

**MARINHA DO BRASIL  
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA - CIAGA  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAIS DE MÁQUINAS - APMA**

**DIOGO LIRA DE PONTES**

**ESTUDO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR MOTORES MARÍTIMOS**

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**DIOGO LIRA DE PONTES**

**ESTUDO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR MOTORES MARÍTIMOS**

Monografia apresentada ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha como parte dos requisitos para obtenção de Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Orientador: 1ºT(RM2-T) **Raquel da Costa Apolaro.**

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**DIOGO LIRA DE PONTES**

**ESTUDO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR MOTORES MARÍTIMOS**

Monografia apresentada ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha como parte dos requisitos para obtenção de Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Orientador: 1ºT(RM2-T) **Raquel da Costa Apolaro**

**Mestre em Educação**

---

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho a pessoa mais importante da minha vida aqui na terra, pessoa esta que me ensinou o caminho correto desde criança, que guiou meus caminhos e que eu amo muito, minha mãe, Valéria Lira. Dedico também a minha noiva Rafaela Leite, que sempre esteve comigo nessa caminhada, e ao meu pai Antônio Carlos, que sempre acreditou em meu potencial.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar ao Deus, o grande criador, sem Ele eu não estaria aqui. Aos meus pais, a minha noiva, que são minha família e meus alicerces, aos amigos de curso e de profissão, pelo companheirismo e pelos bons momentos e aos mestres que contribuíram para o meu desenvolvimento e acadêmico e profissional durante esse curso.

*Penso noventa e nove vezes e nada descobro; deixo de pensar, mergulho em profundo silêncio e eis que a verdade se me revela.*

*Albert Einstein.*

## RESUMO

A crescente capacidade do modal hidroviário na acomodação e transporte de volumes de cargas cada vez maiores despertou a necessidade de estudos sobre as emissões de poluentes atmosféricos oriundos destas atividades, uma vez que essa tendência de crescimento acompanha o ritmo da poluição produzida por este tipo de fonte, prejudicando a qualidade do ar. Tais estudos visam, sobretudo, quantificar as emissões de fontes e servem como uma poderosa ferramenta de gestão ambiental. Este trabalho trata sobre alguns impactos na operação e projeto dos navios e seus motores, pela entrada em vigor da Marpol 73/78 Anexo VI, em 19 de maio de 2005. Apesar do controle de emissões ser um aspecto externo ao enfoque de operadores e armadores, o controle de emissão de gases provenientes de hidrocarbonetos pode ser utilizado como ferramenta de análise de condições e controle da qualidade operacional e do consumo de combustível dos motores.

**Palavras-chave:** Emissões atmosféricas. Poluição do ar. Motores marítimos.

## **ABSTRACT**

The growing capacity of the global on-water transport in accommodating increasing volumes of cargo aroused the need for studies on air pollutant emissions resulting from these activities, since this trend keeps pace with the pollution produced by this type of source, damaging air quality. These studies are meant primarily to quantify the emissions of the sources and serve as a powerful tool for environmental management. This paper deals with some impacts on the operation and design of ships, the entry into force of MARPOL 73/78 Annex VI, on May 19, 2005. Despite the emissions control being an external appearance regarding the focus of shipowners and operators, control Emission of hydrocarbons based gases can be used as a tool for analyzing the conditions and quality control of operating and fuel consumption of the engines.

**Keywords:** Atmospheric pollution. Air emissions. Marine engines.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Gases resultantes da queima de bunker	14
Figura 2 -	SECA – Mar Báltico e Mar do Norte	16
Figura 3 -	Emissões de poluentes por uma embarcação mercante	17
Figura 4 -	Temperatura de Frente de Chama	19
Figura 5 -	Distribuição de NO correspondente à distribuição de temperatura da figura 4	19
Figura 6 -	Diagrama de motor de dois tempos com desenho convencional	20
Figura 7 -	Coroa de um pistão com depósitos carbonato de cálcio	21
Figura 8 -	Distribuição de gotículas dos envelopes de combustível em câmara de combustão de um motor de dois tempos de última geração	22
Figura 9 -	Atomizador avariado	23
Figura 10 -	Rotor de turboalimentador sem as palhetas da turbina e com a roda compressora destruída	23
Figura 11 -	Estrutura de alumínio da roda compressora do turboalimentador acidentado	24
Figura 12 -	“Disparos” sistemáticos de um turboalimentador devido à concentração de hidrocarbonetos no duto de descarga	25
Figura 13 -	Análise de roda compressora após o funcionamento como indicado na figura 12	25
Figura 14 -	SkaySalis GmbH	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ABS	American Bureau of Shipping
BHP	Brake Horse Power
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COS	Sulfeto de carbonilo
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Dimetil sulfeto
CS <sub>2</sub>	Disulfeto de carbono
DNV	Det Norske Veritas
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio
HC	Hidrocarbonetos
IMO	International Maritime Organization
LNG	Liquefied Natural Gas (Gás Liquefeito de Petróleo)
MARPOL	Marine Pollution
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
N <sub>2</sub> O	Oxido nitroso
NH <sub>3</sub>	Amônia (gás)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Amônio (Íon)
NO	Óxido nítrico
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Dióxido de nitrogênio
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrogênio

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrato
NO <sub>x</sub>	Óxido de mono - nitrogênio
O <sub>2</sub>	Oxigênio
PM	Material Particulado
PMS	Ponto Morto Superior
S	Enxofre
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Sulfato
SO <sub>x</sub>	Óxido de mono-enxofre
SECA	Sulphur Emission Control Areas
TBN	Total Base Number
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>ESTUDO DOS TIPOS DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR FONTES MARÍTIMAS</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>A poluição atmosférica e o anexo VI da MARPOL</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>ENGENHARIA DOS MOTORES DIESEL</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Desdobramentos operacionais</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>NOVAS TECNOLOGIAS E MEDIDAS MITIGADORAS</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>31</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação da comunidade internacional com a proteção do meio ambiente tem trazido à tona a poluição do ar causada pelas embarcações, e atualmente, o desembolso com o transporte marítimo no Brasil atinge a casa dos 6 bilhões de dólares por ano em afretamento, diante destes fatos, torna-se importante a abordagem deste tema para a retomada da construção e operação de novas embarcações, com o crescimento do comércio internacional por navios, novas embarcações devem surgir, e estes devem possuir desenhos compatíveis com as novas atualizações e exigências das legislações ambientais, que pode demandar alterações significativas nas plantas e sistemas marítimos, em particular os motores de propulsão, geração, e as plantas de combustível.

A determinação pela Marpol, do uso de combustíveis de baixo teor de enxofre, através do anexo VI, criou um paradigma tecnológico na medida em que combustíveis com esta característica, associada a um teor mais elevado de nitrogênio parece possuir baixo desempenho de ignição e combustão. Este fator levou os armadores e engenheiros a perseguirem novas soluções para fabricação de motores mais econômicos, mas eficientes e menos poluentes, bem como novos e melhores combustíveis. Para isso faz-se necessário vários estudos das deficiências dos sistemas atuais e possíveis melhoramentos a serem realizados e testados.

## 2 ESTUDOS DOS TIPOS DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR FONTES MARÍTIMAS

Poluição é definida como a condição na qual substâncias estão presentes no ambiente, em concentrações altas o suficiente, para produzir efeitos nocivos, mensuráveis no homem, animais, vegetação ou materiais. Por substâncias define-se qualquer componente químico de origem natural ou feita pelo homem, que participe da química atmosférica. Anteriormente, a poluição do ar era tida como um problema restrito às grandes cidades e regiões mais industrializadas, contudo as últimas medições atmosféricas confirmaram o caráter global da poluição do ar, independente da posição geográfica da fonte. Hoje a poluição é medida conforme a vida média das substâncias em suspensão.

O mecanismo de poluição atmosférica é constituído de três componentes básicos:

- a) Fontes de emissões (poluente);
- b) Atmosfera (mistura e transformação química);
- c) Receptores.

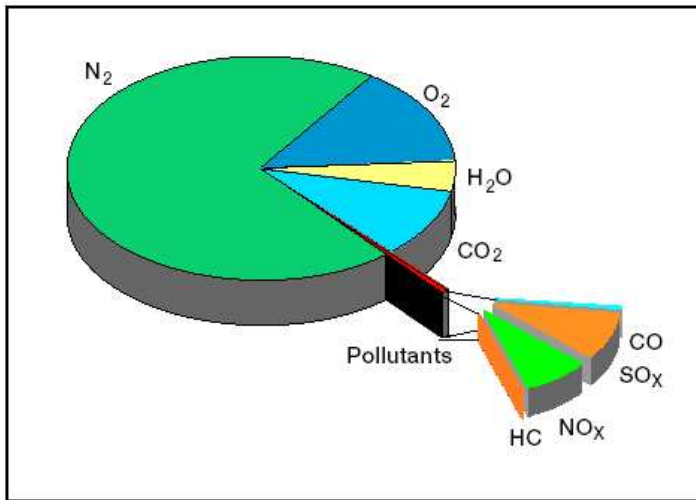
As emissões atmosféricas de fontes marítimas podem ser descritas como:

- a)  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ . (proveniente da combustão de motores, caldeiras, incineradores);
- b) VOC – Compostos orgânicos voláteis (hidrocarbonetos liberados pelos suspiros de tanques de combustível sob aquecimento, da carga, gás inerte, etc.);
- c) Poluentes (partículas dos gases de efeito estufa, de ozônio de solo e *smog* fotoquímico<sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup> smog fotoquímico – Reação de hidrocarbonetos com gases presentes na atmosfera.

Figura 1- Gases resultantes da queima de bunker<sup>2</sup>



Fonte: [www.syndarma.org.br](http://www.syndarma.org.br)

Os elementos  $H_2O$ ,  $N_2$  e  $O_2$  não possuem efeitos nocivos à saúde. Mas sua indicação precisa é necessária para comparar as medições de emissões de fontes diferentes. A maioria dos compostos na atmosfera que contêm enxofre são sulfetos de carbonilo ( $COS$ ), disulfeto de carbono ( $CS_2$ ), dimetil sulfeto ( $(CH_3)_2S$ ), sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e sulfato ( $SO_4^-$ ). As fontes de compostos de enxofre na atmosfera são atividades biológicas, combustão de combustíveis fósseis, matéria orgânica, erupções vulcânicas e spray marinho. Os compostos importantes de nitrogênio na atmosfera são  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NH_3$ , e os sais  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$  e  $NH_4^+$ . O primeiro desses, o óxido nitroso ( $N_2O$ ) é um gás incolor que é emitido em sua totalidade por fontes naturais, principalmente pela ação das bactérias no solo e por reações na atmosfera superior e quimicamente é inerte a temperaturas comuns. Os resultados da ação desses compostos, de enxofre e nitrogênio, são a chuva ácida e nevoeiros fotoquímicos, que provocam efeitos nocivos em nós e no meio ambiente, e a residência destes compostos é a estratosfera, provocando alterações na taxa de formação de ozônio.

Motores de combustão interna são as grandes fontes da emissão de  $NO_x$  atualmente, em especial motores marítimos, com rendimento térmico próximo a

<sup>2</sup> Bunker - Tipo de óleo combustível utilizado em navios. Também conhecido como óleo pesado.

50%. Há duas fontes de geração de NOx nos motores: o desenho da combustão (NOx térmico) e o nitrogênio contido no combustível (NOx orgânico). A princípio apenas o NOx térmico é controlado pela MARPOL.

A combustão de combustíveis fósseis gera uma determinada quantidade de CO<sub>2</sub>, mas motores diesel marítimos de dois tempos emitem menos monóxido e dióxido de carbono do que outros tipos de motores de combustão interna. Normalmente, CO é um produto intermediário da combustão. A razão é a transformação mais eficiente do calor em potência (rendimento térmico) significando que muita potência pode ser gerada a partir de menor quantidade de combustível.

Apesar de não ser tóxico, pode tornar-se um problema quando emitido em grandes quantidades, devido às suas propriedades radiativas, isto é, CO e CO<sub>2</sub>, são transparentes à luz solar, mas relativamente opacos à radiação emitida pela superfície da terra, armazenando o calor provocando o efeito estufa. A formação de partículas é relacionada pela forma com que o combustível e o ar se misturam antes da combustão. Diversamente dos motores de ciclo OTTO, onde há tempo suficiente para a dinâmica da mistura, nos motores ciclo DIESEL não há tempo suficiente para este processo. A combustão deve começar logo após o combustível ter sido injetado. Desse modo, nem toda molécula de combustível encontra suficiente ar para oxidar, mas o calor a desidrogena, formando fuligem, ou seja, carbono basicamente. No curso de expansão, material orgânico (veículo de lubrificante em especial) se junta à fuligem, formando particulados. Outra fonte de particulados são partículas do pacote de aditivos do lubrificante, contaminantes sólidos do combustível e partículas de desgaste. Portanto, fuligem é um constituinte de particulados.

## **2.1 A poluição atmosférica e o anexo VI da Marpol**

O Anexo VI da Marpol trata o assunto em duas frentes: limitar o teor de enxofre e controlar a emissão de NOx. Essa regulamentação vem acompanhada de algumas exigências quanto aos fornecedores de bunker, que devem ser cadastrados na autoridade correspondente local. A amostragem do bunker deve ser por gotejamento, com dispositivo apropriado e, no ponto de transferência de custódia,



isto é no manifold de bordo. O certificado de fornecimento de bunker deverá registrar o teor de enxofre do combustível fornecido e, deverá ser arquivado a bordo e com o fornecedor por um período três anos. As amostras testemunha deverão ficar por um ano sob a guarda do navio (mas não necessariamente a bordo) e, do fornecedor.

Com a criação das áreas de controle de emissões atmosféricas, conhecidas como Sulphur Emission Control Areas (SECA). Todos os navios deverão seguir as recomendações, respeitando as quantidades máximas de elementos poluentes nas SECAS, conforme a seguinte tabela:

Tabela 1 – Limites de emissões de poluentes nas SECAS

<b>Prevenção da Poluição do ar por Navios ( Áreas de controle de emissões)</b>			
<b>Área Especial</b>	<b>Adotado em</b>	<b>Em vigor</b>	<b>Efetivo efeito em</b>
Mar Báltico (SOx)	26, Set de 1997	19, Maio de 2005	19, Maio de 2006
Mar do Norte (SOx)	22, Jul de 2005	22, Nov de 2006	22, Nov de 2007
América do Norte (SOx, NOx e PM)	26, Mar de 2010	01 Ago, de 2011	01 , Ago de 2012
Estados Unidos e mar do Caribe (SOx, NOx e PM)	26, Jul de 2011	01, Jan de 2013	01, Jan de 2014

Fonte: [www.imo.org](http://www.imo.org)

Figura 2 – SECA – Mar Báltico e Mar do Norte



Fonte: [www.imo.org](http://www.imo.org)

A emissão de gases do efeito estufa é matéria do Protocolo de Kyoto e brevemente será também incluída numa parte B do Anexo VI da MARPOL ora em desenvolvimento. O assunto é tratado retroativamente pela MARPOL, isto é, todos os navios que foram construídos desde janeiro de 2000, devem possuir motores que operem obedecendo à curva de emissão de óxidos de nitrogênio versus sua rpm, independentemente que quando a legislação entrasse em vigor. Esses motores vêm acompanhados de um arquivo técnico, onde são registradas as características das partes do motor que influenciam as emissões de óxidos de Nitrogênio. Os motores só poderão operar com peças devidamente classificadas, timbradas pelas classificadoras (ABS, DNV, etc.), que são registradas nos respectivos Arquivos Técnicos, ou seja, esses motores devem possuir partes e sobressalentes, somente fornecidos pelo projetista ou pelo fabricante original do motor.

A monitoração contínua da emissão de NOx presente no Anexo, ainda se encontra em estudo na IMO, inicialmente proposta por alguns países, ainda não foi consolidada devido à dificuldade de determinar a potencia efetiva, e o consumo de bunker a bordo.

Figura 3 – Emissões de poluentes por uma embarcação mercante



Fonte: [www.marineinsight.com](http://www.marineinsight.com)

### 3 ENGENHARIA DOS MOTORES DIESEL

Nos motores diesel, por comprimir somente ar, a taxa de compressão e assim a temperatura de final de compressão são elevados ao máximo que a tecnologia mecânica permitir. Com o ar aquecido e com alta velocidade no interior do cilindro, o combustível é injetado. Dependendo do desenho do envelope de jato atomizado (tamanho e velocidade das gotículas), da pressão parcial do oxigênio nesse ambiente, e da composição do combustível, ocorrerão processos físicos químicos encadeados como evaporação e fluxo de duas fases, até que a ignição, nas laterais do envelope ocorra, iniciando a combustão por difusão à medida que o restante do combustível continua sendo injetado.

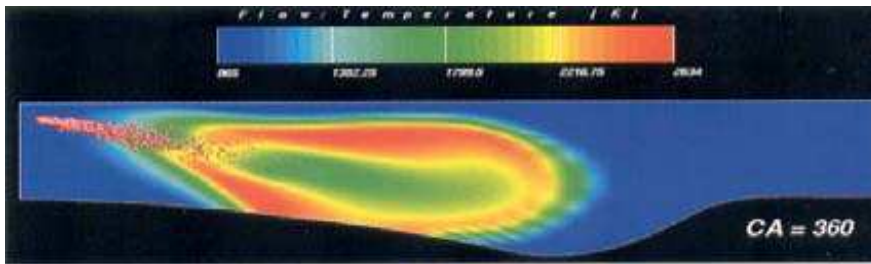
Atraso de ignição significa que uma maior quantidade de combustível estará presente na câmara no momento que a mesma ocorrer.

Dois intervalos de tempo devem ser considerados:

1. Início de injeção – definido como o intervalo entre momento que a bomba injetora pressuriza o combustível na rede de alta pressão, e o momento no qual se observa a elevação de pressão no cilindro. Não se deve confundir o início efetivo de injeção, aqui definido, com o início geométrico de injeção (regulado no motor).
2. Início de combustão – definido como o intervalo entre a elevação de pressão no cilindro e o início da liberação de energia térmica e mecânica.

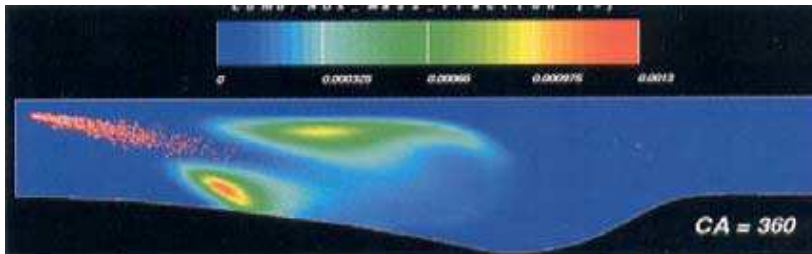
Como o nitrogênio contido no ar oxida em temperaturas elevadas, são os motores diesel de dois tempos, as maiores fontes de emissão de óxido nítrico (NO), nas emissões marítimas. A maior parcela da geração de NO, é devida a dois aspectos do projeto de motores: excesso de ar ou razão de equivalência (relação entre a razão ar combustível estequiométrica e a razão real) e o avanço de injeção (o combustível é injetado antes do PMS: o embolo continua a subir após a ignição, aumentando ainda mais a pressão e, por conseguinte, a temperatura de frente de chama – figuras 4 e 5).

Figura 4 – Temperatura de frente de chama



Fonte: Cortesia Wartsila

Figura 5 – Distribuição de NO correspondente à distribuição de temperatura da figura 4



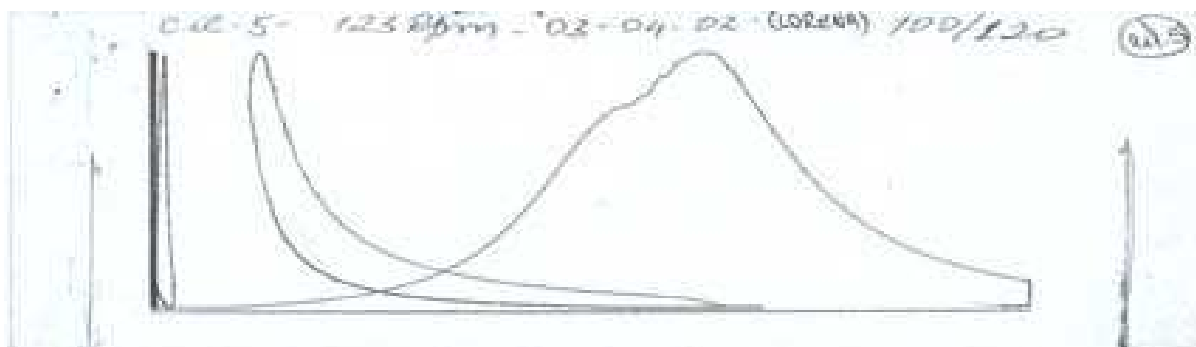
Fonte: Cortesia Wartsila

Resultados a partir de experimentos, onde o ajuste da injeção e a carga (definida pela razão de equivalência) foram variados mostram, que quase todo o NO forma-se dentro dos 20 graus de angulo de manivela que se seguem ao início da combustão. Como a injeção é retardada, então o processo de combustão também é retardado, assim a formação de NO ocorre mais tarde, e concentrações menores uma vez que as temperaturas máximas são mais baixas.

Óleos combustíveis contêm nitrogênio em sua composição, contribuindo em cerca de 35% do total de NOx emitido. O nitrogênio contido no combustível se converte a uma taxa de modo que 1% de nitrogênio orgânico, eleva em 50 ppm a emissão de NOx. À medida que a engenharia dos motores, diminui a geração de NOx térmico, aumenta a participação do NOx orgânico no balanço final de emissão de óxidos à base de nitrogênio.

A figura 6 mostra um diagrama Pressão x Volume de um motor principal convencional.

Figura 6 – Diagrama de motor de dois tempos com desenho convencional



Fonte: Emissões atmosféricas de motores marítimos – Arthur A.L. Barreto

### 3.1 Desdobramentos operacionais

A operação de bunker com teores mais baixos de enxofre exigirá a alteração do óleo de cilindro de 70 mgKOH/g para 50 mgKOH/g, o que reduz significativamente o desembolso com esse lubrificante. Na frota do Brasil, normalmente operamos com TBN 50 desde 1994, sem que fosse observado qualquer incremento na taxa de desgaste das camisas.

Em relação aos motores de combustão auxiliares, a redução do TBN do óleo lubrificante, acarretará deficiência na detergência do cárter, pois a manutenção de teores mais elevados na alcalinidade de lubrificantes nos motores de combustão auxiliar, de maneira a prover essa detergência, traz desgaste adesivo (scuffing<sup>3</sup>) das camisas. Novos pacotes de aditivos estão sendo elaborados, onde a propriedade detergente não estará sujeita ao pacote alcalino do lubrificante. Os operadores devem ficar atentos a esse aspecto na seleção desse insumo.

Testes realizados (13255 horas) em motores de quatro tempos com cerca de 900 KW, mesmo operando com 20 mgKOH/g apresentaram deposição de aditivos alcalinos sob as coroas dos pistões, com espessura variando entre 500 e 716  $\mu\text{m}$ , e ocorreu também, o polimento nas camisas devido ao depósito de aditivos alcalinos e as marcas de brunimento<sup>4</sup> desapareceram nas porções superiores das camisas. Os

<sup>3</sup> Scuffing – Tipo de desgaste abrasivo que pode ocorrer em cilindros de motores de combustão interna.

<sup>4</sup> brunimento- Ranhuras na parte interna dos cilindros de motores de combustão interna que favorece a lubrificação

motores operaram esse período com bunker < 1,0% S. Na foto abaixo, pistão de um dos cilindros. A cinza branca é carbonato de cálcio, depositado após a evaporação do veículo lubrificante.

Figura 7 – Coroa de um pistão com depósitos de carbonato de cálcio



Fonte: Cortesia Wartsila

Em relação aos motores principais, o novo desenho de combustão adotado pelos projetistas, exigirá dos operadores, maior controle na qualidade do bunker na entrada do motor, uma vez que a passagem de catalíticos finos pelos furos dos atomizadores provocará a erosão dos mesmos, não detectável por inspeção visual.

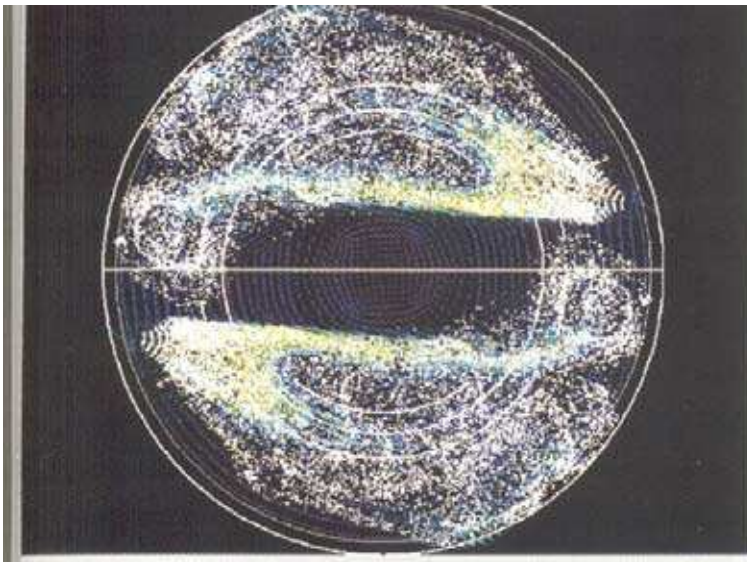
A utilização de atomizadores com furos desgastados provoca a geração de gotículas de maior diâmetro, aumentando a penetração do spray nas câmaras de combustão e o aumento do tempo de evaporação dessa gotícula (o tempo de evaporação é proporcional ao quadrado do diâmetro da mesma). O aumento na penetração e no tempo de evaporação, além de atrasar a ignição, conduz a combustão para mais perto da superfície das camisas de cilindro, queimando o filme de óleo lubrificante aderido à mesma.



Injeção mais atrasada (devido tanto ao novo desenho da combustão associada a furos de atomizadores desgastados) significa que uma porção adicional (maior do que o projeto) das camisas ficará exposta à frente de chama, pois a mesma estará ocorrendo enquanto o pistão estiver em curso descendente.

A otimização na distribuição do spray nas câmaras levou ao aumento do número de injetores por cilindro. Operacionalmente isso significa, que se um dos injetores estiver operando de modo inadequado, a temperatura de gás de descarga se elevará muito pouco, para permitir a percepção do operador. Na figura 8 abaixo, pode-se observar como o spray pode chegar a tocar o outro atomizador do cilindro, em caso de jato sólido.

Figura 8 – Distribuição de gotículas dos envelopes de combustível em câmara de combustão de um motor de dois tempos de última geração



Fonte: Cortesia Wartsila

Figura 9 ilustra um atomizador que sofreu contato com o spray do outro injetor (porção posterior aos furos) e, com seu próprio spray (porção à frente dos furos). Os dois atomizadores desse cilindro possuíam seus furos com erosão.

Figura 9 – Atomizador avariado



Fonte: Emissões atmosféricas de motores marítimos – Arthur A.L. Barreto

Outro desdobramento do funcionamento não conforme dos novos projetos de motores diesel, é a ocorrência de fenômenos de pós-combustão.

A análise de duas avarias em turbo alimentadores instalados em motores de 13 000 BHP indicou como causa a sobre velocidade dos turbos devido a pós-combustão. (palhetas da roda de gás ausentes das suas respectivas rodas.

Figura 10 – Rotor de turboalimentador sem as palhetas da turbina e com a roda compressora destruída



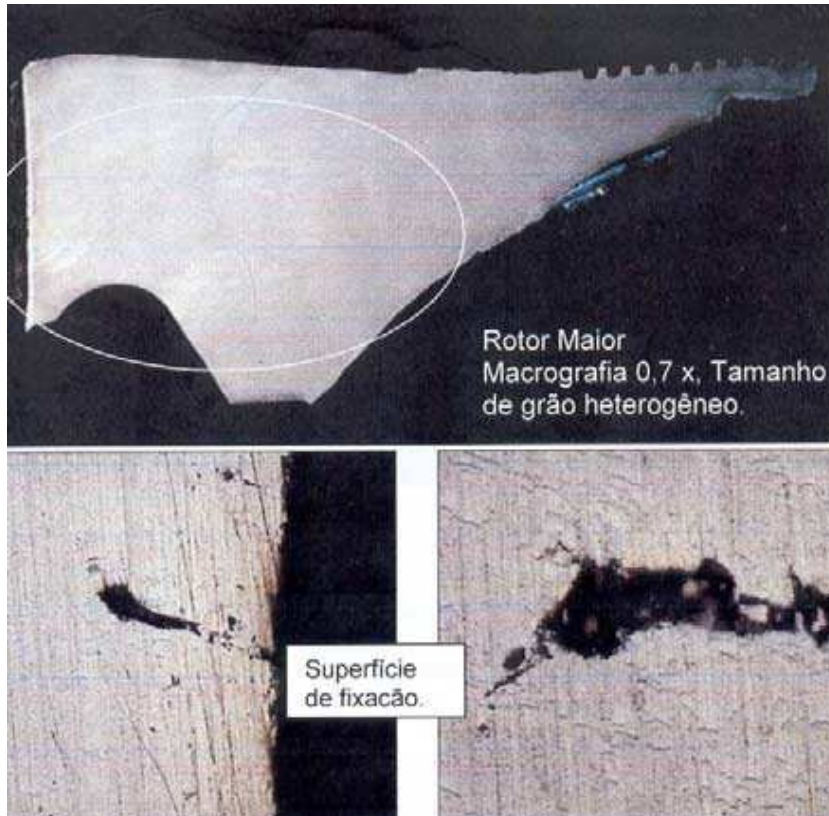
Fonte: Emissões atmosféricas de motores marítimos – Arthur A.L. Barreto

Como a sobrevelocidade em turboalimentadores ocorre somente a partir da soltura da roda compressora ou sobrecarga do motor correspondente, e nenhuma



dessas condições ocorreu, um exame metalográfico dos compressores centrífugos foi empreendido, que confirmou a avaria por sobrevelocidade transiente, de modo repetitivo como os testes realizados pelo fabricante do turbo comprovaram.

Figura 11 – Estrutura de alumínio da roda compressora do turboalimentador acidentado

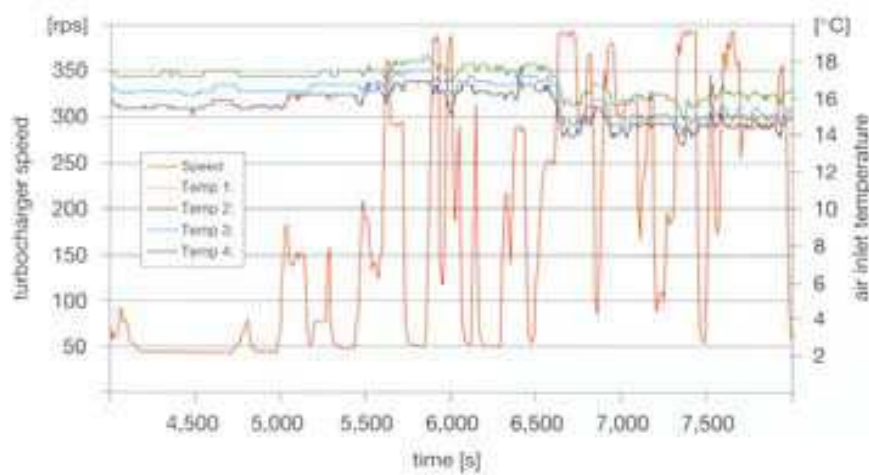


Fonte: Emissões atmosféricas de motores marítimos – Arthur A.L. Barreto

Apesar das bombas injetoras (tipo bosh), possuírem na época apenas 22000 horas, os diagramas PV<sup>5</sup> coletados nos motores, indicavam um pequeno atraso de injeção. Tal fato ocorreu devido a problemas na purificação do combustível (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), desgastando o topo dos junços das bombas injetoras. Desgaste nessa região provoca o distanciamento entre o início geométrico de injeção e o seu início efetivo.

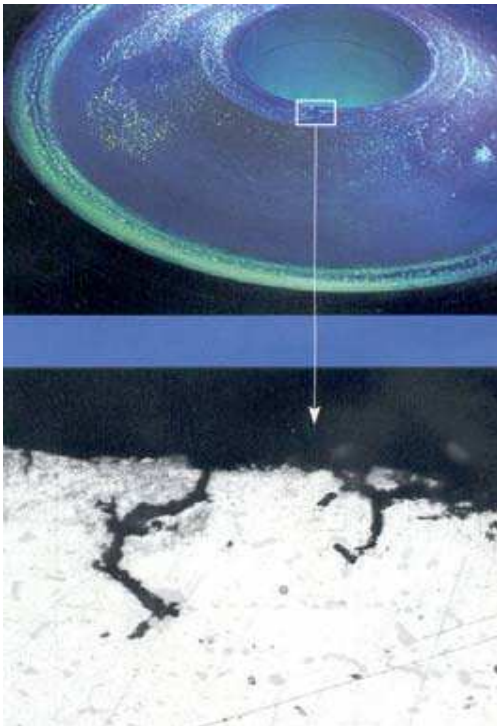
<sup>5</sup> PV – Pressão x Volume

Figura 12 – “Disparos” sistemáticos de um turboalimentador devido à concentração de hidrocarbonetos no duto de descarga (Cortesia ABB)



Fonte: Cortesia Wartsila

Figura 13 – Análise de roda compressora após o funcionamento como indicado na Figura 12



Fonte: Cortesia Wartsila

Após a constatação do funcionamento com disparos sistemáticos do turboalimentadores, optamos por aumentar o avanço geométrico da injeção desses

motores em dois graus. Com isso os motores passaram a operar fora da faixa de risco em caso de alguma deficiência do sistema de injeção. Esses motores se encontram atualmente com 55000 horas sem a repetição do fenômeno. A

Deficiência no sistema de injeção é o que mais acarreta distúrbios na operação de motores marítimos, avariando camisas, coroas de embolo, cabeçotes e turbo alimentadores. Estas deficiências em motores de combustão interna operam no sentido de atrasar a injeção (diminuir o avanço de injeção) e, por conseguinte a ignição e reação do motor a isso é aumentar a dosagem de combustível, enriquecendo a mistura. Como o atraso de ignição em um motor aumenta sua emissão de HC, o monitoramento dos seus gases permitiria, de forma rápida, a identificação do problema, em tempo real. Estes problemas de injeção podem diminuir o rendimento térmico da máquina, reduzindo a capacidade de transformação da energia química do combustível em potência indicada no interior do cilindro.

Como a redução do rendimento térmico é respondida pelo motor aumentando o combustível, o sistema de injeção que é a causa na maioria dos casos, da redução do rendimento térmico, é também a única forma do motor manter sua potência a uma determinada rotação. Se a causa da queda do rendimento térmico for injetores defeituosos, por exemplo, mais combustível através desses injetores defeituosos será injetado, resultando em danos a máquina.

Se a causa da redução do rendimento térmico, for causada por deficiência na alimentação de ar (intercooler<sup>6</sup> com diferencial maior que 190 mmWc, por exemplo), a máquina irá reagir da mesma forma, isto é, aumentando o consumo específico de combustível. Esse quadro é mais acentuado na operação de motores de dois tempos à baixa carga, consumindo óleo pesado, devido à baixa eficiência do movimento do ar dentro do cilindro (swirl<sup>7</sup>), além da operação fora do ponto ótimo de seleção do turbo.

#### **4 NOVAS TECNOLOGIAS E MEDIDAS MITIGADORAS**

---

<sup>6</sup> Intercooler – troca de calor interna

<sup>7</sup> swirl – movimento de turbilhonamento do ar no interior da câmara de combustão

O uso de novas tecnologias para limpeza dos gases de descarga, por exemplo, a lavagem dos gases com água do mar (scrubber<sup>8</sup>), é capaz de reduzir o SOx em até 99%, o NOx em 5% e os materiais particulados em 80%. Obviamente, no caso do uso de lavagem de gases com água do mar, haverá necessidade de prescrever critérios para descarga dessa água a fim de não provocar poluição do mar.

O desenvolvimento dos motores de propulsão marítima permitirá que os novos motores emitam menores quantidades de NOx já que isso depende primordialmente da engenharia dos motores e, em certa medida, do teor de nitrogênio (N) no óleo combustível (o Código NOx que acompanha o Anexo VI, estabelece as datas em que o percentual de NOx admitido será cada vez menor).

Segundo dados fornecidos pelo Dr. Pierre C. Sames, do Lloyd Germânico, o percentual de gases de efeito estufa da responsabilidade do transporte marítimo é pequeno quando comparado com outros setores industriais: cerca de 4% (dado de 2004). Isso corresponderia a cerca de 1 ton de CO<sub>2</sub> equivalente emitida por navio em 2004. Na medida em que o transporte marítimo cresce, esses números irão aumentar, a maior velocidade dos navios aumenta também a emissão de gases, pois representa um aumento do consumo de bunker.

Se considerarmos que cada navio dispõe de 200 dias operacionais por ano e admitirmos 1 consumo médio de 180g/kwh, a frota mundial consumiria cerca de 0,39 bilhões tons em 2007 (sem incluir os motores auxiliares). Como a queima de 1 ton de combustível produz aproximadamente 3 tons de CO<sub>2</sub>, concluímos que todos os navios emitiram 1,16 bilhões tons de CO<sub>2</sub>, ainda em 2007. Alguns analistas acreditam que, devido ao crescimento do transporte marítimo, em 2020 a quantidade de CO<sub>2</sub> da responsabilidade do transporte marítimo deverá crescer para mais de 2 bilhões de tons.

É nos portos que a poluição e a emissão de gases de efeito estufa pelos navios têm consequências mais graves, pois é nos portos que os navios param para suas operações de carga e descarga. O uso obrigatório pelos navios de energia proveniente de terra vai se tornando mais frequente, de forma que os motores principais e auxiliares fiquem desligados enquanto o navio permanece operando no

---

<sup>8</sup> Scrubber – Sistema de limpeza de gases de descarga ade motores para retirada de fuligem.

porto. É necessário, porém, algum tempo para que os navios possam utilizar este método alternativo de energia já que nem os portos nem os navios existentes estão preparados para isso. Algumas alternativas estão sendo testadas, como o uso de sistemas de redução catalítica seletiva, combinados com a utilização, durante a estadia do navio no porto, de combustíveis de baixo conteúdo de enxofre. Os problemas ainda existentes para o emprego de qualquer desses métodos são grandes e o caminho que será seguido no futuro é o uso de combustíveis novos, como os biocombustíveis, ou o propano, o gás natural ou, no mínimo, óleo diesel mais “limpo”.

As possibilidades do biodiesel para a propulsão marítima devem ser investigadas principalmente no caso do Brasil, considerando nossa dificuldade de produzir diesel e combustíveis com baixo teor de enxofre. Já existe um cargueiro, lançado na Alemanha, pela empresa SkySails GmbH, que usa uma pipa gigante computadorizada para aproveitar o vento e assim reduzir o consumo de combustível e, portanto, as emissões.

Figura 14 – SkaySails GmbH



Fonte: [www.skysails.info](http://www.skysails.info)

Os motores a gás (LNG) são termicamente eficientes e são capazes de reduzir as emissões de NOx em cerca de 92% e de CO<sub>2</sub> em aproximadamente 23%, além de reduzir as emissões de SOx e de materiais particulados da queima a valores desprezíveis. Sem dúvida, aqui as possibilidades são enormes e já há produção de motores marítimos movidos a LNG. Não se pode ignorar que algumas das soluções propostas irão acarretar aumento do custo do combustível. Os

combustíveis atualmente em uso custam cerca de US\$ 460 a US\$ 490 por tonelada, enquanto o custo de um diesel para uso marinho com teor mais baixo de enxofre é de US\$ 790 a US\$ 860 por tonelada. O frete marítimo será, evidentemente, ajustado para cobrir os novos custos. Uma forte medida mitigadora é a criação das já mencionadas SECAS, onde o teor máximo de enxofre no combustível é de 1,5% - nas outras áreas este limite é 4,5% - é uma forma de controlar o problema da poluição em áreas mais sensíveis. Outra medida com propósito de diminuir a poluição do ar causada por embarcações pela MARPOL, rege que o uso de incineradores só é permitido em viagem sendo que a incineração de alguns produtos, como o ascarel, os resíduos com traços de metal pesado e os resíduos de cargas relacionados com os Anexos I, II e III da MARPOL, é proibida.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A entrada do Anexo VI da Marpol e demais leis ambientais em vigor exigirá a mudança do desenho tradicional das plantas de combustível dos navios, bem como dos tipos de combustíveis, adequações comportamentais dos marítimos e adequações operacionais das empresas de navegação, com isso mais documentos de controle surgirão e isso irá aumentar a já burocratizada rotina dos navios, e os armadores e operadores devem estar atentos as novas exigências, tanto no que tange as legislações em operações, como na construção de novas embarcações com modelos de motores mais modernos e eficientes o que vai demandar maior elaboração nos novos projetos de construção, novos combustíveis e lubrificantes, também será necessária uma atenção muito maior ao monitoramento dos gases de descarga emitidos pela embarcação. Tudo isso, todo esse esforço, certamente será benéfico não somente ao meio ambiente, acima de tudo, será mais benéfico para nós mesmos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRETO, Arthur A.L. **Emissões atmosféricas de motores marítimos.**

CHEW Fabian. **Investigations into abrasive and corrosive wear mechanisms of pistons and liners in large bore 2 stroke diesel engine cylinders.** Flame Marine Ltd: UK – CIMAC 2004 Kyoto.

HENDRICKS E. **Mean value modelling of large turbocharged two stroke diesel engine – SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1989.**

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals.** MCGRAW-HILL, 1988.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **MARPOL 73/78 – Anexo VI** Poluição atmosférica. Disponível em: <<http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/3173/2486>>. Acesso em: 6 jun. 2014.

POLUIÇÃO do Ar por Navios. Disponível em: <[http://www.syndarma.org.br/upload/A%20POLUI\\_\\_O%20DO%20AR%20POR%20N AVIOS.pdf](http://www.syndarma.org.br/upload/A%20POLUI__O%20DO%20AR%20POR%20N AVIOS.pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2014.

SANGURI, Mohit Black Smoke From Funnel, What to Do? [s.d].

SEINFELD, John Wiley.Sons. **Atmospheric chemistry and physics of air pollution.**

TAKASAKI, K. **Nox Emission from bunker fuel combustion.** Kyushu University: Japan – CIMAC 2004 - Kyoto.