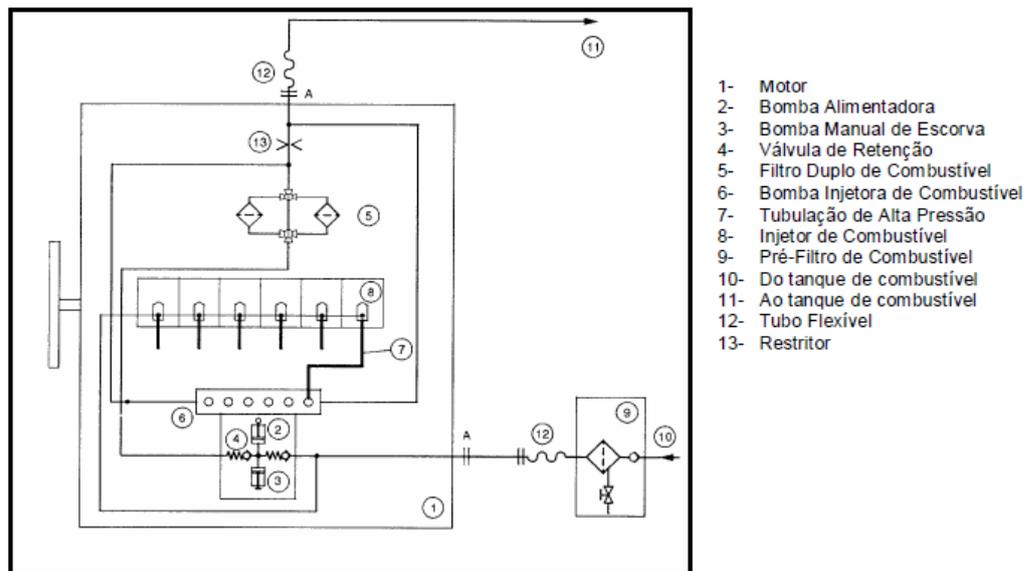


Figura 13: Sistema de Combustível do motor 6R099 (MTU, 2020).

O combustível armazenado no tanque é admitido por um pré-filtro (9), externo ao motor, onde as partículas maiores e a água são separadas. Os tubos flexíveis (12), em sequência, garantem o isolamento do movimento vibratório do motor à tubulação fixa externa. Existe uma bomba manual (3) que é utilizada para a primeira escorva do sistema, ou seja, para remoção de ar da tubulação. A bomba de alimentação (2) bombeia o combustível do tanque na operação normal do motor e tem a função, também, de compensar o desnível do tanque em relação à

entrada da bomba injetora, além de compensar as perdas de carga do fluxo que ocorrem durante a circulação do combustível.

O funcionamento da bomba de alimentação pode ser descrito da seguinte maneira: um came integrado ao eixo da bomba injetora aciona um pistão de efeito simples através de um tucho com rolete e pino, retornado por mola, o qual transfere o combustível entre duas câmaras. Uma válvula de retenção (4) impede que o combustível retorne quando o acionamento é interrompido. Quando a pressão na tubulação de descarga supera determinado valor, a mola de retorno do pistão faz com que este não atinja mais seu curso total, reduzindo a vazão de combustível, que pode se reduzir a zero caso a pressão na descarga continue subindo. Essa característica protege o filtro de combustível e a tubulação de baixa pressão contra danos. Dando continuidade ao fluxo no circuito, o combustível atinge o filtro duplo (5), onde é filtrado e segue à entrada da bomba injetora (6). Um restritor (13) na saída do filtro duplo deixa passar a parte excedente de combustível não utilizado, e mantém o sistema pressurizado. Essa foi a descrição do circuito de baixa pressão.

Ao chegar na bomba injetora, inicia-se o circuito de alta pressão. A bomba injetora, através de pistões individuais para cada cilindro, acionado por cames, fornece combustível à alta pressão aos injetores.

O combustível não utilizado pelos injetores retorna, para reutilização, ao circuito de baixa na aspiração da bomba alimentadora. O combustível que, após passar pela bomba de alimentação, não seja utilizado pela bomba injetora, é conduzido ao restritor na saída do filtro duplo, conforme anteriormente mencionado, juntamente com eventuais bolhas de ar, retornando ao tanque.

Existem certos tipos de sistemas de combustíveis dentre os mais utilizados, dentre os quais, destacam-se *Unit Injector System*; *Individual Pump and Nozzle System*; e *Common Rail System*. A descrição objetiva:

- I. *Unit Injector System* (Unidade Injetora): é um elemento injetor na qual bomba e injetor estão combinados em um só corpo e cada cilindro é provido com um desses elementos (GANESAR, 1995);

- II. *Individual Pump and Nozzle System* (Sistema Bomba/Injetor individual): Nesse tipo, a cada cilindro corresponde uma BB e uma válvula de injeção. Difere do sistema anterior pelo fato de esses órgãos ficarem separados, isto é, a válvula de Injeção na cabeça do cilindro e a bomba ao lado do motor. As bombas poder ficar agrupadas em linha num mesmo bloco ou instaladas separadas (GANESAR, 1995);
- III. Em Linha Comum (*Common Rail*): Os injetores recebem o óleo diesel pressurizado da linha de alta e o injetam na câmara de combustão do motor. A bomba gera a alta pressão que está disponível para todos os injetores através de um tubo distribuidor comum. Essa pressão pode ser controlada independentemente da rotação do motor. Pressão do combustível, início e fim da injeção são precisamente calculados pela unidade de comando. Como a pressão está sempre disponível no Rail, a injeção pode ser feita de maneira bastante flexível (BOSH, 2016).

A descrição do sistema de combustível do 6R099 confunde-se com a definição de um tipo de Sistema de Combustível específico: Sistema Bomba/Injetor individual.

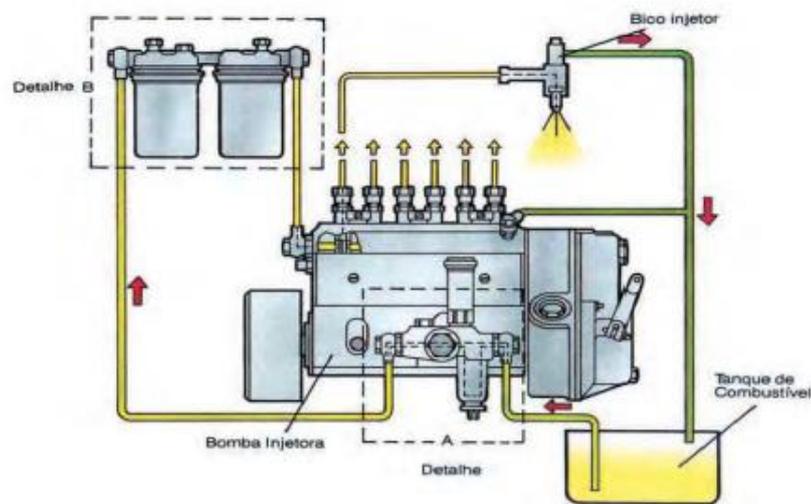


Figura 14: Exemplo de Sistema Bomba/ Injetor Individual (MAHLE, 2016).

5 BICOS INJETORES

Segundo Scania (2009) apud Reis 2018, os bicos injetores são elementos da mais alta precisão que introduzem o combustível na câmara de combustão após receberem da bomba

injetora o óleo diesel sob alta pressão. Abrem-se apenas quando comandados. São responsáveis por pulverizar finamente o combustível para dentro da câmara de combustão do motor, garantindo que a combustão seja completa. A pulverização do combustível introduzido no ar comprimido (com temperatura na casa dos 700° C) dentro da câmara de combustão desencadeia a auto ignição do óleo diesel. Quanto melhor essa pulverização, mais completa é essa reação química e melhor são os resultados da elevada liberação de energia.

Então, não é exagero concluir que o desempenho do bico injetor está diretamente relacionado com o desempenho do motor. Além disso, está associado ao consumo de combustível, emissão de gases tóxicos e material particulado, emissão de ruído. Daí a importância de sua performance para o processo de combustão.

A atomização, conhecida como pulverização do combustível, para ser atingida de forma ótima, exige que o bico injetor possua bocais, micro furos, podendo variar de 200 µm a 600 µm, dependendo do modelo. Assim, para se obter a elevada performance requerida para a uma operação mais efetiva do sistema, o bico injetor é meticulosamente fabricado para evitar anomalias durante o escoamento do fluido, as quais podem levar a perda de desempenho do motor e produção de poluentes. Os processos de fabricação com elevada precisão, chegando a rigorosos níveis de tolerância dimensional, como no caso da sede de agulha, que permite uma variação de $\pm 0,5$ µm em seu diâmetro, $\pm 0,17^\circ$ em sua conicidade (LAGO, 2018).

A figura seguinte expõe, com proporções aumentadas, a sensibilidade e precisão com que esses elementos trabalham. Observa-se, por exemplo, o ínfimo Gap (folga) entre agulha e bico; o encaixe entre o corpo do injetor e o corpo da agulha, anterior ao Gap; os micros furos e *spray* no bocal, próximo à sede da agulha.

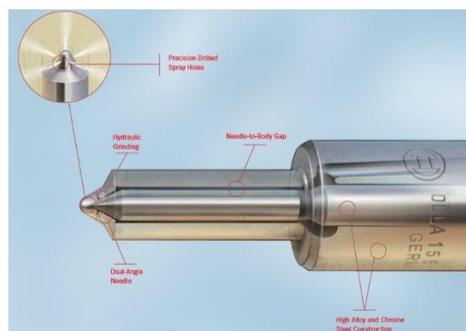


Figura 15: Bico injetor (retirado de LAGO, 2018).

6 COMBUSTÍVEIS MARÍTIMOS

6.1 Combustíveis Marítimos na MB

A Diretoria de Engenharia Naval (DEN), por meio da norma Engenalmarinst N05-10D, define o Óleo Diesel Marítimo (ODM), produzido pela Petrobrás e disponível em toda costa brasileira, como combustível substituto para os motores diesel da MB, considerado equivalente ao “Marine Gas Oil” (MGO), comercializado em diversos países. Outrossim, define o Óleo Combustível Marítimo para Turbinas (OCMT), antigo MAR-C, como combustível substituto dos produtos originalmente recomendados pelos fabricantes de turbinas a gás. Os navios sediados na área do Rio de Janeiro e equipados com propulsão CODOG, segundo a norma, também podem utilizar o OCMT, que é produzido especialmente pela Petrobras para a MB e distribuição é restrita à área do Rio de Janeiro.

No tocante ao emprego em turbinas a gás, de acordo com a Engenalmarinst, o ODM é considerado como combustível alternativo devido a sua especificação ser menos rigorosa, pois alguns requisitos controlados no OCMT podem não ser atingidos, destacando-se: número de cetano, ponto de névoa, água e sedimentos, destilação 90%, corrosividade ao cobre, estabilidade e oxidação estabilidade à oxidação, acidez total, teor de vanádio e sódio mais potássio, sem contar as incertezas relativas à qualidade do ODM comercializado em alguns portos da costa brasileira. Por isso, a DEN recomenda estabelecer o prazo máximo de trinta dias para consumo do ODM, em caso de uso em turbina a gás.

Em síntese, o ODM, disponível nos principais portos do país, é considerado, em relação ao OCMT (antigo MAR-C), o combustível substituto para motores Diesel e alternativo para turbinas a gás e caldeiras de alta pressão.

Dessa forma, pode-se inferir que o combustível utilizado nos motores 6R099 pelo Navio Balizador Comandante Varella, com sede no Rio Grande do Sul, é de fato ODM, já que a hipótese de ser OCMT foi descartada, uma vez que é de uso exclusivo de navios equipados com propulsão CODOG, além de sua produção e distribuição serem restritas a área do Rio de Janeiro, conforme norma técnica da DEN.

6.2 Óleo Diesel e Óleo Diesel Marítimo

O óleo diesel é um derivado do petróleo obtido no processo de destilação do petróleo bruto e constitui-se essencialmente de hidrocarbonetos, com cadeia de 10 a 25 átomos de carbono. Além disso, possui também enxofre, nitrogênio e oxigênio, dentre outros elementos.

A qualidade desse combustível está associada, principalmente, às propriedades como viscosidade, massa específica, número de cetano¹, pureza e teor de enxofre.

A Agência Nacional de Petróleo, em seu site, estabelece que para atender às aplicações do produto vários tipos de Diesel são comercializados e nacionalmente a ANP os classifica como:

- I. Óleo diesel (S10 e S500) de uso rodoviário: Utilizado em veículos automotivos; máquinas agrícolas; máquinas de construção; e máquinas industriais.
- II. Óleo diesel S1800 de uso não rodoviário: Utilizado em mineração; transporte ferroviário; e geração de energia elétrica; e
- III. Óleo diesel marítimo: uso em embarcações.

Não há como evitar a comparação entre o ODM e o diesel para uso rodoviário, uma vez que, o objeto de estudo deste trabalho é justamente um motor rodoviário que usa ODM. Relembrando que o sistema de combustível não fez parte da marinização realizada. Para otimização dos estudos realizados neste trabalho, foi de suma importância que as comparações entre Óleo Diesel Rodoviário e Óleo Diesel Marítimo se aproximasse da realidade do navio à época da falha dos injetores dos motores 6R099. Isto quer dizer que buscou-se fazer essa comparação com base em artigo científico que comparasse o Óleo Diesel Rodoviário ao Óleo Diesel Marítimo utilizado pela Marinha no ano de 2015, ou seja, no ano em que houve a descoberta da falha. O artigo Caracterização Físico-Química de Óleo Diesel Rodoviário e

¹Número de Cetano: de acordo com a norma Engenalmarinst 05-10D, é a característica que define a qualidade da ignição do combustível indicando a probabilidade de ocorrer pré-ignição, ocasionando redução de desempenho no motor diesel. Quanto menor, maior a probabilidade de ocorrer.

Marítimo por Técnicas Convencionais e Destilação Simulada por Cromatografia Gasosa, de Camila Gisele Damasceno Peixoto “et al” integrou as apresentações de estudos científicos do 1º Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis realizado pela Universidade Federal de Campina Grande, entre os dias 13 e 15 de maio de 2015. Esse artigo comparou o Óleo Diesel Rodoviário colhido em postos de combustíveis da cidade de Natal e entornos, com o Óleo Diesel Marítimo cedido pela Marinha, por meio da Base Naval de Natal.

A análise não só caracteriza o Óleo Diesel quanto suas características marcantes, como também o distingue dentre suas variedades, no que tange ao teor de enxofre e teor de biodiesel, por exemplo. Sobre o teor de biodiesel nota-se que o ODM é isento; ao passo que o teor de enxofre no ODM é 129 vezes o teor de enxofre do Óleo Diesel Rodoviário mais comum, S10, conforme pode ser observado na imagem apresentada a seguir retirada do Artigo Científico anteriormente citado.

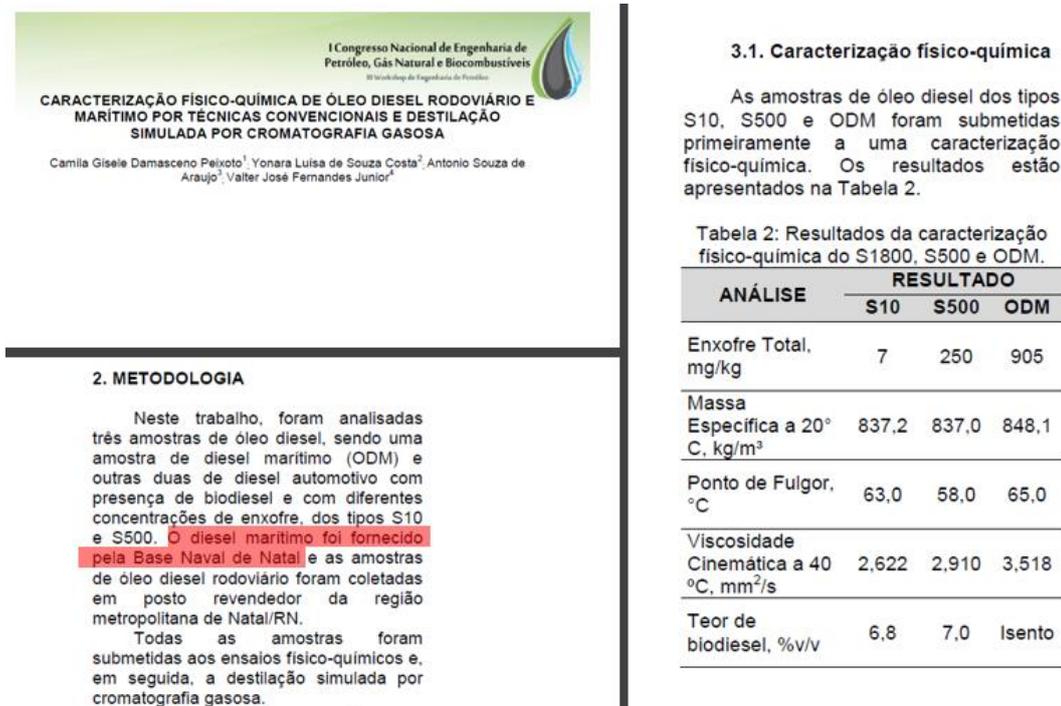


Figura 16: Comparação² entre o S10 e o ODM utilizado pela Base Naval de Natal, em 2015. (PEIXOTO, 2015).

² Os valores do ponto de fulgor do S10 e S500 da pesquisa acima apresentada estão em desacordo com os dados do Manual Técnico do Óleo Diesel (Petrobrás, 2013), o qual indica que o ponto de fulgor do S10 e S500 é de 38°C. Os demais valores encontrados pela pesquisa, em relação as outras características do Óleo Diesel, convergem, de maneira satisfatória, àqueles indicados ou previstos pela doutrina.

Além de possuir teor de enxofre maior que o S10, o ODM possui número de cetano inferior em relação ao diesel rodoviário, com mínimo de 40, contra mínimo de 48 do S10 e S500 (PETROBRÁS, 2013). Com efeito, o óleo diesel marítimo possui especificações distintas do óleo diesel rodoviário e, no Brasil, o diesel marítimo possui um limite de 500 ppm de enxofre, o que equivale a 0,5% em massa, ao passo que o óleo diesel rodoviário é comercializado nos tipos S10 e S500, os quais possuem 10 ppm e 500 ppm de enxofre, respectivamente (EPE, 2019).

Diante do exposto, os questionamentos são inevitáveis:

- I. Por que razão o manual dos motores 6R099 veta o uso de ODM?
- II. Um sistema de combustível preparado para trabalhar com combustível rodoviário tem condições de receber outro tipo de combustível com teor de enxofre 129 vezes maior sem sofrer corrosão decorrente de ácido sulfúrico e ácido sulfuroso em suas partes metálicas?

A hipótese é que o elevado teor de enxofre no ODM seja responsável, em parte, pela corrosão dos bicos injetores, genuinamente preparados para trabalharem com combustível rodoviário.

6.3 Enxofre e efeitos dos seus ácidos no motor

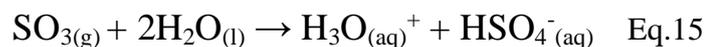
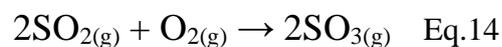
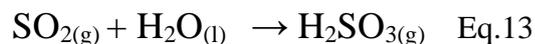
Lago (2013) enumera e explica, em sua dissertação, tipos de desgastes que comprometem o correto funcionamento do bico injetor, quais sejam:

- I. Desgaste Erosivo-Cavitativo: causado por vórtices, que ocorrem devido às altas pressões e velocidades do escoamento do fluido no interior do bico, que podem gerar gradiente de velocidades e consequente cavitação;
- II. Desgaste Erosivo: que ocorre quando partículas transportadas pelo fluido colidem contra a superfície do injetor, retirando material;
- III. Fadiga de Contato: trincas geradas devido aos carregamentos termomecânicos aos quais a ponta do bico injetor é submetida nos sucessivos ciclos de combustão do motor;

- IV. Desgaste Adesivo: que se dá pelo acúmulo de depósitos – de carbono por exemplo – na superfície do bico, prejudicando a injeção e atomização do combustível na câmara de combustão, devido à obstrução dos microfuros;
- V. Desgaste Corrosivo, que, segundo Kaul (2007) apud Lago (2013), deve-se as interações entre o injetor, umidade e elementos como enxofre e íons metálicos, os quais deixam os componentes do sistema de injeção, metálicos, susceptíveis à corrosão.

O dióxido de enxofre (SO₂) é subproduto da queima de combustíveis fósseis. O SO₂ pode se reagir diretamente com a água e formar ácido sulfuroso, um ácido fraco. Na presença de matéria particulada e aerossóis, o dióxido de enxofre pode reagir, também, com oxigênio e formar trióxido de enxofre, SO₃, que, por sua vez, em água, forma ácido sulfúrico, ácido forte (ATKINS, 2012). Por essas duas variações, a equação da combustão, escrita de maneira genérica a seguir, apresenta o SO_x como um dos produtos. As demais equações químicas de todo esse processo, de igual forma, são apresentadas.

Combustível + Ar → CO₂ + H₂O + N₂ + O₂ + CO + NO_x + HC + SO_x + Material Particulado + Energia (Eq. 12, equação da combustão não balanceada. (CAPANA, 2008)



Eq. 13, 14, 15 (ATKNIS, 2012).

Para Pinheiro (2004) apud Da Silva (2013), o teor de enxofre significa a concentração deste componente no óleo diesel. Para o autor, o enxofre é um elemento indesejável em qualquer combustível devido à ação corrosiva de seus compostos e à formação de gases tóxicos como SO₂ (dióxido de enxofre) e SO₃ (trioxido de enxofre), ou SO_x, que ocorre durante a combustão do produto. Na presença de água, o trióxido de enxofre leva à formação de ácido sulfúrico (H₂SO₄), poluente componente das chuvas ácidas e altamente corrosivo para as partes metálicas dos componentes do motor.

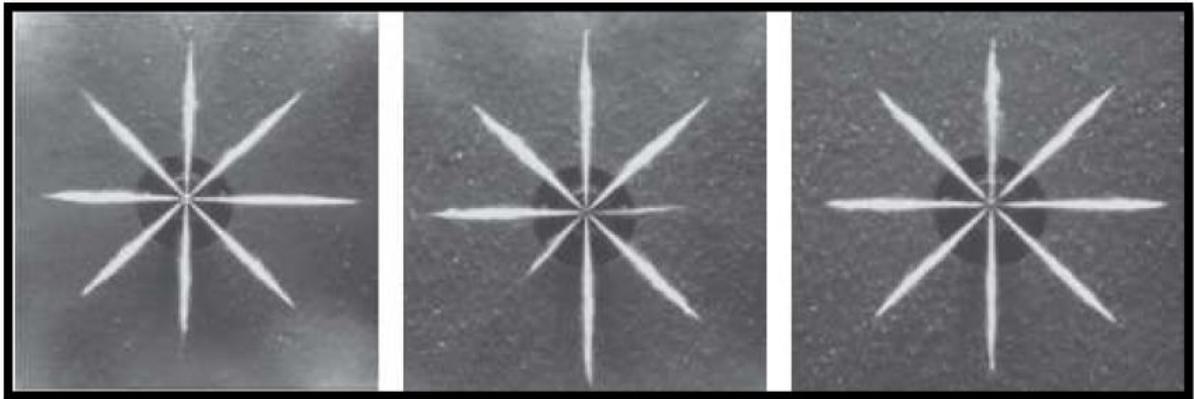


Figura 17: Evolução no padrão de atomização de injetor após corrosão (LAGO, 2013).

Na imagem anterior, retirada da dissertação de Lago (2013), a evolução no padrão de atomização do bico injetor apresentada em três instantes: antes da corrosão, após a corrosão e após a remoção do material corroído, da esquerda para direita. Estudos realizados por Karamangil e Taflan (2013) apud Lago (2013), mostram que a ocorrência de corrosão no bico injetor faz com que os depósitos se acumulem nos micro furos e alteram o padrão de atomização, fazendo com que, temporariamente, os jatos contenham uma quantidade menor de combustível, e, após a remoção dos depósitos de corrosão, aumentem a vazão devido ao alargamento dos microfuros, causados pela perda de material por desgaste corrosivo.

Além do efeito em bicos injetores, Ganesan (1995) destaca que o óleo lubrificante do motor deve ter caráter alcalino para neutralizar os agentes ácidos e evitar corrosão de demais componentes do motor. O enxofre contribui para aumento da acidez do lubrificante, propiciando a corrosão em outro componentes metálicos, além de outros desgastes, como na camisa no cilindro, por exemplo.

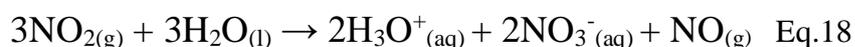
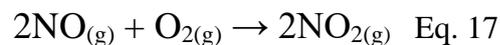
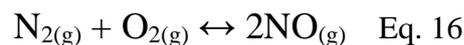
De acordo com Lima (2010) apud Filho (2016), as reações químicas que acontecem dentro do cilindro favorecem o desgaste corrosivo, que aumentam com a presença do enxofre. A remoção do filme protetor durante o deslizamento entre o cilindro e a camisa, de igual forma, facilita o ataque corrosivo nestas superfícies.

A corrosão nos bicos injetores possui consequências em cadeia (efeito cascata) podendo comprometer o motor como um todo. O aumento do diâmetro dos microfuros faz com que o combustível seja injetado de forma menos pulverizada e em quantidade maior ao

projetado, conforme imagem anterior. Dessa forma, haverá um aumento do consumo de combustível, por óbvio, e a combustão não será completa, devido ao desbalanceamento da reação. Em ambos os casos, tanto na injeção de mais combustível quanto na combustão incompleta, há como consequência choques entre gotículas de combustível (em excesso e não pulverizado) contra o pistão há altíssimas velocidades, causando-lhe erosões devido ao efeito de quantidade de movimento, $Q = mv$, (Eq. 16), onde v , neste caso, é o vetor velocidade. Outro efeito, é alteração na cor da fumaça, que ficará mais escura, por causa da fuligem, oriunda da combustão incompleta, que por sua vez gera carbonização nos injetores e o desgaste adesivo, como visto anteriormente, e, assim, a tendência é a obstrução do fluxo do combustível, impedindo o motor de funcionar corretamente.

6.4 Emissões, Bunker e IMO2020

A obra de Atkins (2012) diz que o pH das chuvas ácidas pode atingir valores abaixo de 4,3, o que se deve, em grande parte, as emissões de SOx e óxidos de nitrogênio, NO e NO₂. Segundo o livro, os principais componentes das chuvas ácidas são os ácidos fortes, ao passo que as chuvas não afetadas pelas atividades humanas possuem pH em torno de 5,7, contendo substancialmente, ácidos fracos, como, por exemplo, o ácido carbônico H₂CO₃, formado pela dissolução do dióxido de carbono na água. O autor destaca que a formação de NO só é espontânea em altas temperaturas, como as que ocorrem na câmara de combustão dos motores, por exemplo. E, então, o óxido nítrico pode ser oxidado no ar para formar o dióxido de nitrogênio, o qual reage com a água gerando ácido nítrico. A Eq. 12 apresentou que tanto o NOx quanto SOx são produtos da combustão e o processo de formação do ácido sulfúrico foi apresentado pelas equações Eq. 13, 14 e 15. Para o NOx, tem-se:



Cisneros (2012) reitera que existem nas emissões da combustão a formação de gás CO, monóxido de carbono, tóxico e que pode causar na saúde humana danos cerebrais

irreversíveis; a emissão de material particulado, como o chumbo, que pode causar câncer; e emissão de CO₂, gás responsável por alterações climáticas.

A Organização Marítima Internacional (IMO 2020) destaca que a redução na emissão pelos navios diminui, na saúde humana, os casos de acidente vascular encefálico, doenças pulmonares e cardiovasculares, além de câncer. E ressalta que, no meio ambiente, os efeitos da diminuição do enxofre nas emissões são: menores danos aos ecossistemas aquáticos e terrestres; menor acidificação dos oceanos; e, claro, prevenção de chuvas ácidas.

Segundo a Empresa Nacional de Energia (EPE 2019), existem duas classificações quanto aos combustíveis marítimos: ODM e OCM, que também é denominado Bunker. O OCM é um combustível utilizado em motores principais de grandes dimensões no sistema de propulsão de navios de grande porte e possui requisitos de qualidade mais restritivos em comparação ao ODM. No Brasil, a resolução da ANP, N° 52/2010, estabeleceu o limite máximo de teor de enxofre em 3,5%, em massa para o OCM, ao passo que para o ODM o limite foi de 0,5%. Ainda de acordo com a EPE (2019), em 2010 o Brasil ratificou o anexo VI da Marpol, Convenção Marítima Internacional para a Prevenção de Poluição por Navios, que é adotada pela IMO, que é uma agência especializada da Organização das Nações Unidas. Em 2016, os países membros que ratificaram o anexo VI da Marpol decidiram pela redução do teor de enxofre do bunker marítimo para 0,5%, a partir de 2020. Esses países serão responsáveis pelo monitoramento, regulamentação, fiscalização e pelo estabelecimento das sanções e penalidades, podendo, inclusive, negar atracação de navios que descumprirem a nova norma.

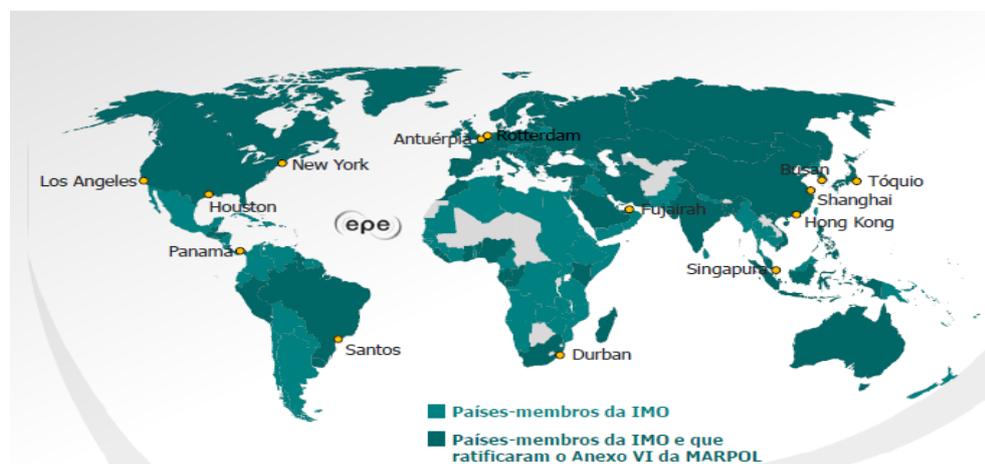


Figura 18: Países membros da IMO e que ratificaram o Anexo VI da Marpol (EPE, 2019).

A ANP publicou a Resolução n° 789/2019, que entrou em vigor em janeiro de 2020, reduzindo o limite máximo do teor de enxofre nos combustíveis marítimos para 0,5% (EPE, 2019).

A MB deve ser impactada, de imediato, em dois aspectos, no mínimo.

O primeiro, no que diz respeito ao OCMT, dito anteriormente, que é considerado pela DEN combustível substituto para turbinas. De acordo com a Engenalmarinst 05-10D, o teor de enxofre estabelecido para o OCMT prevê um máximo de 1%, sendo, portanto, superior ao novo limite. Como o Brasil é membro da IMO e do Anexo VI da Marpol, todos os portos brasileiros e todos os navios com bandeira brasileira deverão cumprir a nova regulamentação da IMO. Até o ano de 2019, os OCM's produzidos pela Petrobrás continham um teor médio de 0,7%. A Petrobras indicou que a medida será cumprida (EPE, 2019).

O segundo aspecto é em relação ao preço do ODM, que, por já atender os novos limites de emissões, é alternativa para o OCM. Com o crescimento de sua demanda, seu valor comercial tende a aumentar ao redor do mundo.

6.5 Biodiesel

Diante do exposto, o biodiesel brasileiro surge como alternativa sustentável para a diminuição de emissão de compostos do enxofre, por apresentar índices de enxofre menores que o ODM e possuir capacidade de redução de emissões de outros produtos tóxicos. Fora o fato de possuir um bom número de cetano e trazer consigo benefícios de ordem econômica e social para o Brasil (GUARIEIRO, 2016).

De acordo com o artigo de Guarieiro et al. (2016), a avaliação experimental dos desempenhos de motores a diesel marítimo utilizando-se de misturas de ODM com biodiesel apresentou resultados satisfatórios, apesar de redução, não muito considerável, na potência e torque do motor. Entretanto, ao final do estudo, os autores deixam claros que os resultados obtidos foram a curto prazo e que mais estudos devem ser analisados.

Assim, recorreu-se aos estudos de Filho (2015), que considera o biodiesel um combustível com elevado grau de oxidação, devido a tendência à polimerização, em decorrência de sua característica de higroscopicidade. É esperado, portanto, a médio prazo, corrosões,

formação de depósitos de carbono e degradação microbiológicas nos bicos injetores. Na mesma linha, LAGO (2018) trouxe em sua dissertação os resultados, sobre o tema, de Liaquat et al. (2014) e Wo et al. (2015), os quais demonstram que o uso de biodiesel favorece, de igual forma, a formação de depósitos de carbono no bico injetor, formados pela polimerização dos grupos funcionais presentes no biodiesel, deixando os microfuros obstruídos e prejudicando a injeção e atomização do combustível.

Dessa forma, conclui-se que, salvo melhor juízo, o biodiesel não é uma boa opção para uso marítimo, onde a umidade está sempre presente, em níveis razoáveis, por motivos claros.

7 TÉCNICAS PREDITIVAS

Após todo conteúdo apresentado, é fácil crer que a manutenção corretiva em bicos injetores consiste, basicamente, na substituição deles, devido a sensibilidade e precisão desses componentes. Isso pode significar elevados custos: a substituição imediata e urgente tende a ser onerosa, ao passo que problemas nos injetores não detectados por análise de tendências, a médio prazo, trazem como consequência falhas nos demais componentes do cilindro, consumo excessivo de combustível e perda de desempenho, pois como visto, problemas no injetor leva a outras falhas no motor, em um efeito cascata. Então, predizer as falhas em bicos injetores, qualquer que seja seu modo, é extremamente importante.

No intuito de facilitar a implementação de análises preditivas relacionadas a injetores, esse trabalho traz sugestões simples que podem ser utilizadas sem grande complexidade ao navio.

A qualidade do combustível, por exemplo, no âmbito da MB, pode ser verificada pelo laboratório do Depósito de Combustíveis da Marinha no Rio de Janeiro, para navios dessa região. Há laboratórios por todo Brasil que também podem ser contratados para a realização da análise.

Outra técnica trivial é a contínua inspeção visual da cor dos gases da descarga. Kardec et al (2009) diz que a inspeção visual é técnica subjetiva, mas fundamental para a definição de condição de equipamentos e componentes. Como dito no decorrer desse estudo, a

fumaça preta indica combustão incompleta e provável falha em bicos injetores. A alteração de cor desses gases, portanto, pode indicar tendência a falha em injetores. A fuligem pode ser detectada por inspeção visual (fumaça mais escura) ou pelo uso de filtros e equipamentos como opacímetro.

A pressão de combustão também é um parâmetro monitorável. Quando ocorre alta pressão de combustão, pode estar ocorrendo injeção em excesso de combustível, cuja causa possa ser aumento do diâmetro dos microfuros, causado por exemplo, por corrosão. Por outro lado, quando a pressão de combustão está baixa, a provável causa, se estiver relacionada aos bicos injetores, é desgaste adesivo, por depósito de carbono, por exemplo. Para essa medição pode-se usar transdutores de pressão (BAPTISTA, 1999).

A temperatura dos gases de descarga é outro parâmetro monitorável (BAPTISTA, 1999). Baixas temperaturas podem indicar insuficiência na injeção de combustível, fruto de possível obstrução dos microfuros. Ao passo que altas temperaturas podem significar problemas na atomização causados por falha que aumente os diâmetros dos microfuros. Para esse tipo de medição, pode-se utilizar a radiometria, útil para temperaturas acima de 550° C (BAPTISTA, 1999; KARDEC 2009).

O manual do 6R099 exige a imediata substituição dos bicos injetores se o motor começar a bater pino ou quando houver fumaça preta, problemas que são frutos da excessiva injeção de combustível. Daí a importância das análises de tendências, como auxílio aos outros tipos de manutenção, de modo a evitar que determinada falha em injetores comprometa demais subsistemas do motor em um efeito em cadeia, a médio prazo.

CONCLUSÃO

De fato, a quantidade de enxofre presente no Óleo Diesel Marítimo pode sim contribuir para a corrosão dos bicos injetores, sobretudo em um de motor rodoviário adaptado para mar, cujo sistema de combustível e de injeção não foram marinizados. Com efeito, mostrou-se que o ODM possui teor de enxofre muito superior ao óleo diesel rodoviário S10 e existem inúmeros artigos e publicações científicas que atestam o poder danoso que os produtos ácidos do enxofre têm sobre os equipamentos do motor. Apesar do ODM possuir teor de enxofre em concentração elevada se comparado ao S10, pode-se inferir que o ODM, por possuir teor de enxofre igual ou menor a 0,5%, é uma alternativa razoável ao OCM, pois já está dentro do novo limite estabelecido pela IMO para combustíveis marítimos, embora 0,5% de teor em massa ainda seja uma concentração que, em larga escala, gera prejuízos ao meio ambiente. A MB será impactada indiretamente pela IMO2020 e ANP 789, na medida em que a Petrobras, fornecedora do OCMT, propõe-se a cumprir a nova legislação, como informado pela EPE, citada nesse trabalho. O OCMT, utilizado pela Marinha em navios equipados com propulsão CODOG, segundo norma da DEN, possui teor de enxofre de até 1%, superior ao novo limite estabelecido. Outro impacto que a MB deva sentir diz respeito ao preço do ODM, o qual deve subir no mercado, pelo seguinte motivo: uma vez já enquadrado nessas novas regulamentações, é provável um aumento na sua demanda, em decorrência do tempo para que a oferta de Bunker produzido dentro dos novos padrões seja suficiente para suprir a demanda mundial. As publicações acadêmicas indicaram que o biodiesel não é o combustível mais apropriado para substituição do ODM e Bunker, pois embora seja menos poluente, possui a tendência de causar falhas aos sistemas injeção e, por efeito cascata, aos motores como um todo. Por fim, para análise de tendências nos injetores, o chefe de máquinas possui alternativas preditivas simples que podem ser implementadas na rotina de bordo, como a inspeção visual, análise laboratorial do combustível, monitoramento da temperatura dos gases da descarga e filtragem.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. **Óleo Diesel**. 2019. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petroleo-derivados/155-combustiveis/1857-oleo-diesel> , acessado em 2020.

ATKINS, Peter et al. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5ª edição. Bookman, Porto Alegre, RS. 2012.

BAPTISTA, Luiz Augusto Rocha. **Manutenção Preditiva de Motores Diesel através de parâmetros operacionais**. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 1999.

BORGNAKKE, Claus et al. **Fundamentos de Termodinâmica**. Tradução da 7ª edição americana. Blucher, São Paulo, SP, 2012.

BOSCH. **Funcionamento do Sistema Common Rail de Injeção Eletrônica Diesel**. 2016. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC042/Sistemas%20de%20inje%20E7%E3o%20Diesel/Sistemas%20com%20gerenciamento%20eletronico/FUNCIONAMENTO%20DO%20SISTEMA%20COMMON%20RAIL%20DE%20INJE%20C7%C3O%20ELETR%20D4NICA%20DIESEL.pdf> , acessado em 2020. .

CAPANA, Giuliano Humberto. **Estudo do impacto do enxofre presente no diesel na emissão de poluentes e em tecnologia de pós Tratamento de gases de escape**. Dissertação, Universidade de São Paulo, SP. 2008.

CISNEROS, Juan Carlos Montoya. **Redução dos Impactos ambientais causados por emissões de gases no transporte marítimo**. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2012.

CHAGAS, Mariela Mendonça da. **Avaliação dos teores de enxofre em amostra de óleo diesel nas redes de distribuição de combustíveis na cidade de Natal/RN**. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN. 2014.

DIRETORIA DE ENGENHARIA NAVAL. **Combustíveis Marítimos para os Navios da MB**. Engenmarisnt N° 05-10D apêndice V

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **IMO 2020: A nova regulamentação de Combustíveis Marítimos**. Rio de Janeiro, RJ. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Precificação de óleo combustível marítimo para cabotagem**. Nota Técnica, Rio de Janeiro, RJ. 2019.

FILHO, Manoel Fernandes de Oliveira. **Efeito do biodiesel no bico injetor e na emissão de material particulado em motor do ciclo diesel**. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2016.

GANESAR, V. **Internal Combustion Engines**. McGraw-Hill, United States of America. 1995.

GIACOSA, Dante. **Motores Endotérmicos**. 3ª Edição. Barcelona. Hoepli - Ed. Científico Médica. 1970.

GUARIEIRO, Lilian et al. **Avaliação Experimental do Desempenho de Motores do Ciclo Diesel Utilizando Misturas Biodiesel/Diesel Marítimo**. Artigo, Revista Virtual de Química. 2016.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Sulphur oxides (SOx) and Particulate Matter, regulation 14, IMO2020**. Disponível em: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx), acessado em dez/2019.

KARDEC, A.; NASCIF J. **Manutenção: função estratégica**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009.

LAGO, Daniel Mousinho. **Fabricação local de um Protótipo de Bico Injetor**. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2018.

MATOS, Larisa Aparecida Corrêa. **Estudo da corrosão de ligas ferrosas em diesel e biodiesel**. Dissertação, Universidade Estadual do Centro Oeste. Guarapuava, PR. 2013.

MTU-Brasil. **Manual de Operação Série 6R099**. Versão 01/1992.

MTU-Brasil. **Manual de Operação Série 6R099**. Versão Revisada 07/2010.

PETROBRAS. **O Manual Técnico do Óleo Diesel**. Rio de Janeiro, RJ. 2013.

PEIXOTO, Camila Gisele Damasceno et al. **Caracterização Físico-Química de Óleo Diesel Rodoviário e Marítimo por Técnicas Convencionais e Destilação Simulada por Cromatografia Gasosa**. I Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Campina Grande, PB.2015.

SILVA, Luiz Carlos Rodrigues. **Física de um motor de trator diesel**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia, MG. 2012.

SILVA, Thiago Emanuel Pereira da et al. **Enxofre: um poluente em potencial na composição do óleo Diesel brasileiro**. Artigo, IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Salvador. 2013.