

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

CAIQUE NUNES LIMA

**EFEITO DOS COMBUSTÍVEIS COM BAIXO TEOR DE ENXOFRE NOS
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DE APLICAÇÃO MARÍTIMA**

RIO DE JANEIRO-RJ

2022

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

CAIQUE NUNES LIMA

**EFEITO DOS COMBUSTÍVEIS COM BAIXO TEOR DE ENXOFRE
NOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DE APLICAÇÃO
MARÍTIMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, sob orientação do Prof. Me. Sylvio Jose Gomes Magrani.

RIO DE JANEIRO-RJ

2022

CAIQUE NUNES LIMA

**EFEITO DOS COMBUSTÍVEIS COM BAIXO TEOR DE ENXOFRE NOS
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DE APLICAÇÃO MARÍTIMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, sob orientação do Prof. Me. Sylvio Jose Gomes Magrani.

Prof. Me. Sylvio Jose Gomes Magrani – Orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

L732 Lima, Caique Nunes

Efeito dos combustíveis com baixo teor de enxofre nos motores de combustão interna de aplicação marítima / Caique Nunes Lima. — 2022.

87f. : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2022.

Bibliografia : f. 85-87

Orientador: Sylvio Jose Gomes Magrani

1. Engenharia mecânica. 2. Enxofre. 3. Combustíveis. 4. Motores de combustão interna. 5. Lubrificação e lubrificantes. I. Magrani, Sylvio Jose Gomes (Orient.). II. Título.

CDD 621

Aos meus pais e minha esposa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade de fazer minha primeira graduação, agradeço à minha esposa por estar sempre comigo em todos os momentos difíceis e sempre ter acreditado em mim e apoiado o meu sonho e ao meu orientador Me. Sylvio Jose Gomes Magrani por ter me dado todo amparo para realizar meu trabalho.

Também gostaria de fazer um agradecimento especial ao meu pai, Carlos Alberto Lima, que sempre me apoiou e deu todo o amparo financeiro e psicológico, me auxiliando a sempre ter o foco na minha formação e nunca me deixando desviar para nenhum outro lado a não ser o objetivo principal da minha formatura.

“Seja curioso, não julgador.”

Walt Whitman

RESUMO

A atualização trazida pela IMO (*International Marine Organization*) em 2020 quanto aos limites de emissões de enxofre nas zonas de emissão controlada e em águas internacionais trouxe alguns desafios para armadores e empresas donas de frotas de navios ao utilizar e armazenar esses novos combustíveis com baixo teor de enxofre, que se dividem em destilados, residuais e misturas dos dois tipos. O objetivo desse trabalho é fazer uma revisão técnica dos principais problemas que os armadores vêm lidando com esse processo de mudança de combustíveis, e elencar algumas soluções mitigadoras que vêm sendo levantadas pelo mercado especialista em motores, lubrificantes e combustíveis. A presente pesquisa se baseia no modelo de revisão bibliográfica e revisão técnica, fazendo um compilado do que vêm sendo produzido de conteúdo sobre o tema. Problemas como ponto de ignição, qualidade de queima ou explosão, instabilidade e compatibilidade e presença de finos catalíticos são abordados nesse trabalho. A revisão técnica desse assunto é de suma importância e o desenvolvimento de novos estudos e soluções definitivas para os problemas aqui apresentados é fundamental para o mercado marítimo e seus motores de combustão interna, responsáveis por todo o tipo de operação offshore existente.

Palavras-chave: Finos catalíticos, IMO Anexo VI, Combustíveis com baixo enxofre, Instabilidade em combustíveis, Compatibilidade de combustíveis, Lubricidade, Lubrificação, Ponto de ignição, Ponto de fulgor, Motores de combustão interna, Motor de combustão principal, Motor de combustão auxiliar.

ABSTRACT

The new requirements established by IMO (International Marine Organization) in 2020 regarding the limits of sulfur emissions in controlled emission zones and in international waters brought some challenges for shipowners and ship operators when using and storing these new low sulfur fuels, which are divided into distillates, residual oils and mixtures of both types. The objective of this work is to present a technical review of the main problems that shipowners have been dealing with due to fuel change, and to list some mitigating solutions that have been raised by the engine specialists, lubricants and lubricity. The present work is based on the model of bibliographic and technical review, making a compilation of what has been published in terms of content on the subject. Problems such as ignition point, burning and explosion quality, fuel instability and compatibility and effects caused by catalytic fines are addressed. The technical review of these subjects is of paramount importance and the development of new studies and definitive solutions to the problems presented here is fundamental for the maritime market and its internal combustion engines, responsible for all types of existing cargo and offshore operations.

Key words: Catfines, Ultra Low Sulphur Fuel Oil, ULSFO, Very Low Sulphur Fuel Oil, VLSFO, Instability in fuels, Fuel compatibility, Lubricity, Lubrication, Ignition point, Flash point, Main Combustion Engine, Auxiliar Combustion Engine

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - W. CECIL com o primeiro motor funcional.....	16
Figura 2 - Motor a combustão inventado por Otto (Fonte: site Autocarup)	17
Figura 3 - Layouts comuns de motores (Stone, 1999).	18
Figura 4 - Motor em "W" (Fonte: Site Barbosa Pneus)	18
Figura 5 - Motor radial (Fonte: Site Cultura aeronáutica).....	19
Figura 6 - Arranjos de válvula suspensa (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 173) ...	20
Figura 7 - Um sistema cam-over-rocker com um ajustador hidráulico de folga (ou taco). Adaptado de Heisler (1995).	20
Figura 8 - Cabeçote de motor (Fonte: Site Fazer Fácil)	21
Figura 9 - O sistema de arrefecimento do Rover 800	23
Figura 10 - Carburador (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 31).....	25
Figura 11 - Curva característica de necessidade do motor (Durval Pizza, 1997, p. 51)	26
Figura 12 - Sistema Single Point (Durval Piza, 1997, p. 57)	27
Figura 13 - Sistema Multi Point (Durval Piza, 1997, p. 57).....	28
Figura 14 - Bosch LE 2.1 Jetronic (Durval Pizza, 1997, p. 58)	28
Figura 15 - Unidade de Comando de Injeção (Durval Pizza, 1997, p. 67)	29
Figura 16 - Órgãos Estacionários (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 22)	31
Figura 17 - Órgãos Móveis (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 23).....	32
Figura 18 - Eixo Virabrequim (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 23)	33
Figura 19 - Conjunto de acionamento de válvulas (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 23)	33
Figura 20 - Bomba de água (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 25).....	34
Figura 21 - Diagrama p-V e T-S do ciclo Otto (Brunetti, ano, p. 99).....	36
Figura 22 - Diagrama p-V e T-S do ciclo Diesel	38
Figura 23 - Motor 2 (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 21).....	39
Figura 24 - Funcionamento motor Diesel 2 tempos (Fonte: site auto entusiastas).....	40
Figura 25 - Wärtsilä-Sulzer 14RT-flex96C (Fonte: Site autotecnica.band.uol.com.br).....	40
Figura 26 - Motor Otto 4 tempos (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 19)	42
Figura 27 - Motor Diesel 2T (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 21)	43
Figura 28 - Gerador G3516 2000 kVA Caterpillar, com motor Diesel 4T (Fonte: cat.com).....	44
Figura 29 - Limites de emissões de enxofre (Fonte: BP marketing material: MARPOL 2020)	45
Figura 30 - Regiões MARPOL (Fonte: BP marketing material: MARPOL 2020)	46
Figura 31 - Regra para a redução de emissão de CO2 para novos projetos de navio (IMO, 2016)	48
Figura 32 - Linha do tempo com principais tendências de normas ambientais (Fonte: BP marketing material)	49
Figura 33 - Características ou limites do óleo combustível indicados como fora das especificações de acordo com a versão relevante da ISO 8217 (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)	55
Figura 34 - teste HFRR (Fonte: Diesel and Gasoline Engines, Richard Viskup, p.121).....	63
Figura 35 - Lubrificação Hidrodinâmica (Fonte: Diesel and Gasoline Engines, Richard Viskup)	64
Figura 36 - Lubrificação Limite (Fonte: Diesel and Gasoline Engines, Richard Viskup).....	65
Figura 37 – Pistão que utilizou lubrificante BN 70 por algumas horas de operação (Fonte: Considerations for using low-sulphur fuel, Wartsila, 2002).....	68
Figura 38 - Detalhe da figura 37, mostrando a formação de depósitos no topo do pistão (Fonte: Considerations for using low-sulphur fuel, Wartsila, 2002)	67

Figura 39 - Qualidade de combustão de combustíveis marítimos com baixo teor de enxofre após 2020. Ilustra como um combustível com baixo teor de enxofre e CCAI, na realidade, tem características de combustão ruins (Fonte: “Is VLSFO damaging your engine?”, INNOSPEC, 2020)	69
Figura 40 - As proporções típicas de mistura de combustíveis marinhos residuais modernos mostram uma proporção muito maior do componente saturado (parafínico) em combinação com aromáticos, que são estruturalmente diferentes, causando separação e instabilidade. (Fonte: “Is VLSFO damaging your engine”, INNOSPEC, 2020)	70
Figura 41 - O perfil de combustão de um HSFO típico (ECN 20) contra um VLSFO (ECN 16) com CCAI semelhante, mas características de combustão muito diferentes. (Fonte: “Is VLSFO damaging your engine”, INNOSPEC, 2020)	71
Figura 42 - Teste FIA - Distribuição das principais características de combustão de (25) VLSFO's compatíveis com ISO 8217 de todo o mundo. Todas as unidades estão em milissegundos (ms), exceto ECN, que é um valor de índice. (Fonte: “Is VLSFO damaging your engine”, INNOSPEC, 2020)	71
Figura 43 - Combustível que perdeu a estabilidade após mistura de bunkers, resultando na precipitação e aglomeração de moléculas de asfalto (Fonte: Ship and Bunker website, 2020)	72
Figura 44 - Finos catalíticos usado nas refinarias vistos no microscópio (Fonte: JHC Report - Marine Engine Damage due to Catalytic Fines in Fuel, 2013)	76
Figura 45 - Conteúdo de catfines relacionado ao conteúdo de enxofre para amostras do combustível as bunkered (Fonte: VPS evaluation: MAN ES, 2013)	76
Figura 46 - Visão microscópica de uma camisa de cilindro de ferro fundido (Fonte: MAN Diesel, 2013)	78
Figura 47 - As setas vermelhas mostram finos catalíticos embutidos nas lamelas do revestimento do cilindro de ferro fundido (Fonte: MAN Diesel, 2013)	79
Figura 48 - Vista aumentada do dano causado por um fino catalítico (Fonte: The Alfa Laval Adaptive Fuel Line BlueBook, 2018)	79
Figura 49 - Fotografia microscópica de finos catalíticos presos na malha de um filtro de combustível (Fonte: MAN Diesel, 2013)	80
Figura 50 - Tratamento típico de combustível (Fonte: The Alfa Laval Adaptive Fuel Line BlueBook, 2018)	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - três respostas mais comuns (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO).....	54
Tabela 2 - As 8 características fora de especificação mais citadas (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)	55
Tabela 3 - Distribuição de frequência de respostas relacionadas a depósitos e descargas de lodo (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)	56
Tabela 4 - Problemas mais frequentes mencionados (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)	59
Tabela 5 - Os seis maiores grupos de entrevistados com base no número de navios operados por sua empresa (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)	59

LISTA DE SIGLAS

VLSFO	Very Low Sulphur Fuel Oil
MGO	Marine Gas Oil
MDO	Marine Diesel Oil
IMO	International Marine Organization
HFO	Heavy Fuel Oil
ULSFO	Ultra Low Sulphur Fuel Oil
MCP	Motor de Combustão Principal
MCA	Motor de Combustão Auxiliar
MARPOL	Marine Pollution

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. HISTÓRICO, TIPOS E CICLOS DE FUNCIONAMENTOS DOS MOTORES	16
2.1 Histórico dos Motores de combustão interna	16
2.2 Tipos de Motores a combustão interna e principais componentes	17
2.2.1 Sistema de admissão, exaustão e comando de válvulas.....	19
2.2.2 Sistema de arrefecimento	22
2.2.3 Sistema de alimentação ou injeção.....	24
2.3 Orgãos principais do motor.....	29
2.4 Ciclos Teóricos de funcionamento	35
2.4.1 Ciclo Otto.....	36
2.4.2 Ciclo Diesel	37
2.5 Motores 2 tempos e 4 tempos.....	38
3. IMO FASE III – REQUISITOS DE EMISSÕES DE ENXOFRE	45
3.1 Demais poluentes e suas regulamentações.....	47
4. IMPACTO DO USO DOS COMBUSTÍVEIS VLSFO (VERY LOW SULPHUR FUEL OIL) E ULSFO (ULTRA LOW SULPHUR FUEL OIL)	50
5. IMPACTO DOS COMBUSTÍVEIS VLSF NOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	54
6. PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DAS CAMISAS DOS CILINDROS E POSSÍVEIS ADAPTAÇÕES PARA O VLSF	61
6.1 O problema da lubricidade nos VLSF e ULSF.....	62
6.2 Vazão de óleo lubrificante.....	65
6.3 Número base e detergência do óleo lubrificante	66
7. MUDANÇAS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E CALORIFICAS DO HSF PARA O VLSF: PRINCIPAIS PROBLEMAS E ADAPTAÇÕES NECESSÁRIAS	69
7.1 Qualidade do combustível	70
7.2 Qualidade da combustão	71
7.3 Estabilidade do combustível	73
8. O PROBLEMA DOS FINOS CATALÍTICOS (CATFINES) E SEU POTENCIAL ABRASIVO	76
8.1 Finos Catalíticos.....	77
8.2 Tamanho das partículas e filtragem.....	81
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo falar dos principais efeitos dos novos combustíveis com baixo teor de enxofre (VLSFO e LSFO) nos motores de combustão interna de grande porte, aplicados no setor marítimo, tanto na propulsão de embarcações (MCP) quanto na geração de energia (MCA). Além disso, algumas implicações comerciais e ambientais decorrentes das normas da IMO são abordadas.

Em decorrência da crescente demanda por reduções nos níveis de emissões em todos os setores da sociedade, todo o mercado industrial e marítimo está sofrendo adaptações e modificações para se adequar a exigências cada vez mais rigorosas.

Seguindo essa mesma linha a IMO, em seu anexo VI, define o limite de emissões de enxofre para embarcações em diferentes zonas no ambiente marítimo. Em 2020 houve uma nova atualização em relação aos níveis permitidos de emissões de enxofre, que impactou de forma direta todo o mercado marítimo a nível de operações, engenharia e custos. Os novos combustíveis com baixo teor de enxofre passaram a ser produzidos para atender a essa nova demanda imposta pelo anexo VI da IMO, porém suas propriedades viscosas e calorificas são diferentes dos combustíveis comumente utilizados pelo mercado marítimo, como o óleo pesado por exemplo.

Essa diferença nas propriedades químicas dos novos combustíveis com baixo teor de enxofre afetou diretamente o funcionamento dos motores de combustão interna de aplicação marítima, que passaram a operar com combustíveis para os quais não foram inicialmente projetados, tendo seus parâmetros de consumo e lubrificação alterados em função disso. Presença de finos catalíticos em quantidade superior e formação de cera nos tanques e filtros de combustível são alguns efeitos colaterais da mudança.

Os principais objetivos desse trabalho são elencar os problemas técnicos decorrentes da utilização dos combustíveis com baixo teor de enxofre, e baseado em artigos científicos e estudos realizados e em vigência, fazer uma análise de cada um deles e relacionar possíveis soluções para o mercado marítimo quanto a adequação dos motores de combustão interna ao novo cenário de emissões.

Inicialmente o trabalho abordará conceitos básicos de funcionamento dos motores a combustão interna, passando desde a história dos motores de combustão

interna de forma resumida, até os ciclos de funcionamento e principais componentes de um motor de combustão interna. Posteriormente serão abordadas as regulamentações da IMO para controle de emissões de diversos poluentes, tendo como o foco principal a emissão de enxofre. Em seguida será abordado o impacto das regulamentações do anexo VI da IMO no mercado marítimo e como a nova demanda do mercado por combustíveis com baixo teor de enxofre afetaram diversos setores da indústria, como as refinarias. Finalmente os problemas e desafios técnicos quanto ao funcionamento dos motores de aplicação marítima com os novos combustíveis *compliance* serão abordados, falando de aspectos como lubrificação e propriedades tribológicas das camisas dos cilindros, potencial de formação de cera em componentes do motor e concentração de finos catalíticos nos combustíveis, e como esses componentes podem afetar a microestrutura das camisas dos cilindros dos motores de combustão interna.

2. HISTÓRICO, TIPOS E CICLOS DE FUNCIONAMENTOS DOS MOTORES

2.1 Histórico dos Motores de combustão interna

Uma das primeiras ideias que se tem registro de alguém tentando aproveitar a força gerada pela expansão dos gases data de 1652, com o Padre HAUTEFOILLE. Apesar do mesmo ter sido registrado na história como um dos primeiros a explorar os princípios de funcionamento dos motores a combustão interna, não deixou nenhum registro escrito para constatação de seus resultados.

As décadas se passaram e muitos engenheiros e cientistas trabalharam no desenvolvimento de conceitos que tornassem viável a construção e funcionamento eficiente de um motor à combustão. Alguns nomes importantes foram: B. THOMPSON , W. CECIL, JEAN ETIENNE LENOIR, que construiu o primeiro triciclo com motor a gás de hilha ou óleo leve com 1,5 HP de potência, DUGALD CLERK, que em 1854 construiu o primeiro motor de combustão de 2 tempos, BARSANTI e MATTEUCI, BEAU DE ROCHÁS, e finalmente o mais importante e relevante para a história do desenvolvimento dos motores a combustão, NIKOLAUS AUGUST OTTO.



Figura 1 - W. CECIL com o primeiro motor funcional

OTTO, a partir dos conhecimentos desenvolvidos por LENOIR, construiu um motor semelhante para fins de experimento, e após isso consolidou seus conhecimentos e desenvolveu seu próprio projeto de motor com melhorias substanciais. Então em 1878 ele apresentou o seu projeto de motor na Feira

Internacional de Paris (VARELLA, Carlos. Histórico e desenvolvimento dos motores de combustão interna).

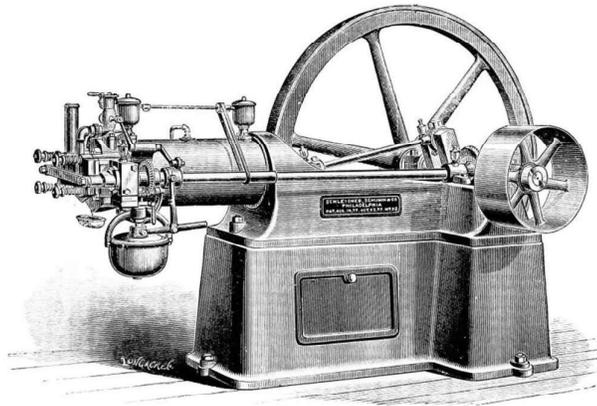


Figura 2 - Motor a combustão inventado por Otto (Fonte: site Autocarup)

2.2 Tipos de Motores a combustão interna e principais componentes

Os motores a combustão interna são divididos em diversas categorias de acordo com o método de funcionamento, características construtivas, componentes auxiliares etc. Brunetti (1989, p. 12) classifica os motores a combustão interna quanto ao sistema de alimentação de combustível, quanto à disposição dos órgãos internos, quanto ao sistema de arrefecimento, quanto às válvulas, quanto à alimentação de ar, quanto à relação de diâmetro e curso do pistão, quanto à rotação, quanto à fase do combustível, quanto a potência específica, quanto à ignição e quanto ao número de tempos do ciclo.

Nesse subcapítulo será enfatizada a classificação dos motores quanto à disposição dos órgãos internos. Nesse tipo de classificação observamos motores com princípios de funcionamentos similares em relação aos tempos de funcionamento e alimentação, porém as características construtivas são diferentes.

Richard Stone et al. (2004, p. 80) classifica como os tipos mais comuns de motores quanto à disposição dos cilindros são os *em linha (in-line)*, *Vee ou V* e *horizontalmente oposto*, conforme mostra a figura abaixo:

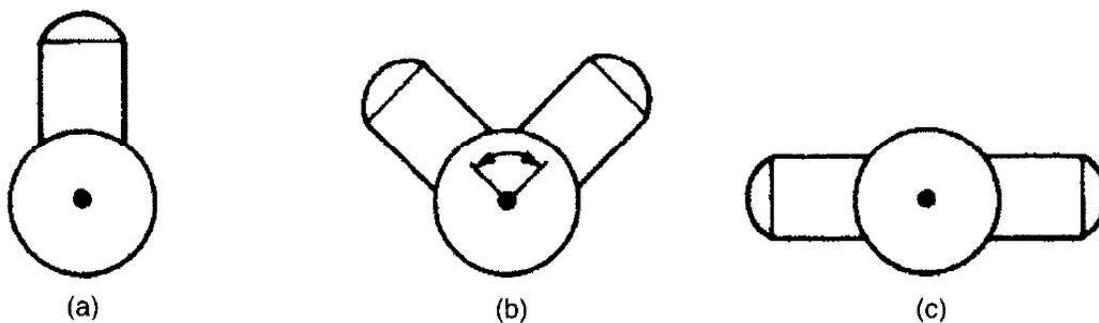


Figura 3 - Layouts comuns de motores (Stone, 1999).

Além dos tipos mais comuns de motores quanto à disposição dos cilindros, também temos os motores tipo “W”, que tem uma ideia construtiva parecida com o motor em “V”, e os motores radiais, que foram muito utilizados na aviação, sendo seu eixo rotativo conectado à hélice do avião.

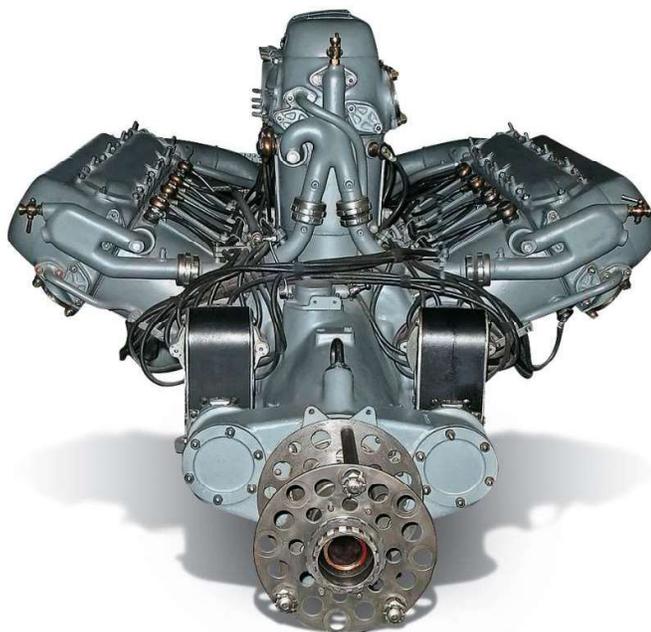


Figura 4 - Motor em “W” (Fonte: Site Barbosa Pneus)



Figura 5 - Motor radial (Fonte: Site Cultura aeronáutica)

Apesar da diferença construtiva nos motores apresentados, todos têm em comum diversos conceitos e princípios de funcionamento, além de componentes auxiliares semelhantes. A seguir estão listados alguns dos principais componentes de funcionamento dos motores à combustão interna.

2.2.1 Sistema de admissão, exaustão e comando de válvulas

Todos os motores de combustão interna de 4 tempos e os grandes motores marítimos de 2 tempos são dotados de um sistema de admissão e exaustão, e um sistema auxiliar que comanda a sincronização de abertura e fechamento das válvulas. Detalhes sobre os tempos de funcionamento dos motores ciclo Otto e ciclo Diesel serão visto na seção 2.3 e 2.4.

Na maioria dos casos, o comando de abertura e fechamento das válvulas é feito através de um eixo de cames, com ressaltos calculados para manter as válvulas abertas ou fechadas por um determinado período de tempo de acordo com a rotação do eixo principal.

O eixo de comando de válvulas (eixo de cames), a sede de válvulas, tuchos hidráulicos ou balancins, que efetuam o acionamento das válvulas atuados pelos ressaltos do eixo cames ficam todos alocados no componente do motor denominado de cabeçote.

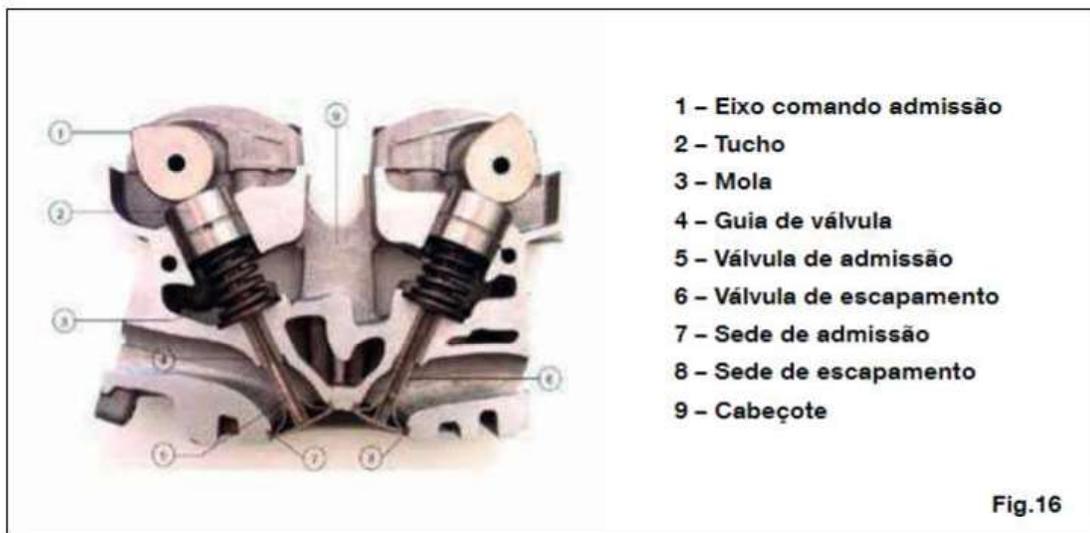


Figura 6 - Arranjos de válvula suspensa (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 173)

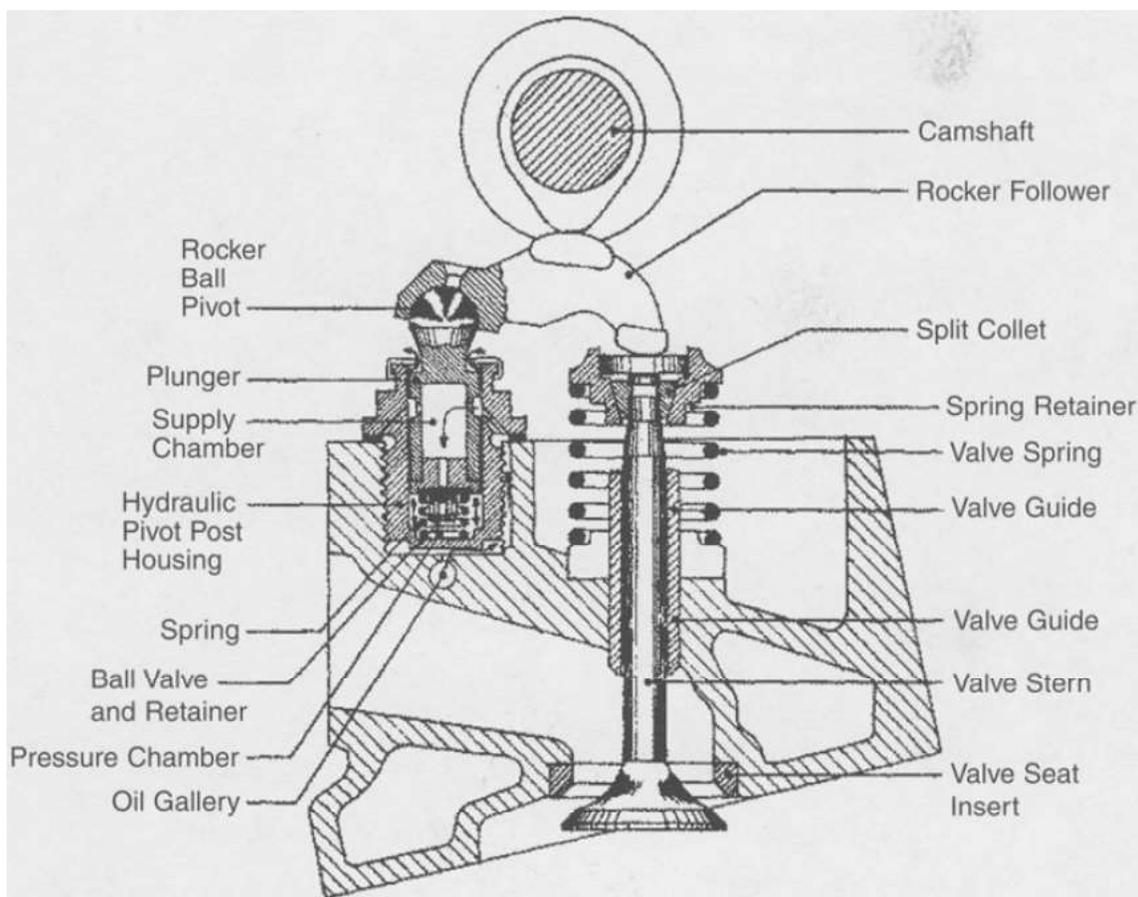


Figura 7 - Um sistema cam-over-rocker com um ajustador hidráulico de folga (ou taco). Adaptado de Heisler (1995).

A Figura 6 apresenta o sistema de controle de válvulas de um Ford V-6 Essex (figura a) e de um Triumph Dolomite Sprint (figura b), que no lado da admissão o ressalto do eixo comes atua diretamente a válvula, sem atuar o balancim. Já a Figura

7 apresenta um sistema *cam-over-rocker*, que significa eixo acima do balancim, sendo esse último a atuar a válvula, que nesse caso já conta com um sistema hidráulico de acionamento.

Conforme mencionado anteriormente, todos esses componentes se encontram no cabeçote do motor, que acopla na parte superior do bloco do motor. O cabeçote além de alojar a sede de válvulas, o eixo de comando de válvulas, velas (nos motores de ciclo Otto) e balancim, também tem galerias internas para a passagem do líquido de arrefecimento (exceto nos motores resfriados a ar), permitindo o controle de temperatura do motor e dos componentes citados. Porém no passado era comum o eixo de comando de válvulas ficar alocado no bloco do motor, ficando no cabeçote somente o balancim e válvulas, que eram acionados pela haste de comando, ligada ao eixo cames de comando das válvulas. Abaixo um exemplo de cabeçote com indicações autoexplicativas, aonde o eixo de comando fica no bloco:

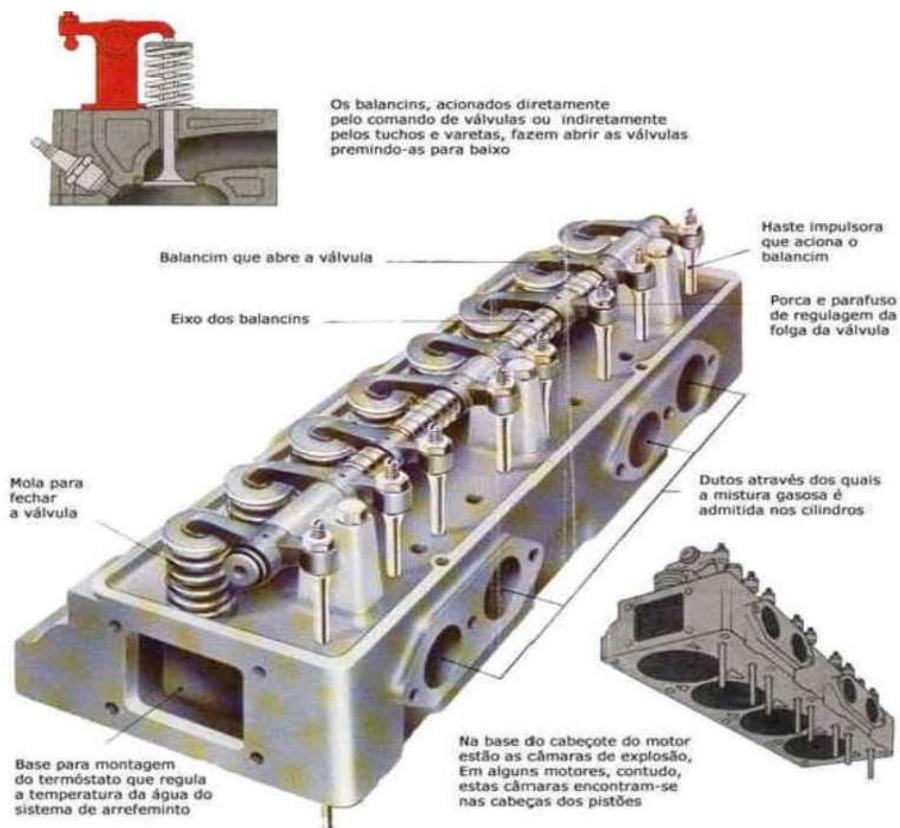


Figura 8 - Cabeçote de motor (Fonte: Site Fazer Fácil)

2.2.2 Sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento é composto de um conjunto de sistemas eletromecânicos que têm a função de controlar a temperatura dos motores de combustão interna. Os motores de combustão interna, além de produzir uma grande diferença de temperatura entre os gases e as paredes da câmara de combustão, a reação de combustão promove a transferência de parte do calor gerado para as paredes dos cilindros e, conseqüentemente, ao cabeçote (BRUNETTI, 2012, p. 369).

Sendo assim, o sistema de arrefecimento do motor deve garantir que os componentes do motor operem em temperaturas controladas de acordo com os limites dos materiais que constituem o motor.

Os principais componentes do sistema de arrefecimento em um sistema de um motor à combustão interna são: bomba de água, radiador, válvula termostática, reservatório de expansão e ventoinha (fan).

Existem também motores cujo resfriamento pe feito por ar, como os motores 2 tempos das motos e os antigos motores do Fusca e até mesmo do Porsche, que dispõe de aletas para a troca de calor com o ar com a moto em movimento. Porém, no geral o sistema mais utilizado é o sistema água-ar, devido a troca de calor mais eficiente e compacta.

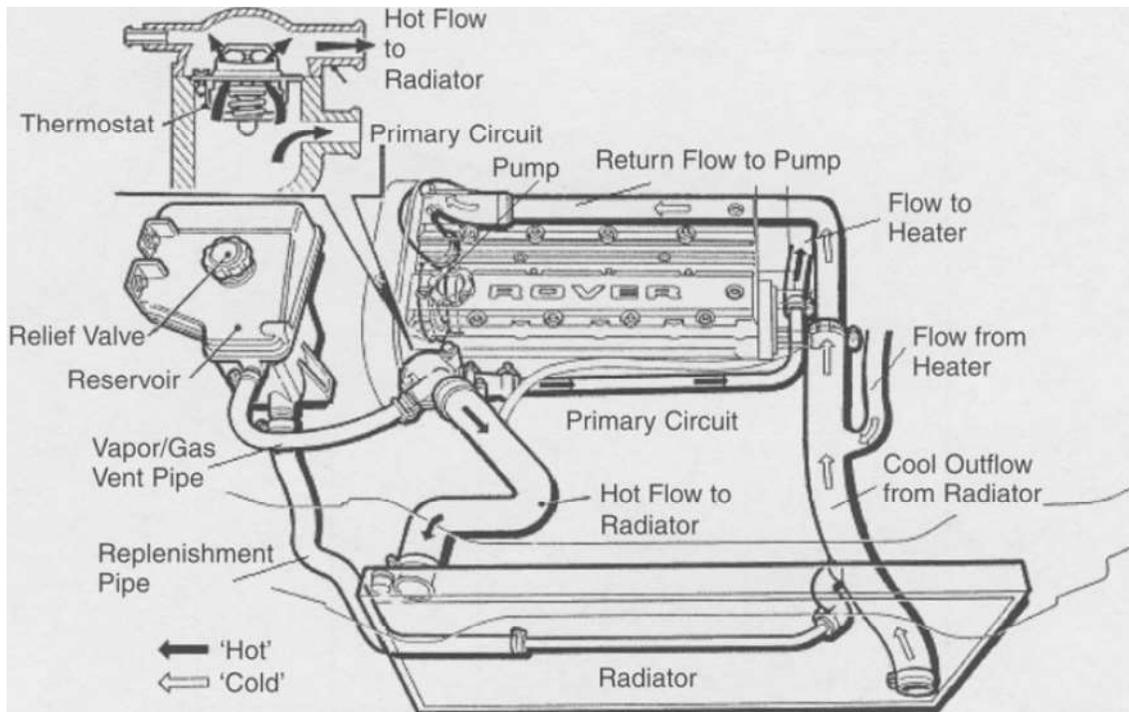


Figura 9 - O sistema de arrefecimento do Rover 800

A figura 9 mostra um exemplo de um sistema água-ar convencional, aonde o líquido de arrefecimento passa por dentro do cabeçote e bloco do motor absorvendo o calor do mesmo, e através do fluxo gerado pela rotação da bomba de água, esse líquido chega até o radiador, aonde troca calor com o ar que passa pelas aletas do mesmo, assim resfriando o líquido refrigerante para mais uma vez repetir o ciclo de resfriamento dentro do sistema. A bomba de água por sua vez é tocada pela correia de acessórios, que ligada à polia do virabrequim, transmite o movimento de rotação que possibilita o funcionamento da bomba.

Além do radiador, que efetua a troca de calor do líquido refrigerante com o ar, e a bomba de água que gera o fluxo fluido mecânico dentro do sistema, temos a válvula termostática, responsável por manter o fluxo fechado, circulando somente entre o bloco e cabeçote do motor e o reservatório de expansão quando fechada, e quando aberta, permitindo que o fluxo do líquido passe pelo radiador para efetuar a troca de calor. A abertura e fechamento da válvula, como o nome dela indica, é feita de acordo com a temperatura do fluido refrigerante. Por fim, temos o reservatório de expansão, local por onde se faz o abastecimento de fluido refrigerante, e também responsável por acomodar a dilatação do fluido e os vapores gerados durante o

funcionamento do motor. Tanto os vapores quanto uma parte do líquido circulante volta para o reservatório de expansão através de um retorno chamado “vent”, que geralmente liga o radiador ao reservatório de expansão.

2.2.3 Sistema de alimentação ou injeção

Os sistemas auxiliares e componentes dos motores a combustão interna foram sofrendo alterações e muitas melhorias com o passar do tempo e conseqüente avanço da tecnologia.

Ao longo dos anos de evolução os motores de combustão interna passaram por alguns tipos de sistemas de alimentação. Podemos citar alguns deles: carburador elementar, sistema de injeção eletrônica monoponto e sistema de injeção eletrônica multiponto para motores de ciclo Otto, e sistema distribuidor (bomba rotativa), sistema de bombas individuais (bomba em linha), sistema acumulador (o injetor funciona como bomba), sistema *Common Rail* para motores Diesel e o sistema de injeção direta.

A seguir será feita uma breve descrição dos principais sistemas de injeção e seus métodos de funcionamento:

2.2.3.1 Carburador Elementar

É um elemento mecânico que promove a mistura combustível / ar, dosando a quantidade de combustível para uma certa vazão de ar admitida pelo motor (Durval Piza de Oliveira Junior, 1997, p. 51).

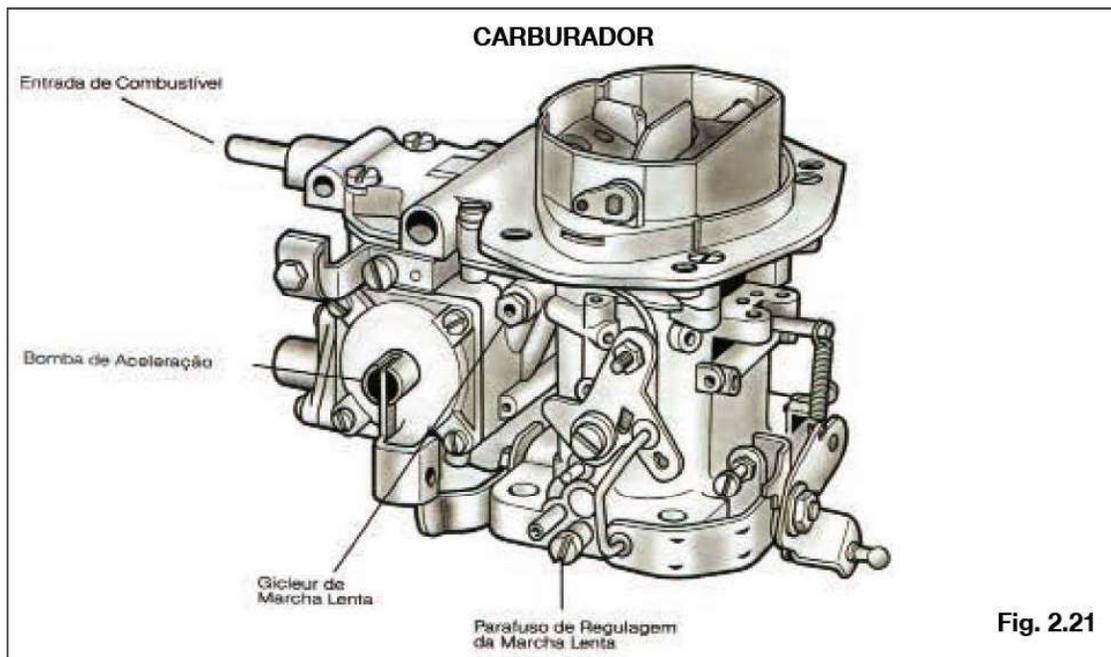


Fig. 2.21

Figura 10 - Carburador (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 31)

Para que um carburador elementar atenda devidamente às necessidades de um motor, ele deve ter sistemas auxiliares para diferentes faixas de trabalho. Sendo assim, ele deve ter no mínimo os seguintes sistemas auxiliares:

- Marcha-lenta e progressão
- Faixa econômica
- Máxima potência
- Acelerações rápidas
- Partida a frio

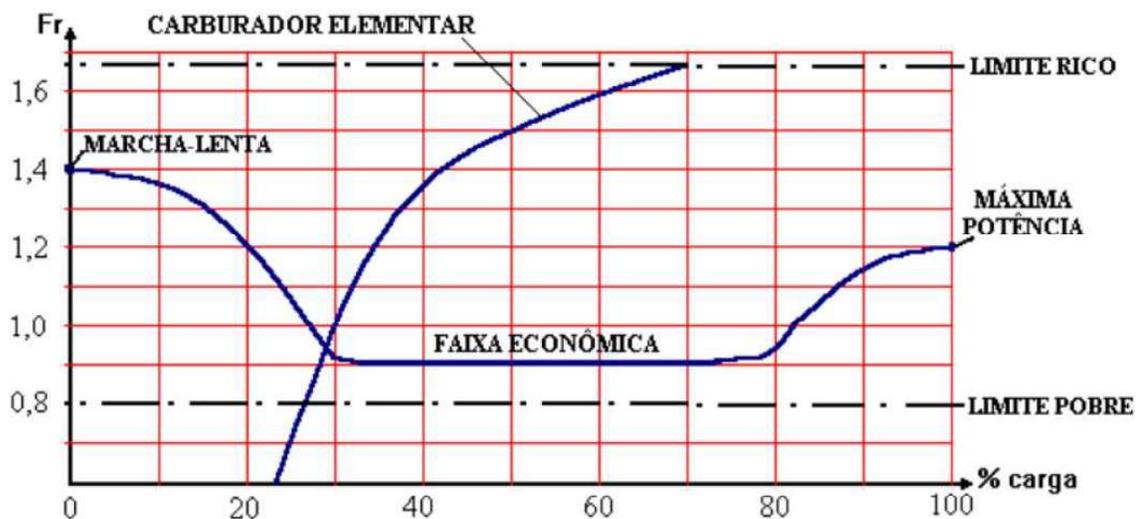


Figura 11 - Curva característica de necessidade do motor (Durval Pizza, 1997, p. 51)

Cada sistema auxiliar funciona com diferentes regulagens do carburador, utilizando elementos como o *gicleur* para controlar a vazão de ar para uma determinada quantidade de combustível, de acordo com a abertura da borboleta (demanda) e conseqüentemente em função da carga do motor.

2.2.3.2 Sistema de Injeção Eletrônica

A redução de emissões para todos os tipos de veículos automotores, e todos os motores de qualquer natureza que queimam combustível fóssil e emitem poluentes, é cada vez mais crescente no Brasil e no mundo.

Nos capítulos a seguir o assunto de emissões é mais aprofundado, porém é indispensável citar o PROCONVE, que estabeleceu metas para as emissões de veículos automotores. O estabelecimento das novas metas de emissões pelo PROCONVE no Brasil empurrou as indústrias automotivas a adotarem soluções para diminuir as emissões de poluentes. Sendo assim, a indústria adotou basicamente duas soluções iniciais: controle mais preciso da relação combustível/ar (injeção eletrônica) e tratamento de gás de escape (conversor catalítico).

O primeiro veículo a receber injeção eletrônica de combustível no Brasil foi o Golf GTI, que utilizava o sistema *LE 2.1 jetronic* da Bosch. Em 1991 a GM do Brasil passou a equipar toda a sua linha Monza e Kadett com injeção eletrônica de combustível utilizando o sistema MULTEC TBI 700 da AC Rochester, tanto a gasolina

quanto a álcool. Hoje todos os automóveis de passeio, produzidos no Brasil contam com injeção eletrônica de combustível, dos seguintes fabricantes: Bosch, Delphi, Magneti-Marelli e FIC (Ford). (Durval Piza, 1997, p. 57)

Sistemas de injeção eletrônica em motores de ignição por centelha

Os sistemas de injeção eletrônica se dividem em alguns principais tipos: o sistema Single Point, o Sistema Multi Point e o sistema de injeção direta.

No sistema Single Point há um único injetor para todos os cilindros, injetando o combustível na entrada do coletor de admissão, que é levado para dentro dos cilindros pelo fluxo natural do ar dentro do coletor de admissão.

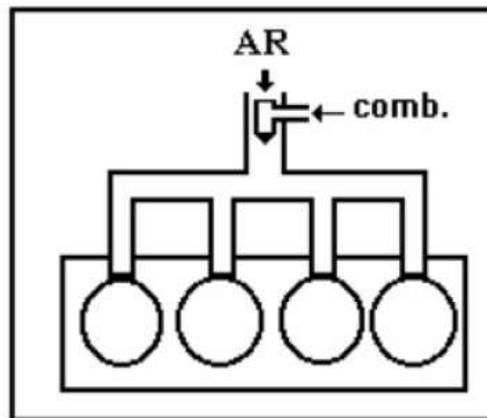


Figura 12 - Sistema Single Point (Durval Piza, 1997, p. 57)

Já o sistema Multi Point conta com bicos injetores para cada cilindro, sendo o combustível injetado individualmente antes da válvula de admissão de cada cilindro. É o sistema mais utilizado atualmente, na forma de injeção indireta.

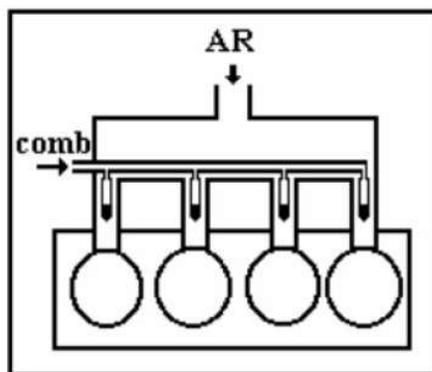
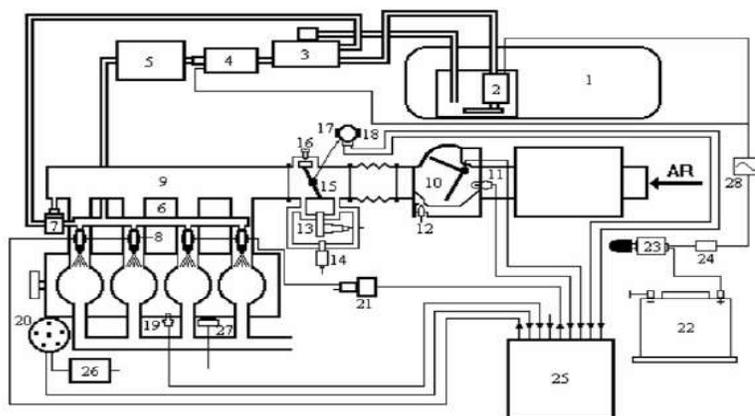


Figura 13 - Sistema Multi Point (Durval Piza, 1997, p. 57)

O sistema de injeção eletrônico conta com um conjunto de subsistemas, sensores e componentes que integram o seu funcionamento. Através da leitura dos sensores, como sensor de pressão absoluta, sensor de temperatura do ar, sensor de temperatura, sensor de abertura da borboleta, etc; é feito o cálculo de qual deve ser a injeção de combustível para a mistura adequada. Abaixo segue o exemplo do sistema de injeção eletrônica, o Bosch LE 2.1 Multi-Ponto Jetronic:



COMPONENTES DO SISTEMA:

- | | |
|--|--|
| 1- Reservatório de combustível | 15- Borboleta aceleradora |
| 2- Bomba auxiliar | 16- Parafuso de regulagem da marcha lenta |
| 3- Eliminador de bolhas | 17- Interruptor de borboleta aceler. fechada |
| 4- Bomba de combustível | 18- Interruptor de borboleta aceler. aberta |
| 5- Filtro de combustível | 19- Sensor de temperatura do motor |
| 6- Tubo distribuidor | 20- Distribuidor de ignição |
| 7- Regulador de pressão | 21- Resistores das válvulas |
| 8- Válvula de injeção (uma por cilindro) | 22- Bateria |
| 9- Coletor de admissão | 23- Comutador de ignição |
| 10- Medidor de vazão de ar | 24- Relé de comando da injeção |
| 11- Sensor de temperatura do ar | 25- Unidade de comando da injeção |
| 12- Parafuso de regulagem da % de CO | 26- Bobina de ignição |
| 13- Regulador de ar adicional | 27- Sensor de detonação |
| 14- Válvula corretora de rotação | 28- Fusível |

Figura 14 - Bosch LE 2.1 Jetronic (Durval Piza, 1997, p. 58)

Também indispensável e fundamental para o funcionamento dos sistemas de injeção eletrônica, a UCI (Unidade de Comando de Injeção) tem como função receber as informações e leituras de diversos sensores, e assim definir os parâmetros de injeção de forma a obter um funcionamento sem falhas e com a mínima emissão de poluentes. Para tal comanda o acionamento das velas, definindo o momento exato da centelha, a abertura da válvula de purga do cânister, a marcha lenta, através do controle do atuador de marcha lenta. Também comanda o funcionamento da bomba de combustível e fornece *outputs* de diagnose, acendendo luzes e avisos no painel de comando sobre anomalias, anormalidades e avisos de manutenção.

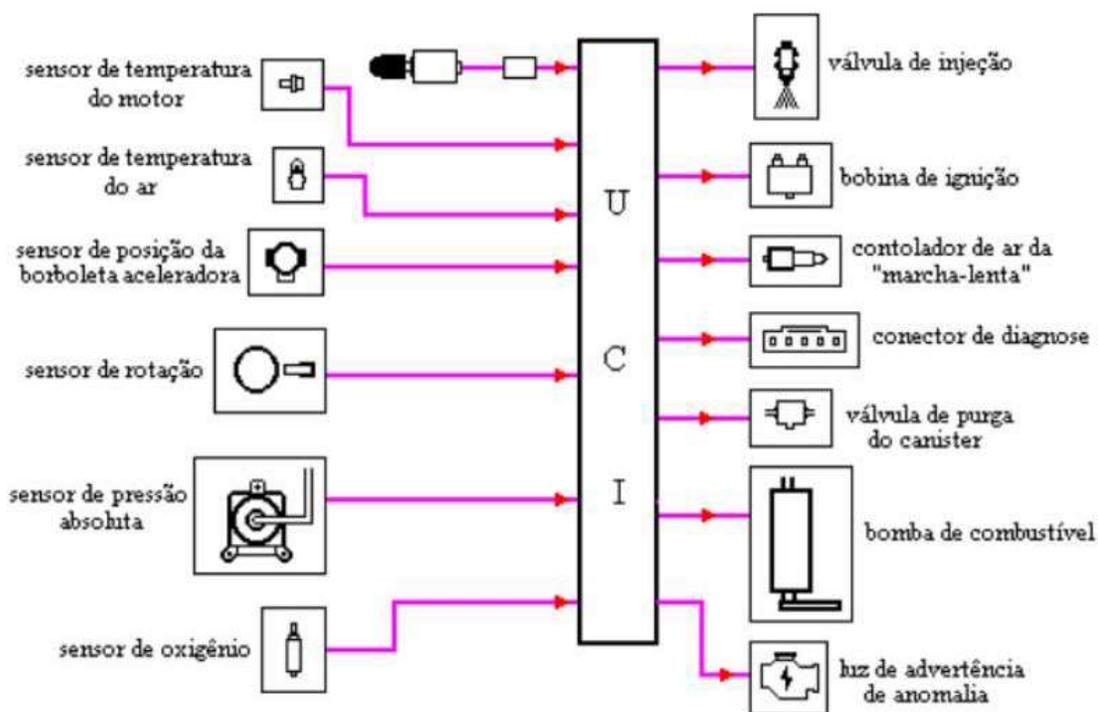


Figura 15 - Unidade de Comando de Injeção (Durval Pizza, 1997, p. 67)

2.3 Órgãos principais do motor

Os motores de combustão interna, sejam eles 2 tempos ou 4 tempos, dispõem de órgãos ou componentes que são cruciais para o funcionamento do conjunto mecânico que compõe o motor.

Os principais componentes do motor podem se dividir em componentes móveis ou componentes estacionários, e os mesmos serão apresentados a seguir conforme essa classificação.

2.3.1 Componentes estacionários

Bloco

O bloco é o motor em si, no qual estão alocados os cilindros e os furos para a alocação das camisas dos cilindros. Na parte inferior do bloco estão alocados os mancais de apoio do eixo virabrequim, e mais comumente em motores diesel, o eixo de comando de válvulas.

Cabeçote

Funciona como tampa dos cilindros, contra a qual o pistão comprime a mistura de ar/combustível. Aloca o conjunto das válvulas e comumente o eixo de comando de válvulas.

Cárter

Funciona como tampa inferior do motor (acoplada no bloco), protegendo os componentes inferiores do motor e também servindo de depósito de óleo lubrificante.

Coletor de admissão

Recebe e distribui a mistura (Ciclo Otto) ou o ar (Ciclo Diesel) aspirado pelo pistão após passar pelo filtro de ar.

Coletor de escape

Recebe os gases queimados que saem dos cilindros para lança-los na atmosfera, após a passagem pelo catalisador, tubo de escape e silencioso.

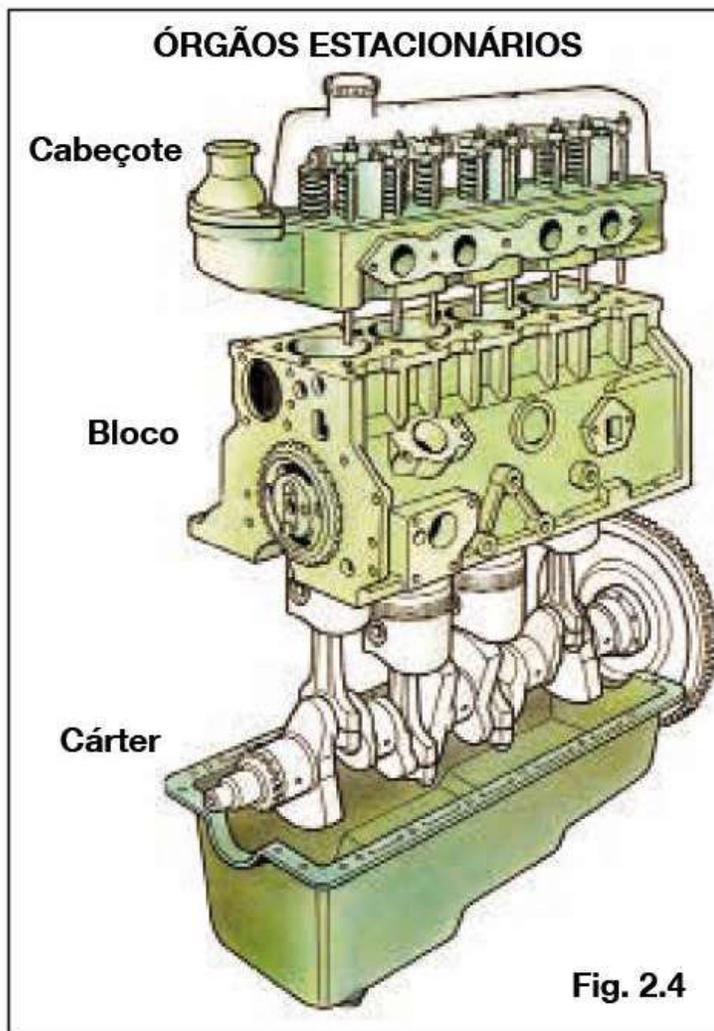


Figura 16 - Órgãos Estacionários (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 22)

2.3.2 Componentes móveis

Biela

É o braço de ligação entre o pistão e o eixo virabrequim do motor. Transmite o movimento retilíneo do pistão para o eixo virabrequim em forma de movimento rotativo.

Pistão

É a base e componente móvel da câmara de combustão, que recebendo a força de expansão dos gases queimados na combustão, se desloca e transmite o movimento para a biela, que por sua vez transmite para o eixo virabrequim.

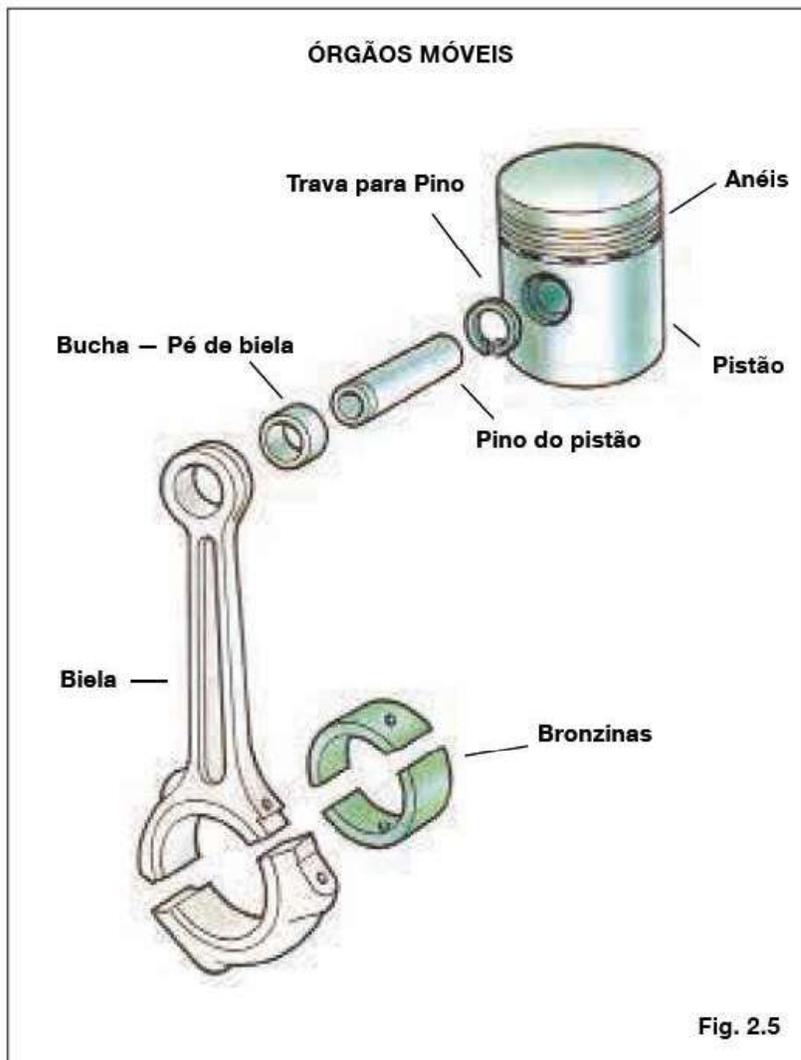


Figura 17 - Órgãos Móveis (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 23)

Virabrequim

É o eixo principal do motor, de onde sai a força motriz para os demais componentes que precisam de tomada de força através da correia dentada, ou da correia de acessórios. No caso dos motores diesel, a tomada de força é feita através do trem de força, que consiste em um conjunto de engrenagens que transmitem a rotação do eixo virabrequim para outros componentes do motor, como bomba de água, bomba de óleo, alternador e tomada de forças auxiliares, como acontece em motores diesel de grande porte aplicados em guindastes, que tem tomada de força para sistema de bombas hidráulicas.

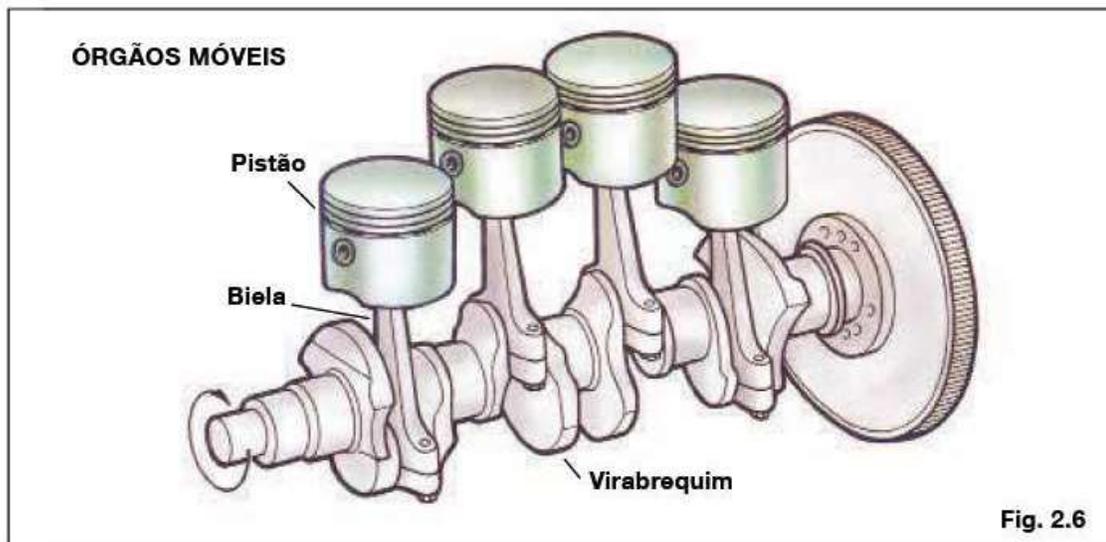


Figura 18 - Eixo Virabrequim (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 23)

Eixo de comando de válvulas

A função desse eixo é, através dos ressaltos, acionar a abertura das válvulas de admissão e de escape. O eixo por sua vez é acionado através da rotação do eixo virabrequim, sendo a transmissão feita por correia, corrente ou engrenagens.

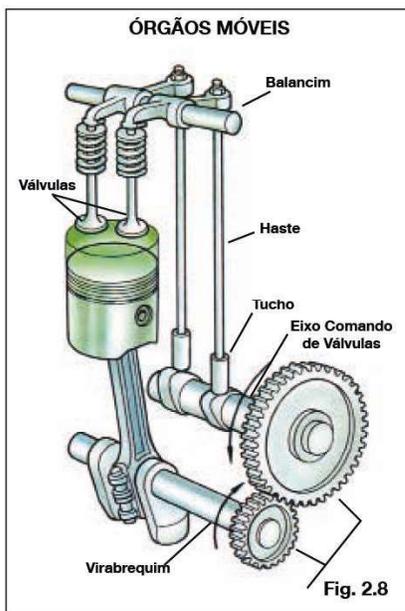


Figura 19 - Conjunto de acionamento de valvulas (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 23)

Bomba de água

Mecanismo destinado a efetuar a circulação de água pelo motor e radiador, para arrefecimento do motor.

Bomba de óleo

Mecanismo que tem por objetivo levar o óleo do cárter para todos as partes e componentes do motor que precisam de lubrificação.

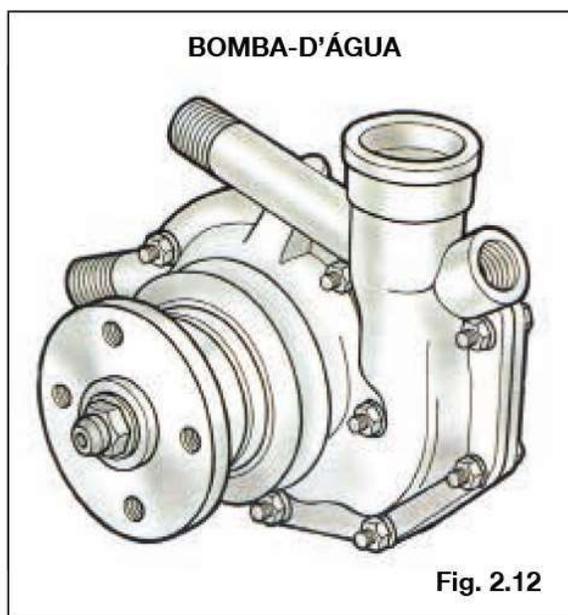


Figura 20 - Bomba de água (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 25)

2.4 Ciclos Teóricos de funcionamento

Os motores de combustão interna funcionam segundo ciclos teóricos de funcionamento, que podem ser estudados adotando premissas e simplificações para modelos teóricos.

Nesse trabalho apresentaremos os ciclos teóricos de funcionamento correlatos ao tema de estudo, que são os motores de combustão interna de aplicação marítima. Sendo assim, abordaremos os ciclos de Otto e Diesel.

O estudo dos ciclos reais torna-se difícil em razão da complexidade do fluido ativo, cuja composição varia durante os processos, e da complexidade dos próprios processos. Para facilitar o estudo e para poder tirar conclusões qualitativas e, às vezes, até quantitativas, associa-se a cada ciclo real um ciclo-padrão, dentro de algumas hipóteses simplificadoras que, de alguma forma, tenham semelhança com o ciclo real correspondente e permita uma aplicação da Termodinâmica. Uma dessas hipóteses considera que o fluido ativo seja ar puro, derivando daí o nome de ciclos a ar. (Brunetti, 1989, p. 96)

As hipóteses são:

- 1- O fluido ativo (FA) é ar
- 2- O ar é um gás perfeito, ideal
- 3- Não há admissão nem escape (os gases queimados não precisam ser trocados por mistura nova). Essa hipótese permite a utilização da Primeira Lei da Termodinâmica para sistemas em lugar da Primeira Lei para Volume de Controle
- 4- Os processos de compressão e expansão são isentrópicos – ou seja, adiabáticos e reversíveis
- 5- A combustão é substituída por um fornecimento de calor ao FA a partir de uma fonte quente. Esse processo de fornecimento de calor poderá ser isocórico, isobárico, ou em uma combinação de ambos, dependendo do ciclo
- 6- Para retorno às condições iniciais, o calor é retirado por uma fonte fria num processo isocórico
- 7- Todos os processos são considerados reversíveis

2.4.1 Ciclo Otto

Adotando as premissas apresentadas anteriormente, esse ciclo teórico pretende representar o ciclo real do motor Otto. Nos diagramas da figura 21, os eixos das abscissas trazem propriedades termodinâmicas extensivas (volume e entropia), que são propriedades que dependem da massa do FA, e portanto do tamanho do motor.

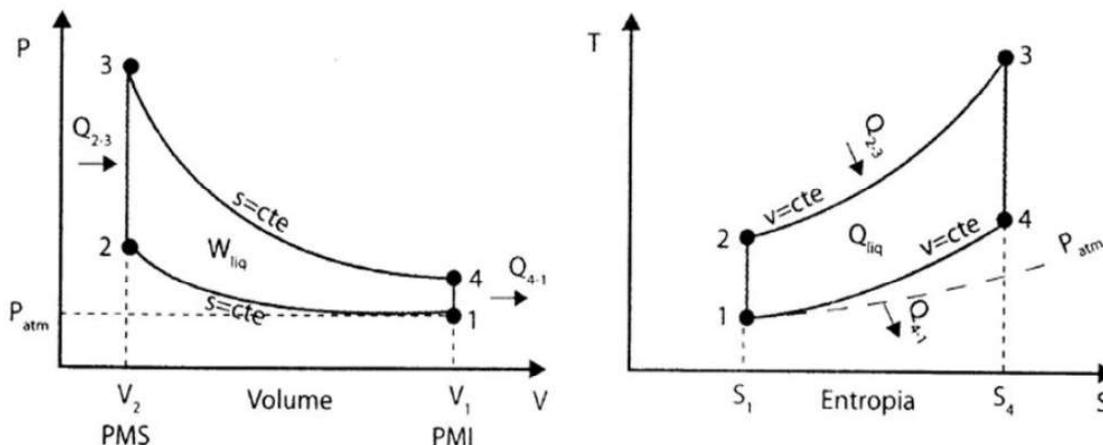


Figura 21 - Diagrama p-V e T-S do ciclo Otto (Brunetti, ano, p. 99)

As propriedades termodinâmicas podem ser classificadas em propriedades extensivas e propriedades intensivas. As propriedades extensivas são as que dependem da quantidade de matéria do sistema. Já as propriedades intensivas são as que não dependem da quantidade de matéria do sistema.

Existem também as propriedades específicas, que são indicadas pela letra minúscula correspondente a maiúscula da extensiva da qual são derivadas. Seguem alguns exemplos:

- Volume específico: $v = V/m$
- Energia interna específica: $u = U/m$
- Entropia específica: $s = S/m$

Voltando à figura 21, temos o ciclo Otto com 4 processos:

- 1 – 2: Compressão isentrópica. Simula a subida do pistão até o PMS, comprimindo os gases da câmara de combustão.

- 2 – 3: Fornecimento de calor isocórico. Simula o calor liberado na combustão, considerando que seja totalmente fornecido quando o pistão encontra-se no ponto morto superior (PMS), através da centelha da vela.
- 3 – 4: Expansão isentrópica. Simula a descida forçada do pistão através da expansão dos gases da combustão até o PMI (ponto morto inferior), gerando a força motriz.
- 4 – 1: Retirada de calor do sistema. Simula a abertura das válvulas no processo de calor rejeitado dos gases, tendo-se uma queda de pressão

Basicamente os motores de ciclo Otto são os motores com ignição por centelha, que funcionam a gasolina, GNV ou etanol. A maioria dos automóveis de pequeno e médio porte, e até mesmo alguns de grande porte utilizam principalmente o motor com ciclo Otto (Por questões legais, veículos leves fabricados no Brasil só podem utilizar motores ciclo Otto).

As características construtivas do motor ciclo Otto, quando comparadas aos motores Diesel, são menos robustas, em função da taxa de compressão mais baixa, e apresentam até mesmo menor durabilidade. Muito em função disso é que automóveis movidos a Diesel são consideravelmente mais caros que automóveis movidos a gasolina/etanol. Apesar da diferença entre os ciclos de funcionamento e na robustez, os dois motores compartilham os mesmos conceitos e quase todos os princípios de funcionamento, como por exemplo: eixo de comando de válvulas, eixo virabrequim, PMS e PMI, cilindros, pistões, sincronização dos comandos de válvulas com o eixo virabrequim por correia, corrente ou trem de força, etc.

2.4.2 Ciclo Diesel

O ciclo Diesel é semelhante ao Otto, porém com algumas diferenças nas etapas do diagrama $p - V$ e $T - S$. Abaixo a figura 22 mostra os diagramas para o ciclo Diesel.

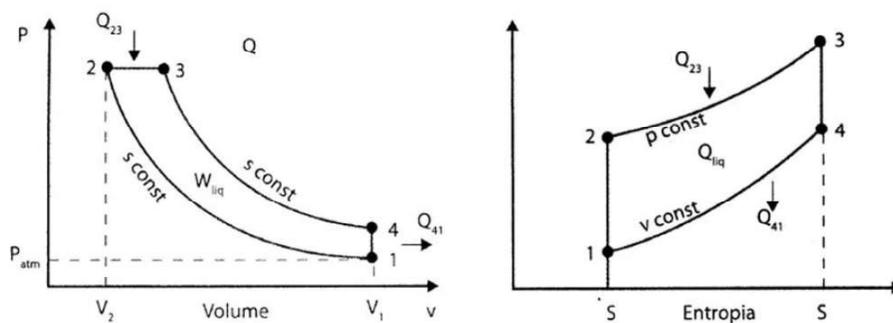


Figura 22 - Diagrama p-V e T-S do ciclo Diesel

Assim como o ciclo Otto, o ciclo Diesel se constitui de 4 processos:

- 1- Compressão isentrópica. Simula a subida do pistão até o PMS, comprimindo os gases da câmara de combustão, porém nos motores Diesel esse processo ocorre com uma taxa de compressão mais elevada.
- 2- Fornecimento de calor isobárico. Simula a compressão dos gases a uma alta taxa de compressão, promovendo então o aquecimento dos gases e a combustão.
- 3- Expansão isentrópica. Simula a descida forçada do pistão através da expansão dos gases da combustão até o PMI (ponto morto inferior), gerando a força motriz.
- 4- Retirada de calor do sistema. Simula a abertura das válvulas no processo de calor rejeitado dos gases, tendo-se uma queda de pressão

Importante notar que os diagramas são baseados em modelos teóricos, adotando as premissas citadas nessa seção. Para a obtenção dos diagramas reais, existem programas que através de um sensor de pressão eletrônico, traçam o diagrama para avaliação dos valores de volume, pressão, calor admitido, rejeitado, etc.

2.5 Motores 2 tempos e 4 tempos

Os motores a combustão interna se dividem em 2 tipos quanto às etapas de funcionamento ou ciclos, são eles os motores 2 tempos e os motores 4 tempos. As principais diferenças entre os dois tipos de motores estão na construção e funcionamento.

2.5.1 Motores 2 tempos

Os motores dois tempos produzem uma explosão a cada giro do eixo central, e tem a construção mais simplificada, pois não dispõem de válvulas de admissão e nem de escapamento. Devido a isso, os motores 2 tempos possuem um menor custo de manutenção e até mesmo de produção. Entretanto, devido a menor eficiência e maior nível de emissões, os motores 2 tempos foram sendo substituídos por motores de 4T, mais eficientes, e hoje se limitam basicamente a motores pequenos e de baixo custo, exceto nos grandes motores marítimos que continuam sendo 2 tempos. O funcionamento do motor 2 tempos funciona da seguinte forma:

- Primeiro tempo: o pistão sobe comprimindo a mistura de ar e combustível no cilindro e produz a rarefação no cárter. Logo na sequência, acontece a ignição e combustão da mistura
- Segundo tempo: os gases da combustão se expandem e fazem o pistão descer, comprimindo a mistura no cárter. Em seguida, o pistão abre a janela de exaustão e possibilita a saída dos gases queimados no processo

MOTOR DE DOIS TEMPOS

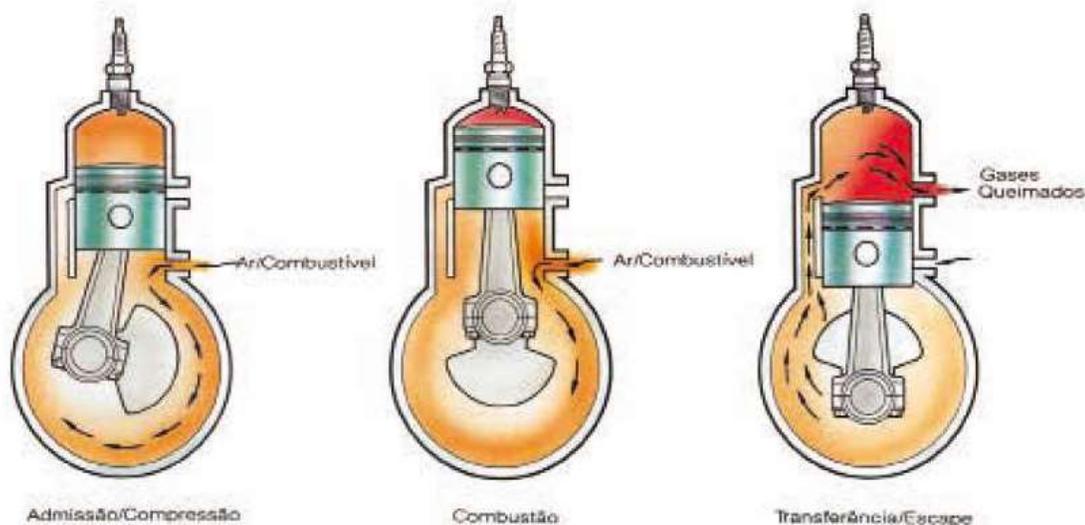


Figura 23 - Motor 2 (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 21)

Os motores diesel de dois tempos têm funcionamento semelhante ao motor de dois tempos a gasolina ou a álcool, porém, admite apenas ar puro, geralmente forçado no interior do cilindro por um compressor de baixa pressão.

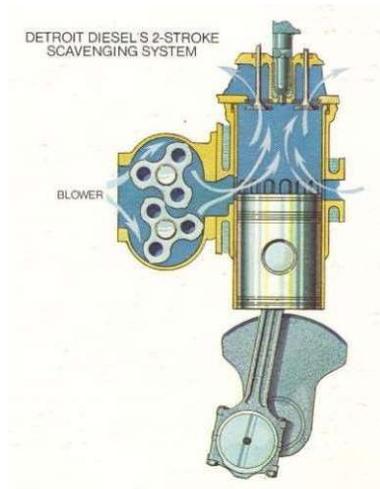


Figura 24 - Funcionamento motor Diesel 2 tempos (Fonte: site auto entusiastas)

Os motores no ambiente marítimo que utilizam o sistema de 2 tempos ou 2 ciclos de funcionamento são os motores de propulsão marítima, ou como são mais conhecidos, os MCP's (Motor de combustão principal). Os MCP's são os maiores motores de combustão interna do mundo, figurando entre eles o maior motor do mundo, o Wärtsilä-Sulzer 14RT-flex96C.



Figura 25 - Wärtsilä-Sulzer 14RT-flex96C (Fonte: Site autotecnica.band.uol.com.br)

O Wärtsilä-Sulzer 14RT-flex96C possui uma potência de 108.878 cv, e seu consumo está em torno de 14.000 litros/hora a 120rpm, sendo essa a sua rotação máxima. Suas dimensões são 13,52 metros de altura, 26,53 metros de comprimento e seu peso é de 2300 toneladas.

Os motores 2 tempos são empregados na indústria marítima porque eles podem usar óleo combustível pesado (óleo C; um resíduo do processo de refino de petróleo), sua eficiência térmica como motores de propulsão única é de aproximadamente 50%, eles podem diminuir a velocidade de rotação para cerca de 100 min⁻¹ ou menos e assim, uma hélice pode ser conectada diretamente e, portanto, eles podem alcançar a mais alta eficiência de toda uma usina ou planta.

Devido ao seu grande porte, os motores MCP tem um consumo muito elevado (quando comparado a motores menores), e isso traz uma preocupação em relação às emissões. Todos os motores MCP ou até mesmo os MCA (Motor de combustão auxiliar, usados para geração de energia) emitem agentes poluentes como NO_x, SO_x, CO, particulados, entre outros. Todos esses agentes poluentes têm suas emissões regulamentadas pelas autoridades marítimas internacionais, como a IMO (International Marine Organization) em seus diversos anexos, como veremos mais adiante. Sendo assim, os fabricantes já estão propondo diversas soluções aplicadas nas próprias características construtivas do motor, como o EGR (Exhaust Gas Recirculator) e até mesmo sistemas integrados com Scrubbers. Mais adiante na seção de emissões veremos em detalhes as soluções do mercado para os problemas de emissões e seus resultados.

2.5.2 Motores 4 tempos

Já os motores 4 tempos são os mais convencionais e conhecidos, e seguem basicamente os modelos Diesel e Otto 4 tempos apresentados anteriormente nos diagramas p-V e T-S. Têm a construção mais complexa, dispendo de válvulas de escape e admissão, eixos de comando de válvulas e completam um ciclo com duas voltas do eixo virabrequim (720°).

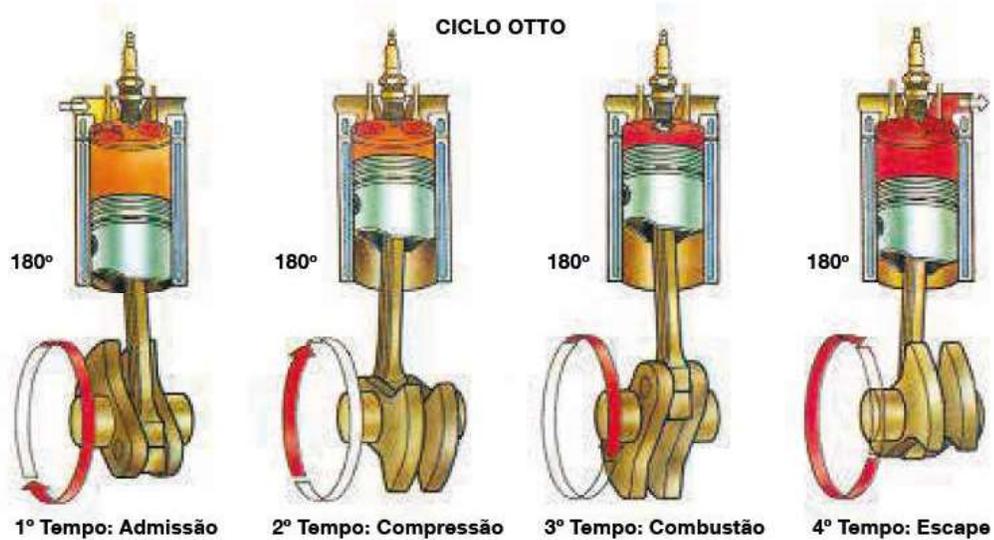


Figura 26 - Motor Otto 4 tempos (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 19)

Nos motores a diesel há somente a admissão de ar puro, que quando comprimido pelo pistão se aquece e inflama o óleo diesel pulverizado no interior da câmara de combustão.

CICLO DIESEL

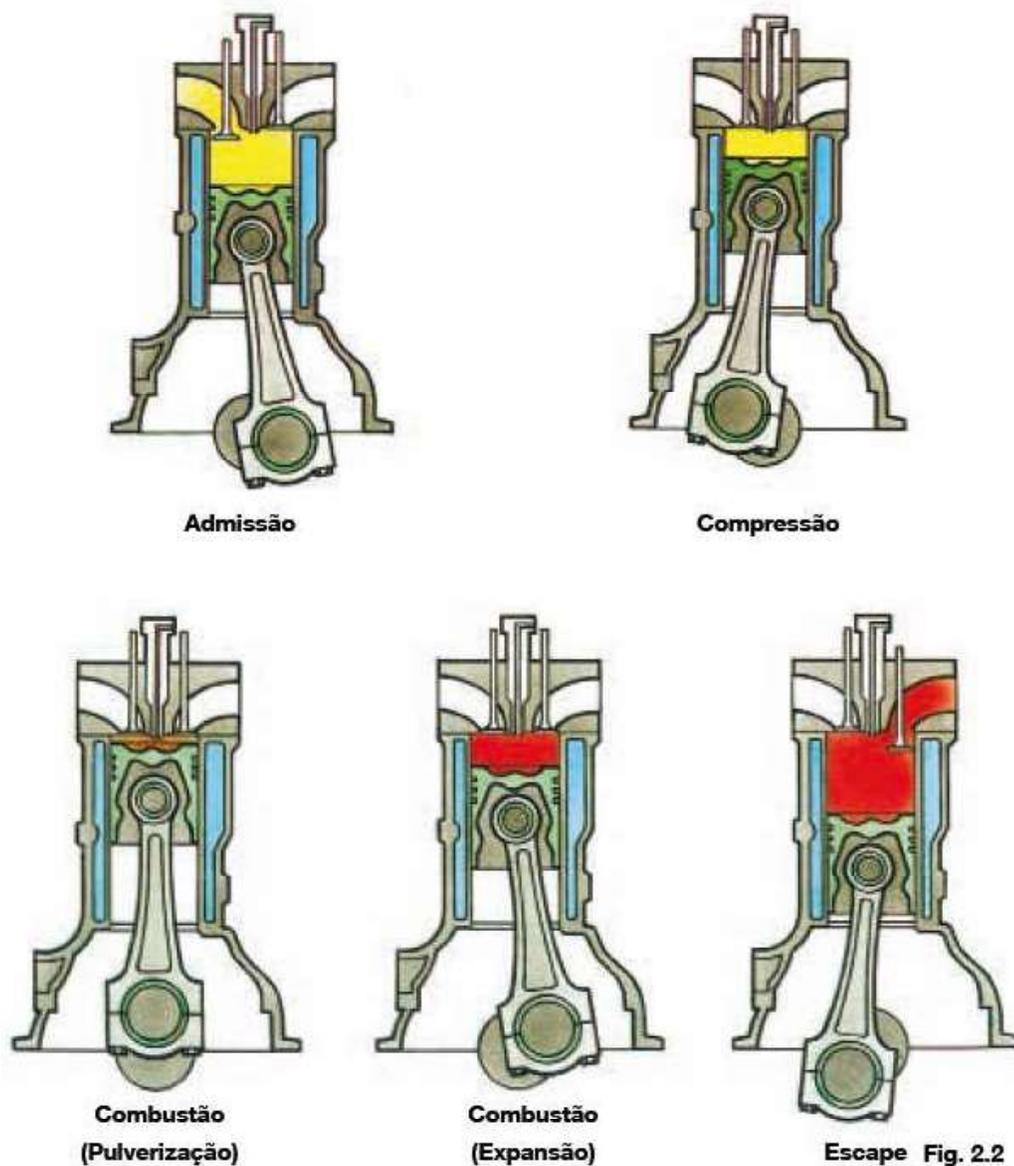


Figura 27 - Motor Diesel 2T (Apostila Mahle – Motores de combustão interna, p. 21)

No ambiente marítimo, os motores 4 tempos são comumente utilizados em conjunto com grupos geradores, sendo o motor a Diesel a força motriz a girar o eixo rotor do gerador, gerando assim a energia elétrica. Esses motores são denominados MCA (Motor de combustão auxiliar), e apesar de serem menores que os MCP's, ainda sim são motores de grande porte, como o exemplo da figura 28, com um alto nível de emissões e consumo de combustível.



Figura 28 - Gerador G3516 2000 kVA Caterpillar, com motor Diesel 4T (Fonte: cat.com)

3. IMO FASE III – REQUISITOS DE EMISSÕES DE ENXOFRE

Criada pela convenção da MARPOL, a IMO vem trabalhando para reduzir os impactos nocivos do transporte marítimo sobre o meio ambiente desde a década de 1960. O Anexo VI da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (Convenção MARPOL) foi adotado em 1997 para combater a poluição do ar proveniente dos navios.

A IMO é formada por 174 estados membros, que se reúnem para discutir as regras de navegação marítima internacional e territorial também. Os regulamentos para a Prevenção da Poluição do Ar por Navios (Anexo VI) procuram controlar as emissões atmosféricas dos navios, que são: óxidos de enxofre (SOx), óxidos de nitrogênio (NOx), substâncias destruidoras de ozônio (ODS), compostos orgânicos voláteis (VOC) e incineração a bordo. Além disso visa mitigar a sua contribuição para a poluição atmosférica local e global, questões de saúde humana e problemas ambientais.

Até 31 de dezembro de 2019, para os navios que operavam fora das Áreas de Controle de Emissões, o limite para o teor de enxofre do óleo combustível dos navios era de 3,50% m / m (massa por massa). O limite de 0,1% m / m passou a ser aplicado a partir de 1 de janeiro de 2020 para as ECA's (Zonas de Emissão Controlada), e 0,5% para as demais regiões. Segue esquema abaixo mostrando a distribuição das zonas e respectivos limites de emissões

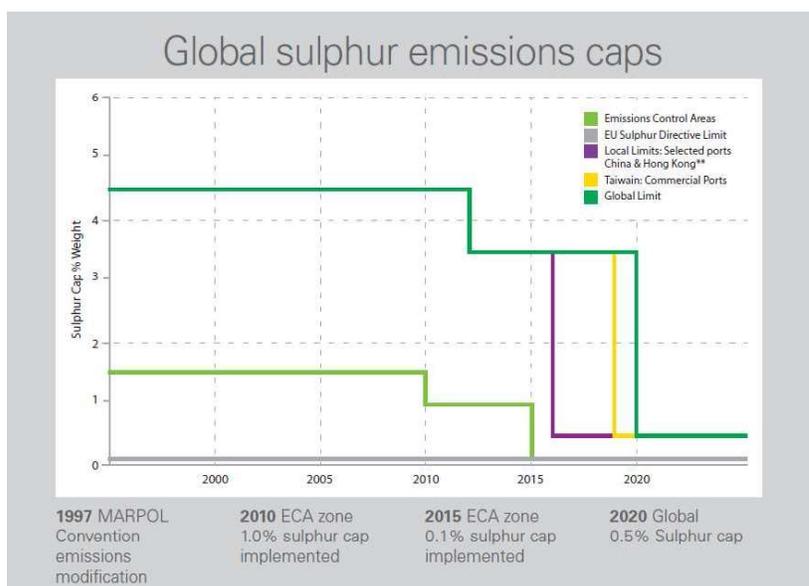


Figura 29 - Limites de emissões de enxofre (Fonte: BP marketing material: MARPOL 2020)

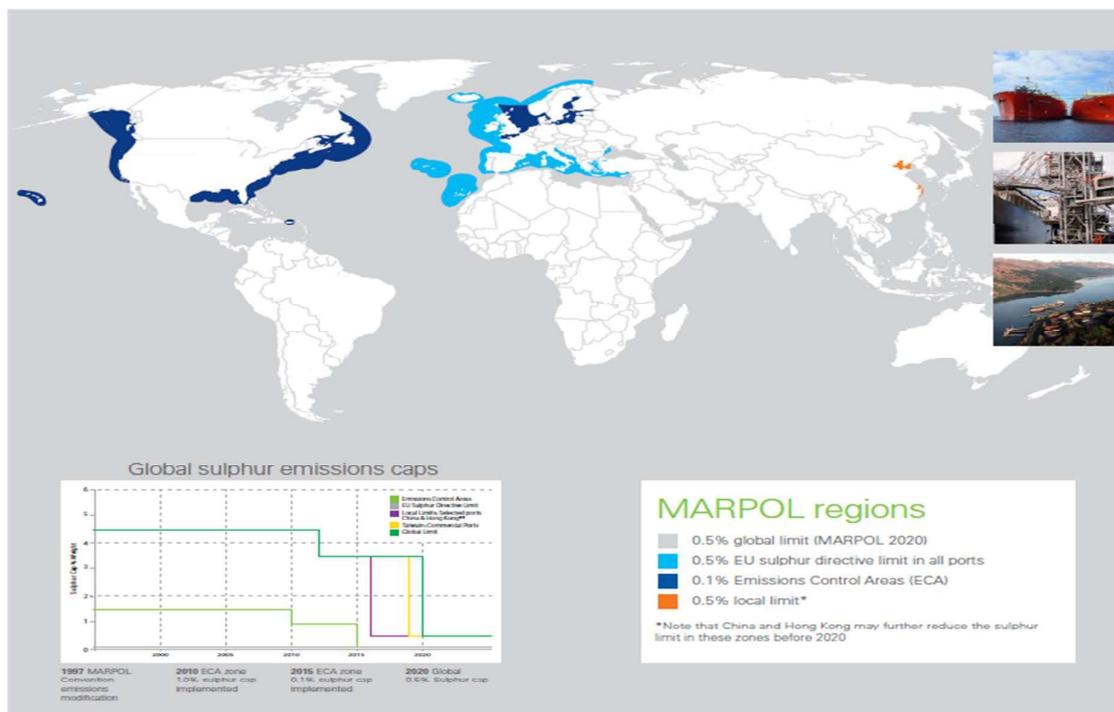


Figura 30 - Regiões MARPOL (Fonte: BP marketing material: MARPOL 2020)

O setor de transporte marítimo é responsável por mais de 80% do transporte do comércio mundial, sendo assim, o setor de transporte marítimo é uma indústria que precisa de regulamentações para um funcionamento efetivo. A IMO em seus diversos anexos é a responsável por garantir a regulamentação do setor de transporte marítimo, criando normativas que tratam desde a construção de navios, equipamentos, tripulação, operações e o descarte dos mesmos. Todo esse esforço faz parte do conjunto de ações que visam o desenvolvimento sustentável, de forma a cumprir a agenda 2030 da ONU, sendo a IMO o braço da ONU no setor marítimo.

Apesar dos apertados requisitos para emissões, a nova determinação da IMO não atinge navios que utilizam o sistema de *scrubbers* fechado, que é um sistema que faz a lavagem dos gases de escape dos motores auxiliares (MCA) e motores principais (MCP), removendo assim o dióxido de enxofre (SO₂).

A necessidade de um combustível com menor concentração de dióxido de enxofre leva a um combustível com uma maior mistura de diesel, o que acaba por encarecer o preço dos combustíveis. O grande problema disso que o maior e mais expressivo custo dos armadores, agentes de carga e empresas que operam navios, é justamente o combustível, sendo assim, essa nova exigência levou a um aumento geral no valor dos serviços e dos fretes marítimos internacionais.

3.1 Demais poluentes e suas regulamentações

Além da regulamentação para controle de emissões de enxofre, a IMO dispõe de outros mecanismos para controle de diversos agentes poluentes, como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis não metano (NMVOC) e particulados.

Essas substâncias provenientes da combustão como (NO_x, CO_x, HC e PM) também apresentam efeitos nocivos principalmente pulmonares e cardiovasculares (LISS e colab., 1997), contudo, estes efeitos não se limitam somente aos humanos mas também aos oceanos e rios, esses últimos, principais fontes de água de potável (HOPKINS e colab., 2010). Diante dos riscos que essas substâncias oferecem à saúde, a IMO vem implementando regras para mitigar a emissão de poluentes. A criação de Zonas de Emissão Controlada são uma evidência de que medidas plausíveis vêm sendo tomadas, e até mesmo apresentando bons resultados (KOŁWZAN e NAREWSKI, 2012; LLOYD'S REGISTER, [S.d.]; NIKOPOULOU e colab., 2012).

Uma das ferramentas estabelecidas pela IMO para mitigar as emissões é o EEDI (*Energy Efficiency Design Index*), que tem como foco a diminuição das emissões de CO₂. O EEDI para novos navios é uma medida técnica muito importante e visa promover o uso de equipamentos e motores com maior eficiência energética (menos poluentes). O EEDI exige um nível mínimo de eficiência energética por milha e capacidade para diferentes segmentos de tipo e tamanho de navio. Desde 1 de janeiro de 2013, o novo projeto de navio precisa atender ao nível de referência para seu tipo. O nível deve ser aumentado gradualmente a cada cinco anos, e assim o EEDI deve estimular a inovação contínua e o desenvolvimento técnico de todos os componentes que influenciam a eficiência de combustível de um navio desde a sua fase de projeto. O EEDI é um mecanismo não prescritivo, baseado em desempenho, que deixa a cargo da indústria a escolha de tecnologias para usar em um projeto de navio específico. Enquanto o nível de eficiência energética exigido for atingido, os projetistas e construtores de navios estão livres para usar as soluções mais eficientes em termos de custo para o navio cumprir as normas. O EEDI fornece um número específico para um projeto de navio individual, expresso em gramas de dióxido de carbono (CO₂) por

milha de capacidade do navio (quanto menor o EEDI, mais eficiente o projeto de energia) e é calculado por uma fórmula baseada nos parâmetros técnicos do projeto, para um determinado navio.

Armadores, projetistas e construtores devem atender critérios cada vez mais rígidos de acordo com o ano de construção do navio, a partir de uma linha de referência que representa a eficiência média para navios construídos entre 1999 e 2009 e com limites mínimos de redução de emissão de CO₂, divididos em três fases, de 10% para embarcações construídas entre 2015 e 2020; 20% para embarcações construídas entre 2020 e 2025, e de 30% para embarcações construídas de 2025 em diante.

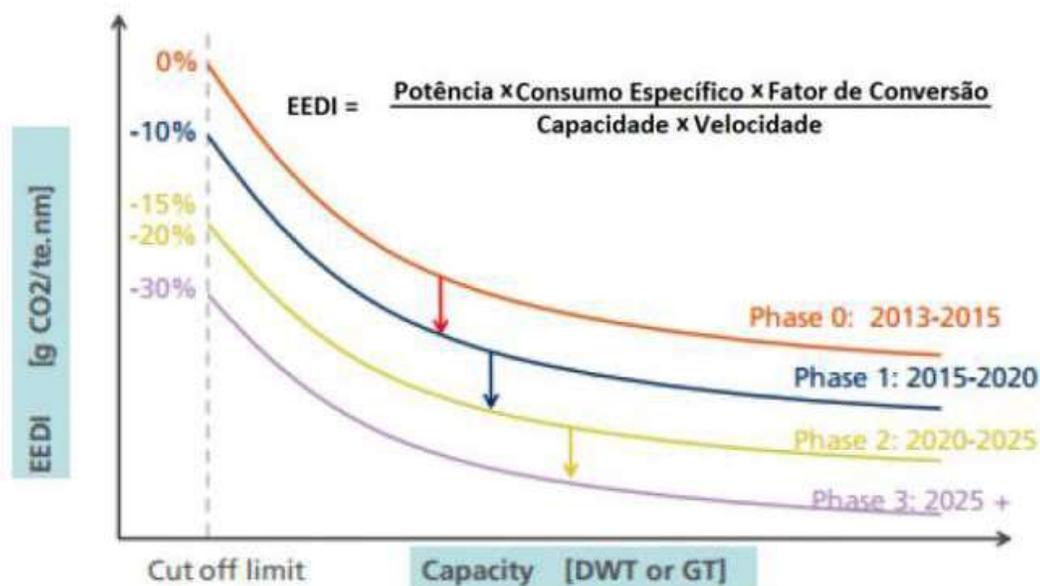


Figura 31 - Regra para a redução de emissão de CO₂ para novos projetos de navio (IMO, 2016)

O gráfico acima, da figura 31, mostra as curvas de meta de redução de emissão de CO₂ de acordo com a capacidade do navio, dividida em fases, sendo a fase mais estrita exigindo uma redução de até 30% nos níveis de emissão de CO₂ em relação aos níveis de referência da fase 0 para cada navio de acordo com sua categoria e capacidade. O índice é mandatório para navios de porte superior a 400 GRT (tonelada bruta) e considera a emissão de CO₂ de todas as máquinas e equipamentos para a condição de operação de projeto, com valores-bases específicos dependendo do tipo, porte e velocidade do navio.

Deve-se ressaltar, entretanto que a formulação associada ao índice representa perfis operacionais usuais de embarcações comerciais, e, portanto, a IMO discute a

possibilidade de formulações específicas para embarcações com perfis operacionais distintos, como é o caso, por exemplo, de embarcações de operação offshore que (como os PLSV's), diferentemente das classes de navios mercantes, utilizam grande parte da energia no posicionamento dinâmico, durante operações em plataformas de produção de óleo e gás.

Além do CO₂, vale a pena destacar os efeitos do Oxido de Nitrogênio na atmosfera e meio ambiente. O problema ambiental provocado pela emissão de NO_x e de SO_x é a chuva ácida. A sua formação está associada a temperatura de combustão no interior dos cilindros, sendo que quanto maior a temperatura, maior a emissão.

Os limites de emissão de óxidos de nitrogênio são aplicados a todas as embarcações que realizem viagens internacionais e com motor diesel marítimo com potência de saída superior a 130 kw. A norma é aplicada em 3 categorias distintas, dependendo do ano de construção e da região de operação da embarcação.

Para os diferentes tipos emissões, existem dentro da estrutura de normas da IMO diferentes regulamentações, com seus períodos de implementação e medidas de mitigação próprias.

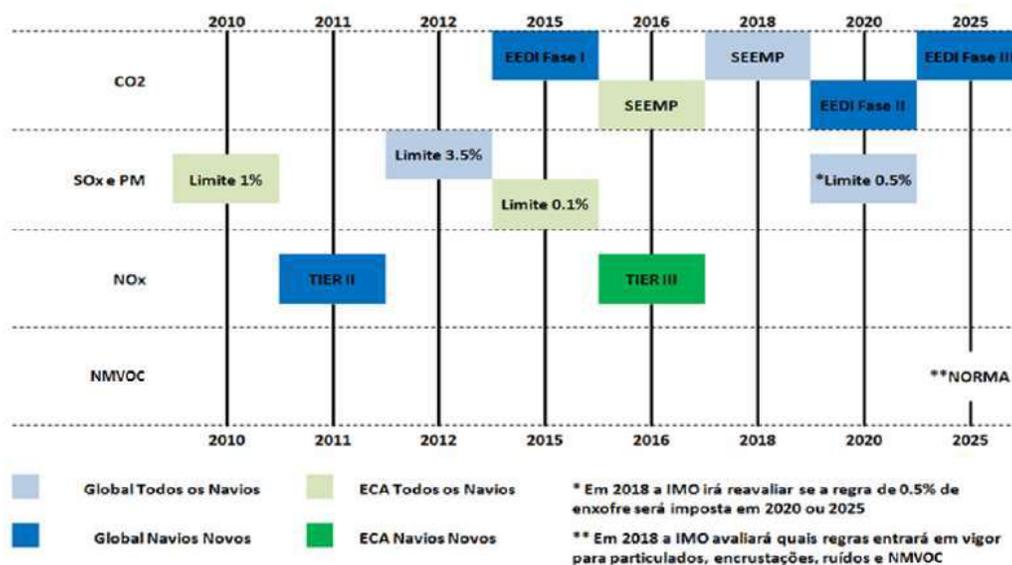


Figura 32 - Linha do tempo com principais tendências de normas ambientais (Fonte: BP marketing material)

A figura acima ilustra as medidas ou normas adotadas para o controle de emissões de cada poluente citado. Para o CO₂, as medidas adotadas foram o índice de eficiência energética (EEDI), e um sistema de gerenciamento de embarcações que

utiliza o EEDI como indicador, que é o SEEMP (*Ship Energy Efficiency Management Plan*). Já para o enxofre, foi criado o anexo VI da IMO que regulamenta em porcentagem o nível de emissões de enxofre por motor, e para o NOx é utilizado o termo TIER, que tem por significado a palavra nível.

É comum ver motores diesel de aplicação marítima sendo comercializados utilizando a norma TIER como indicativo de atendimento ao requisito ambiental. Por exemplo, motores diesel que são TIER III costumam ter um sistema de EGR (Recirculação do gás de exaustão), proporcionando uma melhor queima dos produtos dos gases de escape ao fazê-lo retornar para a admissão para ser queimado novamente. Também vemos motores com a solução TIER IV, que utilizam além do EGR, um sistema de pós-tratamento com ARLA 32, que associado ao catalisador na exaustão, converte o oxido de nitrogênio (NOx) em nitrogênio e vapor de água, gases não nocivos presentes na atmosfera.

4. IMPACTO DO USO DOS COMBUSTÍVEIS VLSFO (VERY LOW SULPHUR FUEL OIL) E ULSFO (ULTRA LOW SULPHUR FUEL OIL)

Para armadores e empresas donas de frotas de navios, o combustível sempre representou um dos custos mais altos da operação. Uma grande quantidade de combustível é consumida todo ano por navios de carga e navios comerciais ao redor do mundo, assim como por navios militares e de operações do setor de óleo e gás.

Antes das atualizações do anexo VI da IMO, o mercado tinha mais opções de combustíveis para consumir, podendo fazer escolhas baseadas no melhor custo-benefício, ou até mesmo somente baseada no custo. Algumas das opções do mercado marítimo são: o MGO (Marine Gas Oil), o MDO (Marine Diesel Oil) e o em desuso devido às normas de emissão, HFO (Heavy Fuel Oil). O MGO e MDO são destilados e mistura de destilados com residuais respectivamente, do processo de refinaria com viscosidade muito menor e menor teor de enxofre. Já o HFO Consiste principalmente em fluxos residuais de refinaria das unidades de destilação ou de craqueamento. O tipo de HFO é definido principalmente pela qualidade do petróleo e pelo processo de refinaria. O petróleo bruto com alto teor de enxofre resultará em um HFO com alto teor de enxofre.

Os preços do bunker flutuam constantemente devido às forças do mercado e ao custo do petróleo bruto. O mercado de bunker é extremamente sensível ao preço, com os navios frequentemente tomando decisões sobre onde adquirir o bunker com base no preço relativo do combustível disponível nos respectivos portos. As decisões de abastecimento são impactadas por prêmios de preços relativos que surgem como resultado de diferentes políticas fiscais entre países e regiões, especialmente em termos de impostos sobre combustíveis (Theo E. Notteboom e Bert Vernimmen, 2008). Porém os altos custos do combustível para as companhias marítimas não são

a única fonte de preocupação. As emissões de enxofre do transporte marítimo são as maiores causadoras de chuva ácida, que impactam as florestas, o solo e os lagos. Partículas de sulfatos também podem criar problemas de saúde em áreas densamente povoadas. Nesse sentido se faz importante o controle de emissões de enxofre das embarcações, principalmente nos portos, perto de grandes cidades, que em sua grande maioria já se tornaram zonas de emissão controlada (ECA – *Emission Controlled Area*).

A preocupação ambiental tem gerado normas cada vez mais restritas para todas as regiões do globo, o que tem causado uma mudança gradual e crescente no mercado de combustíveis do setor marítimo, fazendo a paisagem atual dos combustíveis mudar de forma cada vez mais definitiva para soluções menos danosas para o meio ambiente. De forma prática, as normas acarretaram a mudança da utilização do HFO (*Heavy Fuel Oil*) para o VLSFO (*Very Low Sulphur Fuel Oil*) nos mares internacionais e ULSFO (*Ultra Low Sulphur Fuel Oil*) nas ECA's (*Emission Controlled Zones*). Porém essas mudanças são significativas e têm implicações financeiras e operacionais consideráveis para as indústrias de refino de petróleo e marítima, pois combustíveis com menos enxofre exigem um processo de refino mais elaborado, o que encarece o preço do combustível, e a partir do momento que a utilização desse combustível se torna obrigatória, ocorre um aumento nos custos de operação, visto que o gasto com combustível é o maior custo operacional de agentes de carga e navios de operação marítima.

O impacto dessa troca de combustíveis não afeta somente o mercado marítimo, mas todos os setores da indústria que têm interface, ou que dependa dele, assim como indústrias que recebem insumos via mercado marítimo. Abaixo estão relacionados alguns setores e o impacto em cada um deles de acordo com pesquisas da Goldman Sachs (*The IMO 2020: Global Shipping's Blue Sky Moment*, 2018):

Refinarias

As alterações na especificação do combustível para o mercado marítimo, se implementadas, poderiam aumentar a demanda nas refinarias, impulsionando ainda mais a demanda por diesel em 2020, a qual seriam influenciadas pelos seguintes fatores:

1- Um aumento no volume refinado global de combustível devido a substituição total pelo combustível compliance

2- Um aumento do preço do combustível nas refinarias devido ao processo mais elaborado de refino

Em um cenário full compliance, todo o HFSO excedente não pode ser queimado nas refinarias, levando a uma queda do preço do HFSO restante, atingindo a paridade com o preço do carvão/gás, criando uma nova demanda nas plantas de energia. Como a indústria nessa nova fase, estará em uma onda “against sulphur”,

pesquisas da Goldman Sachs sugerem que o desconto de óleos pesados para a confecção de petróleo leve pode aumentar em cerca de US \$ 5 / barril em 2020.

Companhias de navegação

É mais provável que as companhias de navegação optem por uma troca de combustível (combustível com alto teor de enxofre para óleo diesel marítimo) em vez de soluções que impliquem em alto CAPEX (depuradores, LNG, etc) para atender aos regulamentos da IMO 2020. No geral, enquanto uma mudança de combustível resultaria em uma inflação de custos operacionais relativamente alta (c.6%), acredita-se ser mais fácil repassar esse custo ao cliente, sob o pretexto de custos mais altos de operação.

Scrubbers

Os *scrubbers* são sistemas de pós-tratamento de gases de escape de motores de combustão marítimos, onde ocorre a lavagem dos gases e remoção de poluentes e partículas pesadas, as quais ficam retidas na água/fluido de lavagem. Cerca de 5000 navios podem instalar scrubbers como solução para as emissões até 2025, o que representa um conjunto de receita em torno de 15 bilhões. Estima-se que o período de payback das instalações de scrubbers seja algo em torno de 4 anos, dependendo do custo do combustível 100% compliance. Espera-se que as instalações de scrubbers alavanquem a partir de 2020.

Indústria Química

A demanda de hidrogênio nas refinarias tem aumentado com a crescente necessidade de remover o enxofre dos produtos da refinaria e aumentar a produção de diesel. No processo denominado Hidrodessulfurização os compostos de enxofre são hidrogenados para formar sulfureto de hidrogenio (H₂S), assim removendo enxofre da mistura, e destinando o H₂S para alimentar outros processos dentro das refinarias.

Notou-se nos EUA que o aumento na demanda foi atendido exclusivamente por fornecedores de hidrogênio como a Air Products (APD) e a Praxair (PX). Dada a necessidade de uma maior produção de diesel, uma vez que a regulação do teto de enxofre da IMO entra em ação, espera-se um maior impulso para a demanda de hidrogênio em 2020.

Metais e Mineração

Como indicado pela curva de tendência atual, espera-se que as regulamentações da IMO 2020 sejam inflacionárias para as commodities devido ao aumento do frete marítimo (minério de ferro, carvão metalúrgico, carvão térmico) e maior custo de insumo para coques de grau anódico com baixo teor de enxofre. Como tal, o impacto dependerá da demanda fundamental que, em última instância, impulsionará a capacidade de repassar o custo aos consumidores. Com mercados de metais e alumínio equilibrados, esperamos que o custo maior seja repassado, levando

a um aumento de 5% nos preços. Para o minério de ferro, esperamos uma inflação de preços CIF de 6-7%, devido ao frete mais caro.

Os setores citados acima são somente alguns utilizados como exemplo, dentre muitos outros que são afetados por flutuações de preços nos combustíveis utilizados no setor marítimo. Diante desse novo cenário, os armadores e empresas donas de frotas de navios tem de pesquisar e escolher as soluções que melhor se adequam ao seu negócio. Abaixo estão listadas as principais soluções ou tendências que vêm sendo estudadas/observadas em um primeiro momento, de acordo com a Goldman Sachs (The IMO 2020: Global Shipping's Blue Sky Moment, 2018) para atender a norma da IMO anexo VI, visando uma relação de custo-benefício, ou seja, custo de operação (OPEX) versus custo de projeto (CAPEX):

Usar combustível em conformidade

Os navios podem mudar para combustíveis com baixo teor de enxofre, como o MGO (diesel) ou o LSFO (óleo combustível com baixo teor de enxofre). Um *blend* de combustíveis que venha a atender ao limite de enxofre da IMO também seria uma opção. Essa opção não exigiria dispêndio inicial de capital, mas resultaria em maior custo de combustível. De acordo com o artigo "*MARPOL 2020 and beyond*", da BP Energy, o MGO foi o combustível de escolha pelos armadores, dado que já estão familiarizados com o combustível. Os armadores também indicaram que ficariam confortáveis com o uso do LSFO. No entanto, houve relutância em usar combustível misturado, já que misturas de boa qualidade poderiam ser difíceis de obter em todos os portos e poderia conduzir a um perfil de emissão imprevisível, além do possível problema de instabilidade físico-química causada pela mistura dos combustíveis.

Instalação de *Scrubbers*

Empresas e proprietários de navios que escolherem investir na solução dos scrubbers, podem continuar a queimar HSFO, que será mais barato, em comparação com o combustível em conformidade com a norma em 2020. O período de retorno da instalação do scrubber até 2020 era em torno de 4 anos, o que não era suficientemente atraente. As projeções eram que de 2020 em diante a instalação de scrubbers fosse retomada, já que o período de retorno pode cair para 2 anos com base na atual curva diesel-HSFO (projeção pré 2020).

LNG (Gás Natural Liquefeito)

Navios movidos a LNG estão em conformidade com os regulamentos da IMO 2020. Contudo a adaptação é muito dispendiosa, com períodos de retorno muito pouco atrativos, sendo assim, somente as novas construções têm maior probabilidade de escolher o LNG. Dada a falta de infraestruturas de abastecimento e elevado custo inicial de capital (CAPEX), o LNG como combustível para navios parece ser um fator menos significativo como alternativa de combustível a médio prazo

Não atendimento (Non compliance)

A IMO fornece um sistema em que os navios podem solicitar isenções em uma situação em que o combustível compatível não esteja disponível. Em tal situação, os navios teriam que apresentar um registro das ações tomadas para tentar alcançar a conformidade. Espera-se que algumas empresas não consigam cumprir integralmente o regulamento nos primeiros anos.

5. IMPACTO DOS COMBUSTÍVEIS VLSF NOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

A mudança no cenário de combustíveis de uso marítimo impulsionada pelas atualizações das normas ambientais não gerou mudanças somente no teor de substâncias poluidoras, como o enxofre, mas também nas propriedades químicas e físicas dos combustíveis, alterando a composição e propriedades físico-químicas dos combustíveis.

Com a mudança das propriedades físico-químicas dos combustíveis utilizados no ambiente marítimo, uma série de problemas técnicos começaram a ser reportados pelas empresas e armadores proprietários de embarcações que passaram a utilizar esses combustíveis. Através do monitoramento realizado pelo sistema de manutenção preventiva e corretiva dessas companhias, esses principais problemas técnicos foram levantados, e concatenados em diversas pesquisas de mercado. Uma delas foi uma pesquisa realizada pela BIMCO, em parceria com a INTERCARGO e INTERTANKO, denominada de “2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey”. Abaixo cada um dos questionamentos com suas respectivas respostas, e observações gerais em seguida:

Questão 1 - Normas usadas para as especificações do último óleo combustível em conformidade com o padrão de emissões comprado e entregue a um de seus navios

ISO 8217:2010	81 respostas	42% de 192 respostas
ISO 8217:2017	49 respostas	25% de 192 respostas
ISO 8217:2005	35 respostas	18% de 192 respostas

Tabela 1 - três respostas mais comuns (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)

Alem das respostas citadas na Tabela 1, foi observado que 3 entrevistados disseram que a norma usada para a especificação do bunker depende do contrato de afretamento.

Em adição, 3 entrevistados disseram que a disponibilidade dos combustíveis varia de acordo com a região geográfica.

Questão 2 – A análise do combustível indicou conteúdo de substâncias fora das especificações da IMO

55% dos entrevistados responderam “sim” se algum dos resultados da análise de óleo combustível indicou fora das especificações (fora das especificações).

45% dos entrevistados responderam “não” se algum dos resultados da análise de óleo combustível indicou fora das especificações (fora de especificação).

Sulphur	56 respostas
Total sediment	54 respostas
Aluminium plus silicon	27 respostas
Pour point	26 respostas
Ash	16 respostas
Flash point	15 respostas
Acid number	15 respostas
Viscosity	13 respostas

Tabela 2 - As 8 características fora de especificação mais citadas (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)

Os dados apresentados aqui significam simplesmente que, com base nos navios, pelos quais os entrevistados são responsáveis, 56 entrevistados perceberam que um ou mais resultados de análise de óleo combustível indicaram que o teor de enxofre pode não estar em conformidade.

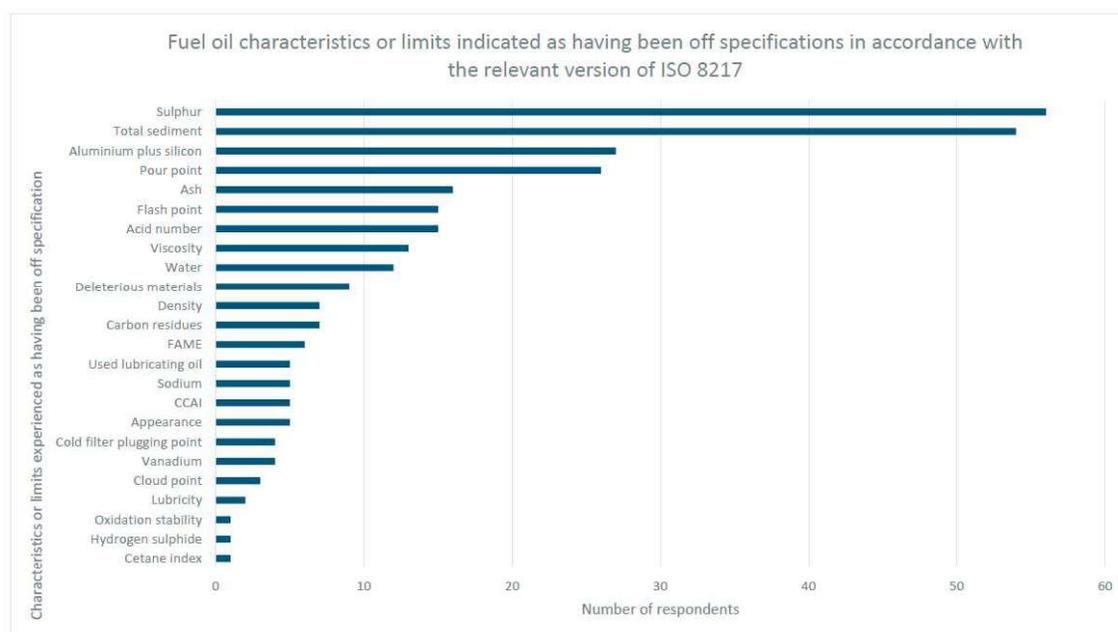


Figura 33 - Características ou limites do óleo combustível indicados como fora das especificações de acordo com a versão relevante da ISO 8217 (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)

Questão 3 – Ponto de ignição

10% dos entrevistados responderam “sim” se algum dos resultados da análise do óleo combustível indicou uma temperatura de ponto de ignição abaixo de 60°C.

88% dos entrevistados responderam “não” se algum dos resultados da análise de óleo combustível indicou uma temperatura de ponto de ignição abaixo de 60°C.

2% dos entrevistados responderam que não sabiam se algum dos resultados da análise do óleo combustível havia indicado uma temperatura de ponto de ignição abaixo de 60°C.

15 entrevistados selecionaram 'ponto de ignição' como uma das características ou limites que estavam fora das especificações na questão número dois (Q2). Os mesmos 15 entrevistados também responderam 'sim' à pergunta (Q3) se algum dos resultados da análise de óleo combustível indicou uma temperatura de ponto de fulgor abaixo de 60°C. No entanto, um total de 20 entrevistados respondeu 'sim' à pergunta (Q3) se algum dos resultados da análise de óleo combustível indicou uma temperatura de ponto de fulgor abaixo de 60°C.

Questão 4 e 5 – Depósito e descarga de lodo

Q4 – Você observou depósitos de lodo aumentados nos tanques de óleo combustível e/ou entupimento de tubos de combustível, separadores, pré-aquecedores, filtros de sucção da bomba de transferência de óleo combustível, etc?

53% dos entrevistados responderam “sim” à observação de aumento de depósitos de lodo nos tanques de óleo combustível e/ou entupimento de tubulações de combustível, separadores, pré-aquecedores, filtros de sucção da bomba de transferência de óleo combustível etc.

47% dos entrevistados responderam “não” à observação de aumento de depósitos de lodo nos tanques de óleo combustível e/ou entupimento de tubulações de combustível, separadores, pré-aquecedores, filtros de sucção da bomba de transferência de óleo combustível etc.

Q5 – Você experimentou um aumento na descarga de lodo dos separadores do navio?

55% dos entrevistados responderam “sim” ao aumento da descarga de lodo dos separadores do navio.

45% dos entrevistados responderam “não” ao aumento da descarga de lodo dos separadores do navio.

Q4	Q5	Contagem	Frequencia(%)
Yes	Yes	88	45.8
Yes	No	14	7.3
No	Yes	18	9.4
No	No	72	37.5
Total		192	100

Tabela 3 - Distribuição de frequência de respostas relacionadas a depósitos e descargas de lodo (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)

De acordo com a tabela 3 podemos observar que a porcentagem de pessoas que responderam sim para depósitos de lodo nos componentes de fluxo de combustível e na descarga é de 45,8%, maior que a parte que respondeu não para ambas as perguntas.

Questão 6 – Danos na bomba de combustível

18% dos entrevistados responderam “sim” ao experimentarem danos nas bombas de óleo combustível.

82% dos entrevistados responderam “não” para experimentarem danos nas bombas de óleo combustível.

Questão 7 - Problemas com injeção de combustível, má ignição ou combustão incompleta

21% dos entrevistados responderam “sim” para problemas com injeção de combustível, má ignição ou combustão incompleta do combustível.

79% dos entrevistados responderam “não” a problemas com injeção de combustível, má ignição ou combustão incompleta do combustível.

Questão 8 – Aparição ou formação de parafina

32% dos entrevistados responderam “sim” ao experimentar a aparição de parafina no sistema de óleo combustível, como por exemplo em tanques de óleo combustível, filtros etc.

68% dos entrevistados responderam “não” ao aparecimento de parafina no sistema de óleo combustível, como por exemplo em tanques de óleo combustível, filtros etc.

Questão 9 – Corrosão e desgaste devido a presença de finos catalíticos

31% dos entrevistados responderam “sim” a problemas operacionais causados pelo aumento do desgaste das camisas de cilindro, anéis de pistão ou outros componentes, avaliados como devido ao aumento da quantidade de finos catalíticos (cat fines) no óleo combustível.

57% dos entrevistados responderam “não” a problemas operacionais causados pelo aumento do desgaste das camisas de cilindro, anéis de pistão ou outros componentes, avaliados como devido ao aumento da quantidade de finos catalíticos (cat fines) no óleo combustível.

12% dos entrevistados responderam “não sei” para problemas operacionais causados pelo aumento do desgaste das camisas dos cilindros, anéis de pistão ou outros componentes, avaliados como devido ao aumento da quantidade de finos catalíticos (cat fines) no combustível óleo.

Questão 10 – Perda de propulsão e/ou blackout (apagão)

10% dos entrevistados responderam “sim” à perda de propulsão e/ou apagão como consequência das propriedades do óleo combustível.

89% dos entrevistados responderam “não” à perda de propulsão e/ou apagão como consequência das propriedades do óleo combustível.

1% dos inquiridos respondeu “não sei” à perda de propulsão e/ou apagão como consequência das propriedades do óleo combustível.

Questão 11 – Escassez de oferta

22% dos entrevistados responderam “sim” a escassez do óleo combustível como consequência das propriedades requeridas do óleo combustível.

77% dos entrevistados responderam “não” a escassez do óleo combustível como consequência das propriedades requeridas do óleo combustível.

1% dos entrevistados respondeu “não sei” ao óleo combustível sem oferta no mercado como consequência das propriedades requeridas do óleo combustível.

Questão 12 - Descrições de quaisquer outros problemas enfrentados por seus navios causados pelas propriedades do óleo combustível desde a mudança para óleo combustível compatível com a IMO 2020 e quaisquer ações de mitigação tomadas

Foram recebidos 124 comentários sobre problemas enfrentados devido às propriedades do óleo combustível desde a mudança para óleo combustível compatível.

Problemas mais frequentes	Número de comentários
Aumento de lodo ou instabilidade no VLSFO	43
Nenhum problema ou apenas pequenos problemas foram experimentados	23
Maior desgaste levando a danos no motor, como anéis de pistão quebrados e/ou desgaste acelerado na camisa do cilindro	22
Alto ponto de fluidez como um problema para o gerenciamento de combustível a bordo	12
Baixo nível ou variação da viscosidade como um problema para o gerenciamento de combustível a bordo	12
Teor de enxofre indicado ou confirmado como não compatível com o limite de 0,50%	9
Aparecimento de cera/parafina	8
Danos ao equipamento no sistema de óleo combustível, como bombas de combustível ou separadores	6
Problemas de compatibilidade de combustíveis restringindo as operações do navio	6
Motores não performando em condições ótimas	5
Desempenho do sistema de combustível não ideal, como não ser capaz de manter a temperatura de entrada do purificador	5
Foi necessário esvaziar os tanques de combustível	4
Aquecimento insuficiente quando navegando em clima frio	4

Aumento da carga de trabalho para a tripulação	3
--	---

Tabela 4 - Problemas mais frequentes mencionados (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)

A pesquisa referenciada acima foi feita com o objetivo de levantar os impactos da mudança no cenário global de combustíveis para a parte mais impactada pela atualização da norma, os afretadores e donos de frotas de navios, que viram seus custos operacionais subirem de forma significativa com a implementação da nova norma, pois o aumento a exigência quanto ao limite de enxofre e outras substâncias gera uma necessidade de um processo mais acurado nas refinarias, que acaba por encarecer o preço do produto final, gerando assim um efeito cascata no aumento de preços de toda a cadeia de serviços no ambiente marítimo.

Abaixo, os dados dos entrevistados com a quantidade de barcos que têm sob sua gestão, e sua representação percentual no espaço amostral de entrevistados:

1 – 50 navios	106 participantes	55% de 192 respostas
51 – 100 navios	39 participantes	20% de 192 respostas
501 – 550 navios	16 participantes	8% de 192 respostas
101 – 150 navios	9 participantes	5% de 192 respostas
Mais que 700 navios	5 participantes	3% de 192 respostas
601 – 650 navios	4 participantes	2% de 192 respostas

Tabela 5 - Os seis maiores grupos de entrevistados com base no número de navios operados por sua empresa (Fonte: 2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey, BIMCO)

A pesquisa não levou em considerações alguns fatores que podem influenciar de forma direta as respostas recebidas, podendo até mesmo em alguns questionamentos justificar a divergência de respostas, como por exemplo o quão antigo é o motor no qual foi feita a mudança de combustível, quais foram os fornecedores de combustível, qual era o plano de manutenção preditiva de cada empresa, condições de armazenamento e filtragem dos combustíveis, condições de manutenção dos filtros de combustíveis, entre outros fatores que certamente influenciam no resultado de uma pesquisa como essa realizada pela BIMCO (*Baltic and International Maritime Council*).

Porém a pesquisa é muito útil para levantar os principais problemas relatados, dos quais alguns serão abordados neste presente trabalho. Muitos estudos e reports técnicos vêm sendo produzidos sobre as questões e problemas técnicos do uso dos novos combustíveis, e grande parte dos itens da pesquisa da BIMCO apresentada anteriormente estão sendo abordados nesses estudos. Alguns dos problemas que vêm sendo estudados são: Instabilidade, incompatibilidade de combustíveis (mistura nos tanques), temperatura e ponto de fulgor, lubricidade e desgaste abrasivo, contaminação microbiana e presença de finos catalíticos.

A discussão sobre os temas finos catalíticos, ponto de ignição e lubricidade serão tratados mais adiante, nos próximos capítulos deste presente trabalho. Todos esses assuntos vêm sendo estudados de forma exaustiva por empresas produtoras de combustíveis (refinarias), empresas de filtragem de óleos e combustíveis e por

empresas que são diretamente impactadas de forma financeira pelo assunto. Segue um resumo sobre alguns dos problemas citados anteriormente.

Instabilidade

Um combustível é considerado estável se tende a manter suas propriedades físicas ao longo do tempo. Combustíveis instáveis sofrem alterações a curto prazo que podem causar graves problemas operacionais. Em destilados instáveis, hidrocarbonetos insaturados se oxidam, produzindo resinas, gomas e vernizes. Em combustíveis residuais instáveis, asfaltenos e outras moléculas de hidrocarbonetos aromáticos, polares, tendem a se aglomerar, formando lodos grossos em tanques de armazenamento. Estas lamas são pegajosas e altamente viscosas. Um navio que usa combustíveis instáveis pode sofrer entupimento de filtros, separadores e tubulações. Se suas bombas de combustível ficarem sobrecarregadas, pode haver problemas de ignição e combustão e risco de danos permanentes aos pistões, anéis de pistão e camisas de cilindro. Casos extremos podem até parar os motores principais e auxiliares, apresentando um sério perigo para o navio e sua tripulação.

Incompatibilidade

Mesmo que dois ou mais combustíveis possam ser estáveis por si só, misturá-los pode produzir uma mistura instável. Isso é chamado de incompatibilidade. Por exemplo, a mistura de HFO e VLSFO provavelmente criará um óleo instável. Da mesma forma, ULSFOs podem ter problemas de compatibilidade com HFO, VLSFO e até mesmo outros ULSFOs. À medida que 2020 traz uma variedade de combustíveis mais ampla do que nunca para o mercado, podemos esperar que a incompatibilidade se torne um problema mais difundido e complexo para a indústria.

Importância de testar os combustíveis e limpar os tanques antes de uma transição

Pesquisas esperavam que os problemas de estabilidade e compatibilidade que temos experimentado desde a criação das zonas ECA se tornassem mais generalizados a partir de 2020. À medida que os fornecedores criam misturas para usar os estoques existentes no bunker ou à medida que os navios levam novos combustíveis em tanques com combustíveis remanescentes, os problemas de compatibilidade e instabilidade tendem a aumentar. (Marine fuels in the low-sulphur era, Alpha Laval).

Testes de estabilidade de novos combustíveis são absolutamente essenciais. Para isso, a ISO WG6 (ISO 8217) e a CIMAC WG7 estão atualmente trabalhando em métodos para entender melhor os problemas de estabilidade e compatibilidade. A parceria entre as refinarias e os laboratórios de testes também pode ajudar a garantir que os novos produtos sejam bem compreendidos para uma aplicação mais segura. Além disso, os operadores devem garantir que diferentes combustíveis sejam segregados a bordo e que seus tanques e linhas de tratamento de combustível sejam projetados para funcionar de forma independente, para mitigar os riscos de entupimento. Se a mistura de combustível for inevitável, testes de compatibilidade devem ser realizados primeiro. Testes simples a bordo são possíveis, mas testes laboratoriais aprofundados podem fornecer maiores níveis de garantia.

Como forma de melhor prática, os tanques devem ser limpos regularmente para diminuir a chance de formação de lodo quando em navegação. Da mesma forma, as equipes precisarão estar particularmente atentas a sinais de incompatibilidade ao trocar de um combustível para outro.

Outras considerações

As novas misturas de combustíveis no cenário compliance vão aumentar a complexidade em outros aspectos do manuseio e condicionamento nos tanques de combustível dos motores. De forma breve e resumida, seguem alguns desafios adicionais, os quais alguns serão detalhados nos capítulos a seguir:

Lubricidade - As tripulações precisarão estar cientes de quanta lubrificação cada combustível fornece e fazer os ajustes necessários nos óleos lubrificantes para proteger seus motores do desgaste abrasivo prematuro.

Finos catalíticos - A remoção de enxofre do combustível requer um processo de catálise, feito através de catalisadores que deixam para trás pequenas partículas duras que podem danificar motores e outros equipamentos se não forem efetivamente separadas do combustível. Além disso, combustíveis com baixo teor de enxofre podem ter níveis mais altos de finos catalíticos.

Temperatura - Combustíveis diferentes terão viscosidades e pontos de ignição diferentes. Portanto, as temperaturas de operação devem ser cuidadosamente gerenciadas para garantir um fluxo consistente de combustível sem causar cavitação nas bombas e em outros equipamentos para evitar o risco de incêndio.

6. PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DAS CAMISAS DOS CILINDROS E POSSÍVEIS ADAPTAÇÕES PARA O VLSF

Primeiramente, para entendermos melhor os efeitos dos combustíveis com baixo teor de enxofre nos motores de combustão interna, precisamos resgatar algumas características de operação dos combustíveis com alto teor de enxofre, denominados HFO (*Heavy Fuel Oil*).

O maior problema ambiental do transporte marítimo é o óleo combustível pesado (HFO) com alto teor de enxofre e utilizado popularmente nos motores diesel das embarcações. As embarcações mercantes consomem o combustível pesado para os motores de propulsão e motores de geração auxiliares para gerar a energia para a propulsão do navio e a eletricidade, respectivamente, a bordo. Elementos com propriedades indesejáveis como metais de transição incombustíveis, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e enxofre também existem no óleo combustível pesado que são óleos residuais do processo de refino de petróleo utilizados para produzir o *Marine diesel oil* (MDO), *Marine gas oil* (MGO) e outras misturas de óleos destilados. As propriedades indesejadas tornam o preço do HFO mais barato do que o óleo combustível destilado de melhor qualidade como MGO por exemplo. O preço mais barato do HFO era uma vantagem para os operadores de navios reduzirem os custos de combustível, considerando os custos incrementais de combustível se o motor

consumir produtos destilados de melhor qualidade. Era a principal razão pela qual o HFO era usado pela maioria dos navios oceânicos.

No entanto, o HFO acarreta vários inconvenientes na operação, como por exemplo, o óleo ser aquecido antes de ser injetado na câmara de combustão do motor com temperatura de aproximadamente 140°C devido à sua viscosidade. Além disso, é necessário se equipar com tanques de lodo para acomodar o lodo de HFO que não pôde ser queimado durante o processo de combustão do motor e deve ser movimentado e destinado em terra. Os métodos de tratamento desse lodo incluem a queima em um incinerador no navio ou a transferência para as instalações de recepção. No caso de queima desse lodo no navio, os gases liberados nesse processo seriam muito prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente.

Até recentemente, os motores marítimos de baixa velocidade e seus lubrificantes foram otimizados para operação com óleo combustível pesado (HFO) com alto teor de enxofre. Durante o processo de combustão, o enxofre S é convertido em trióxido de enxofre (SO₃). Em combinação com a água da combustão e o ar de exaustão, o SO₃ forma o ácido sulfúrico (H₂SO₄). Quando a temperatura do cilindro cai abaixo do ponto de orvalho do ácido sulfúrico e da água, um corrosivo se forma na parede do cilindro. Os lubrificantes altamente alcalinos (óleos com alto número base - BN) neutralizam o ácido e evitam a corrosão dos anéis do pistão e das superfícies das camisas dos cilindros.

Ao operar com combustíveis com menos de 0,10% de teor de enxofre, como destilados, óleo combustível ultrabaixo teor de enxofre (ULSFO) com menos de 0,10%, GNL, metanol, etano e GLP, apenas pequenas quantidades de ácido sulfúrico são formadas no Câmara de combustão. Os aditivos do óleo lubrificante do cilindro não são usados para a finalidade projetada e tendem a se acumular como depósitos. Esses depósitos podem perturbar o filme de óleo lubrificante e obstruir o movimento do anel do pistão, o que pode levar a microgripagem nos anéis do pistão e na camisa e aumentar o risco de arranhões. A formação de depósitos e a ausência total do filme de óleo que esses depósitos ocasionam aumentam o risco de polimento da camisa do cilindro, o que também pode levar a um maior desgaste para motores operando continuamente com combustíveis com menos de 0,10% S.

6.1 O problema da lubricidade nos VLSF e ULSF

Lubricidade é a capacidade que o óleo lubrificante tem de gerar um filme de lubrificação hidrodinâmica (cunha de óleo). Para garantir que um determinado combustível marítimo com baixo teor de enxofre não cause dano no motor por falta de lubricidade, o valor de lubricidade do óleo de lubrificação precisa fornecer o suficiente para proteger as partes móveis do motor.

Os combustíveis são testados sob o protocolo ISO 12156-1 (EN 590) *High Frequency Reciprocating Rig* (HFRR), ilustrado na figura 34. Este padrão exige uma taxa máxima de desgaste de 460 µm. No entanto, as refinarias adicionam um aditivo de lubricidade caso os requisitos da EN 590 não sejam cumpridos, em se tratando dos combustíveis usados antes da atualização da IMO 2020.

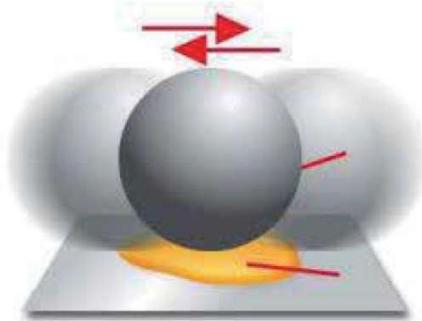


Figura 34 - teste HFRR (Fonte: Diesel and Gasoline Engines, Richard Viskup, p.121)

A redução da lubricidade em óleo combustível com baixo teor de enxofre pode ser arriscada para o sistema da bomba de combustível. Como resultado da baixa lubricidade, pode haver desgaste excessivo e falha prematura. Assim, um óleo lubrificante especial deve ser usado para adicionar lubricidade e evitar a deposição de carbono que é chamada de lacagem. A maior contribuição para o sistema de lubrificação do motor diesel vem das quantidades vestigiais de compostos polares tensoativos formando uma camada protetora na superfície do metal, aumentando assim a lubrificação limite. Os materiais polares mais ativos que ocorrem naturalmente no combustível diesel são os heterocompostos contendo nitrogênio e oxigênio. O processo de hidrodessulfurização (HDS) que remove o teor de enxofre também remove esses compostos polares, resultando em características de lubrificação muito fracas e expondo os sistemas de bombeamento a danos e falhas catastróficas potenciais. Essa é a principal razão pela qual a menor lubricidade do combustível pode ser vista como potencial para o desgaste abrasivo dos componentes do sistema de combustível.

Além disso, a Hidrodessulfurização (HDS) remove grande parte do conteúdo aromático, resultando em qualidade de ignição reduzida e também remove antioxidantes naturais que proporcionam estabilidade física e térmica do combustível. A ausência de antioxidantes naturais leva à formação de hiper peróxidos, que podem resultar em corrosão ácida dos sistemas de bomba de combustível e falha na vedação da bomba. Especialmente, a formação de hiper peróxido no óleo combustível ocorre rapidamente em alta temperatura e causa a influência negativa no sistema de óleo combustível. O processo de oxidação também produz gomas, polímeros e outros insolúveis. Já existem padrões e meio disponíveis para detectar contaminação por hiper peróxido.

A instabilidade inerente do combustível com baixo teor de enxofre apresenta quatro ameaças críticas à operação segura do motor marítimo: qualidade de ignição degradada ou reduzida, depósitos excessivos no motor, aumento nas emissões particulares visíveis e produção excessiva de lodo e incrustação no sistema de combustível. A estabilidade reduzida do combustível também pode resultar em

aumento das emissões. Combustíveis marítimos com baixo teor de enxofre geralmente produzem excesso de hidrocarbonetos não queimados e emissões de partículas visíveis (opacidade na fumaça). A baixa estabilidade pode resultar na formação de goma e lodo durante o armazenamento, bem como na formação de depósitos nos bicos de injeção e assentamento de válvulas. A baixa estabilidade física pode resultar em problemas com a compatibilidade do combustível, principalmente na transição da operação com combustível pesado para o combustível marítimo com baixo teor de enxofre. Uma vez que alguns gasóleos marítimos serão armazenados a bordo do navio por período de tempo prolongado, os combustíveis com características de baixa estabilidade sofrerão degradação acelerada, resultando em qualidade de ignição reduzida e operação degradada do motor.

A lubrificação adequada em uma bomba de combustível de êmbolo/barril marítimo depende de um equilíbrio entre a lubrificação hidrodinâmica (Figura 35) e a lubrificação de limite (Figura 36). A lubrificação hidrodinâmica ocorre quando duas superfícies estão em movimento entre si e são separadas por um filme líquido que suporta os esforços empregados. O resultado esperado é um baixo atrito e desgaste mínimo entre duas superfícies.

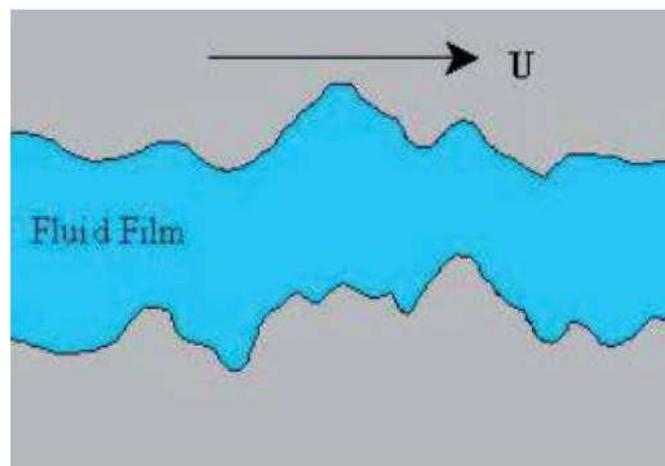


Figura 35 - Lubrificação Hidrodinâmica (Fonte: Diesel and Gasoline Engines, Richard Viskup)

Por outro lado, a lubrificação limite ocorre quando o filme líquido se torna fino o suficiente a ponto de atingir a mesma espessura que a rugosidade superficial dos pontos altos dos dois contatos da superfície sólida de interface. O combustível deve ter lubrificidade o suficiente para evitar maior atrito e desgaste. A lubrificação limite é crítica em três situações diferentes: no arranque inicial com filme líquido insuficiente, em operações de baixa velocidade quando não é bombeado combustível suficiente para fornecer um filme satisfatório e em operação de velocidade muito alta quando a alta pressão dentro da bomba diminui a espessura do filme.

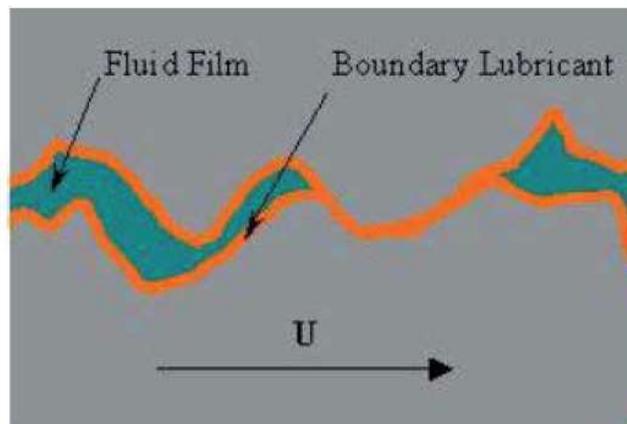


Figura 36 - Lubrificação Limite (Fonte: Diesel and Gasoline Engines, Richard Viskup)

Uma faixa de viscosidade de 12 a 16 centistokes é suficiente para fornecer lubrificação hidrodinâmica adequada. A viscosidade do MGO com baixo teor de enxofre varia de 1,5 a 3,0 cSt (VISKUP, Richard et al, 2020). Nesse caso, a película protetora de combustível entre as superfícies do cilindro e do pistão (corpo e anéis) torna-se perigosamente mais fina, resultando em um maior contato de metal com metal, mesmo que a viscosidade do combustível seja aumentada por meio de resfriamento.

Infelizmente a IMO somente regula os níveis de enxofre nos combustíveis, porém não emitiu nenhum parecer quando a demais especificações do mesmo. Um combustível com baixo teor de enxofre e uma lubrificidade satisfatória (entre 12 e 16 centistokes) necessitará de aditivos, que certamente tornarão os preços desses combustíveis mais caros. Porém nesse caso, a escolha mais inteligente visando a longevidade do motor e dos componentes de injeção, como bicos, bomba de transferência de combustível e conjunto cilindro-pistão, é um combustível com um bom índice de lubrificidade.

6.2 Vazão de óleo lubrificante

Muitas experiências tem sido feitas em motores em bancada de testes, tanto em motores mais novos quanto em tipos de motores mais antigos. Os motores Sulzer RTA mais modernos geralmente não tiveram tantos problemas quanto os antigos para funcionar com os novos combustíveis com baixo teor de enxofre. Para funcionar com sucesso com combustível com baixo teor de enxofre, precisamos encontrar o ajuste correto dos parâmetros operacionais. Isso inclui, por exemplo, garantir que o separador de água após o resfriador de ar de exaustão esteja funcionando de forma eficiente e usar um lubrificante de cilindro apropriado, na vazão correta.

A vazão do lubrificante é um fator crucial. Muitas vezes, é o único parâmetro que pode ser facilmente ajustado para dar uma resposta adequada ao teor de enxofre do combustível. Infelizmente, por razões históricas, há muita resistência à redução da

taxa de alimentação de lubrificante na operação do motor. Em casos de dúvida, a vazão geralmente é elevada e exatamente isso pode desencadear um desgaste severo repentino. Uma vazão muito alta causará instabilidade no conjunto de anéis do pistão e aumentará os depósitos no topo do pistão. Se estiver muito baixo, pode não haver óleo suficiente para formar um filme de óleo estável, o que pode levar altas taxas de desgaste do anel do pistão e da camisa do cilindro devido à corrosão, considerando nesse caso a operação de um motor 2 tempos, como os grandes motores de combustão principais, que são usados na propulsão dos navios, onde o combustível é misturado com o lubrificante e queimado na câmara de combustão.

Em uma camisa de cilindro em boas condições, com taxas de desgaste satisfatórias/aceitáveis e em alta carga operacional, “a vazão de lubrificante não deve ser superior a 1,2 g/kWh, e uma taxa de alimentação mais próxima de 1,0 g/kWh geralmente dará melhores resultados” (WELSH, Michael, 2002). O principal risco é o desgaste corrosivo, se a carga for reduzida por períodos mais longos.

A taxa de alimentação só deve ser reduzida após a investigação do estado de desgaste dos anéis e camisas. Se a condição parecer crítica, não deve haver redução. O monitoramento da temperatura da parede do cilindro é uma ferramenta muito útil para ajudar a reduzir a taxa de alimentação do lubrificante do cilindro, pois dará um aviso antecipado de dificuldades de funcionamento do pistão. O monitoramento do teor de ferro do óleo de drenagem do lado inferior do pistão em diferentes taxas de alimentação de lubrificante do cilindro fornecerá informações muito valiosas ao tentar encontrar a taxa de alimentação ideal para um determinado conjunto de condições operacionais.

6.3 Número base e detergência do óleo lubrificante

Desde meados da década de 1950, tem sido prática padrão usar óleo lubrificante para os motores de aplicação marítima com alta alcalinidade (em termos de mgKOH/g, expresso como Número Base, usualmente referido como *Base Number*) quando operando com óleo combustível pesado, a fim de neutralizar os produtos ácidos da combustão depositados na superfície da camisa do cilindro, pois ao serem misturados com o combustível nos motores 2 tempos, ocorre a reação que neutraliza os produtos ácidos.

Com combustível com baixo teor de enxofre há menos ácido condensado para neutralizar. Um *Base Number* mais baixo pode parecer a escolha lógica, mas não é tão simples. O *Base Number* do lubrificante do cilindro é uma indicação das propriedades detergentes e dispersantes do lubrificante, e não apenas sua capacidade de neutralização ácida. Detergência e dispersão são características importantes do óleo, garantindo um conjunto de anéis limpo e, portanto, anéis sem restrição de movimento ao longo do curso. A estabilidade térmica do lubrificante também está ligada ao *Base Number*. Quando formulações mais antigas de lubrificantes de cilindro com *Base Number* abaixo de 30 (principalmente BN 12 a 15) foram usadas com combustível pesado com baixo teor de enxofre, foi observada uma contaminação mais pesada do pacote de anéis e as paredes do revestimento tendiam

a ser cobertas com camadas de laca, especialmente nas áreas mais frias. O uso desses lubrificantes não é recomendado.

A nova classe de lubrificantes BN 40 é melhor para uso com combustível com baixo teor de enxofre do que os lubrificantes BN 70 comumente utilizados, mas muitas vezes eles ainda não estão disponíveis à pronta entrega. Se um motor com histórico de dificuldades de funcionamento do pistão deve funcionar com combustível com baixo teor de enxofre, é altamente recomendável utilizar um óleo lubrificante com BN 40. Haverá menos depósitos nas partes superiores dos pistões, pois o BN 40 forma menos cinzas, e o depósito será menos perigoso, pois será formado a partir de aditivos neutralizados, diminuindo o risco de detonação. Um aumento no desgaste corrosivo pode ser evitado até certo ponto escolhendo a taxa de alimentação correta. Se o armador estiver preparado para manter a bordo uma variedade de óleos lubrificantes diferentes, eles poderão ser usados com o óleo combustível correspondente. Um motor que funcione exclusivamente com combustível com baixo teor de enxofre escolherá uma formulação de lubrificante com um BN mais baixo. Um BN mais baixo resulta em menos depósito de cálcio no turbocompressor ou na caldeira de gases de escape e uma taxa de alimentação mais baixa tem um efeito semelhante. O cálcio forma a maior parte deste depósito e o teor de cálcio de um lubrificante é proporcional ao seu BN.

Sendo assim, em motores que funcionam com óleo combustível com baixo teor de enxofre, lubrificantes com BN 70 devem ser evitados, a fim de prevenir a formação de depósitos pesados no topo do pistão. Os depósitos no pistão são resíduos da degradação térmica do lubrificante. Se for permitido que os depósitos se acumulem, eles pressionarão a superfície de deslizamento da camisa em uma determinada parte do curso do pistão. Eles então limparão o filme de óleo lubrificante e permitirão o contato metal-metal entre os anéis do pistão e a camisa. Um rápido aumento de carga é particularmente perigoso durante o funcionamento do motor usando esse tipo de lubrificante, pois com a carga alta ocasionada pela formação de depósitos, diminuindo o espaço entre pistão e camisa, fará com que o pistão pressione fortemente a superfície da camisa, levando a danos acelerados no conjunto.



Figura 37 – Pistão que utilizou lubrificante BN 70 por algumas horas de operação (Fonte: Considerations for using low-sulphur fuel, Wartsila, 2002)



Figura 38 – Detalhe da figura 37, mostrando a formação de depósitos no topo do pistão (Fonte: Considerations for using low-sulphur fuel, Wartsila, 2002)

A figura 37 mostra o resultado da utilização do óleo lubrificante BN 70 nas vazões de 2,1 g/kWh e 2,4 g/kWh respectivamente, quando utilizado um combustível com baixo teor de enxofre. Podemos ver que nesse caso o aumento da taxa de alimentação somente serviu para aumentar a quantidade de depósitos no topo do pistão. Além disso, o detalhe do pistão da direita na figura 37, representado na figura 38 mostra o nível de formação de depósitos pesados oriundos do óleo lubrificante em apenas algumas horas de funcionamento, de acordo com relatório técnico da Wartisila (Michael Welsh, *Considerations for using low-sulphur fuel*, Wartisila, 2002). Com essa condição de formação de depósitos, pode acabar ocorrendo uma remoção do filme lubrificante da camisa do cilindro e ocasionando um desgaste severo e repentino.

Para entender o que desencadeia o desgaste severo com combustível com baixo teor de enxofre e o torna “repentino”, uma comparação com o conhecido mecanismo de desgaste por arraste de água é útil. Se por exemplo, houver uma falha na separação de água de arrefecimento e óleo lubrificante por algum dano na junta do cabeçote, o contato físico de gotas de água no filme de óleo e nas superfícies do anel desestabilizam o filme de óleo. Este é um mecanismo bem conhecido que leva ao desgaste súbito. Da mesma forma, quando o depósito no topo, em vez de gotículas de água, remove o filme de óleo da superfície de rolamento a um grau em que a recuperação não é possível, também ocorrerá um desgaste severo repentino. O mecanismo de desgaste é principalmente abrasivo, envolvendo o material da fase dura da superfície da camisa do cilindro, ou superfície de deslizamento dos pistões e anéis de segmento, quando pela combinação do volume de depósitos pesados no topo do pistão, remoção do filme de lubrificação e movimento dos pistões, ocorre o arrastamento de partículas duras pelos anéis de segmento, que leva o conjunto a um desgaste severo.

7. MUDANÇAS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E CALORIFICAS DO HSF PARA O VLSF: PRINCIPAIS PROBLEMAS E ADAPTAÇÕES NECESSÁRIAS

As falhas do motor causadas por anéis de pistão quebrados e desgaste excessivo da camisa aumentaram desde o início da aplicação da IMO2020. Altos níveis de depósitos provenientes da combustão e resultados elevados de análises de raspagem foram atribuídos à má detergência do óleo lubrificante do motor e, em resposta, os OEMs de motores (*Original Equipment Manufacturers*) reagiram exigindo que os produtores de óleo lubrificante melhorassem suas formulações para combater os depósitos e desgaste do revestimento que foi observado ao usar VLSFO. Poucos questionaram por que a incrustação era agora um problema maior depois que a indústria mudou para um combustível supostamente “mais limpo”, “mais leve”. Especialistas em combustíveis argumentaram desde o início que, se os depósitos e o desgaste do revestimento estivessem aumentando, apesar do uso de óleo lubrificante projetado para um combustível mais residual (mais impurezas para serem neutralizadas pelas propriedades dispersantes e detergentes dos óleos lubrificantes), a indústria deveria observar a qualidade da combustão desses combustíveis em vez de tratar os sintomas de má combustão ajustando os padrões dos óleos lubrificantes.

Os últimos relatórios confirmam isso, ou seja, foi demonstrado que a qualidade da combustão de alguns VLSFOs é um dos principais contribuintes para danos ao motor. Os produtores de óleo lubrificante alertaram que, mesmo que aumentem a detergência para superar o aumento nos depósitos de combustão causados pelo VLSFO, o período prolongado após a queima desses combustíveis de baixa qualidade (quando são de baixa qualidade) removerá o filme de óleo lubrificante de qualquer nova formulação, tornando inútil qualquer aumento na detergência (“*Is VLSFO damaging your engine?*”, INNOSPEC, 2020).

7.1 Qualidade do combustível

Medidas tradicionais de qualidade de combustível, como o CCAI (*Calculated Carbon Aromaticity Index*), um cálculo desenvolvido na década de 1980 para prever a qualidade de combustão do HSFO com base em sua viscosidade e densidade, oferece poucas informações sobre as características de combustão ou pós-queima do VLSFO, que contém diferentes componentes de mistura, quando comparado aos HSFOs tradicionais.

Na Figura 39 vemos dois combustíveis com CCAI semelhantes, BFOS (Bunker Fuel Oil – Singapura) e BFO-A (Bunker Fuel Oil – Los Angeles). Embora o BFO-S seja um HSFO tradicional com um teor de asfaltenos mais alto, foi o BFO-A com baixo teor de enxofre que causou danos e arranhões no motor. A causa pode ser vista claramente quando comparamos a duração da combustão entre os dois combustíveis. Embora ambos tenham um início de ignição semelhante, o período de combustão mais longo no combustível mais leve faz com que as chamas atinjam a superfície da camisa, removendo a película de óleo lubrificante e causando danos ao motor. Além disso, chamas prolongadas podem intensificar a formação de depósitos pela queima da película limite de óleo lubrificante.

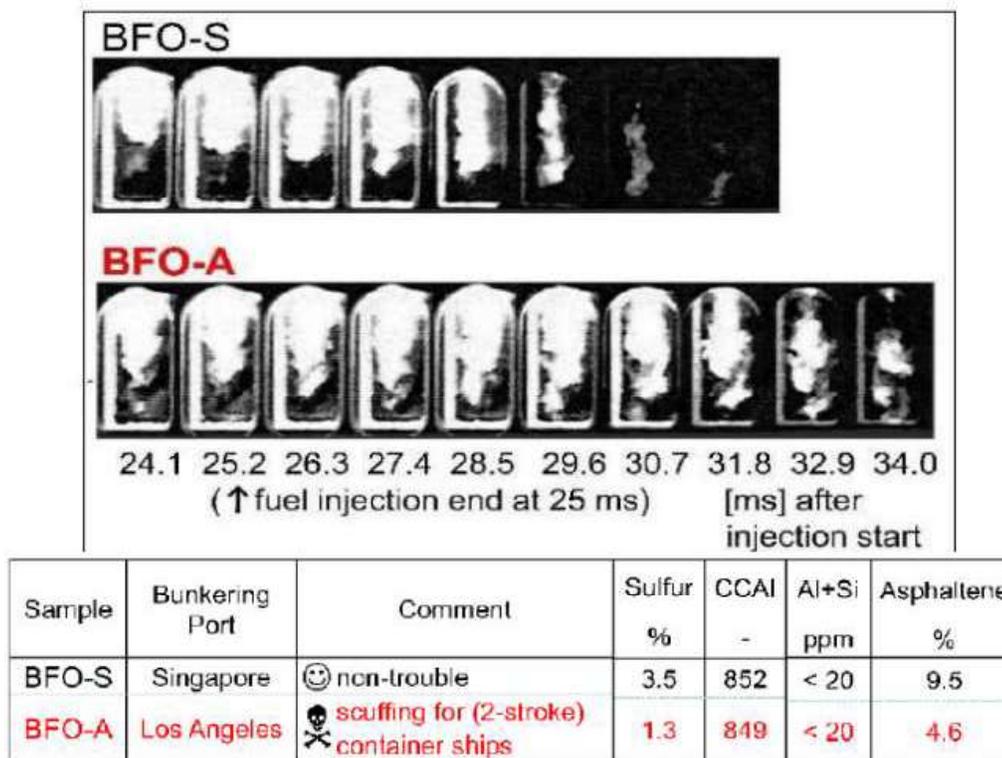


Figura 39 - Qualidade de combustão de combustíveis marítimos com baixo teor de enxofre após 2020. Ilustra como um combustível com baixo teor de enxofre e CCAI, na realidade, tem características de combustão ruins (Fonte: “Is VLSFO damaging your engine?”, INNOSPEC, 2020)

7.2 Qualidade da combustão

Quando uma alta proporção de componentes parafínicos é combinada com aromáticos residuais (que inclui os asfaltenos), como no VLSFO (Figura 40), os componentes parafínicos mais leves diluem os aromáticos protetores (maltenos por exemplo), produzindo instabilidade que faz com que o asfalteno cresça em moléculas muito maiores (aglomeração) que requerem mais oxigênio para queimar completamente. É por isso que estamos vendo mais casos de combustão incompleta, desgaste da camisa e depósitos no motor, apesar do aumento do teor de parafina.

Parafínicos – hidrocarbonetos de cadeia linear, muitas vezes de fluxos de refinarias secundárias. As parafinas são propensas a oxidação rápida quando aquecidas, ou decaem como cera em baixas temperaturas.

Aromáticos – Estruturas semelhantes em anéis de benzeno. Os asfaltenos podem permanecer estáveis quando cercados por uma porção aromática (resinas, aromáticos, maltenos) por longos períodos, no entanto, na presença de uma mistura de parafina significativa, os asfaltenos começam a “aglomerar”; crescendo para formar lodo em tanques, ou promovendo a má combustão.

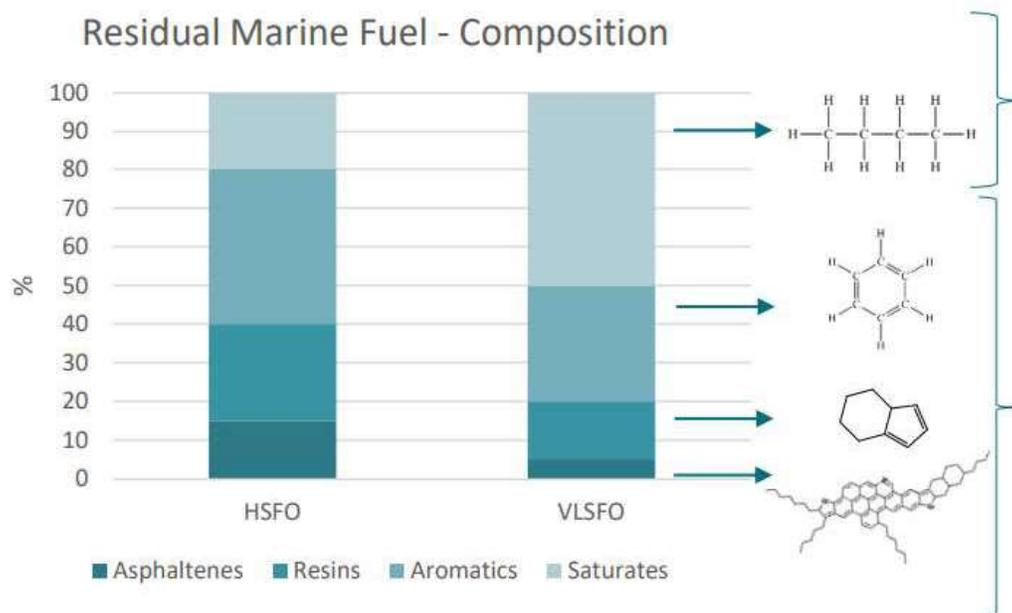


Figura 40 - As proporções típicas de mistura de combustíveis marinhos residuais modernos mostram uma proporção muito maior do componente saturado (parafínico) em combinação com aromáticos, que são estruturalmente diferentes, causando separação e instabilidade. (Fonte: "Is VLSFO damaging your engine", INNOSPEC, 2020)

Tudo isso significa que, embora os VSFLOs contêm menos componentes residuais em massa, aqueles que estão lá são muito menos estáveis do que os encontrados na maioria dos HSFOs tradicionais. Isso ocorre porque o HSFO contém uma alta proporção de aromáticos para parafinas, de modo que os aromáticos residuais são protegidos - permanecendo separados, estáveis e pequenos o suficiente para queimar prontamente durante a combustão. Entende-se que, se uma parte significativa do combustível não for queimada, isso afetará não apenas o funcionamento seguro da embarcação, mas a eficiência geral e, portanto, as emissões de todos os navios.

O FIA (*Fixed Ignition Analysis*) fornece uma visão da qualidade de combustão dos combustíveis. Usado tanto por especialistas em combustível quanto por grandes fornecedores de combustível, a FIA fornece o perfil de combustão de um combustível (Figura 41). Ele permite que os engenheiros identifiquem os principais marcadores de qualidade do combustível, como o ID (*Ignition Delay*), que é usado para calcular o ECN (*Estimate Cetano Number*), o EMC (*End of Main Combustion*) e o EC (*End of Combustion*). Se atrasado, isso indica a tendência do combustível para pós-combustão, combustão incompleta e produtos de combustão que levam a danos no motor.

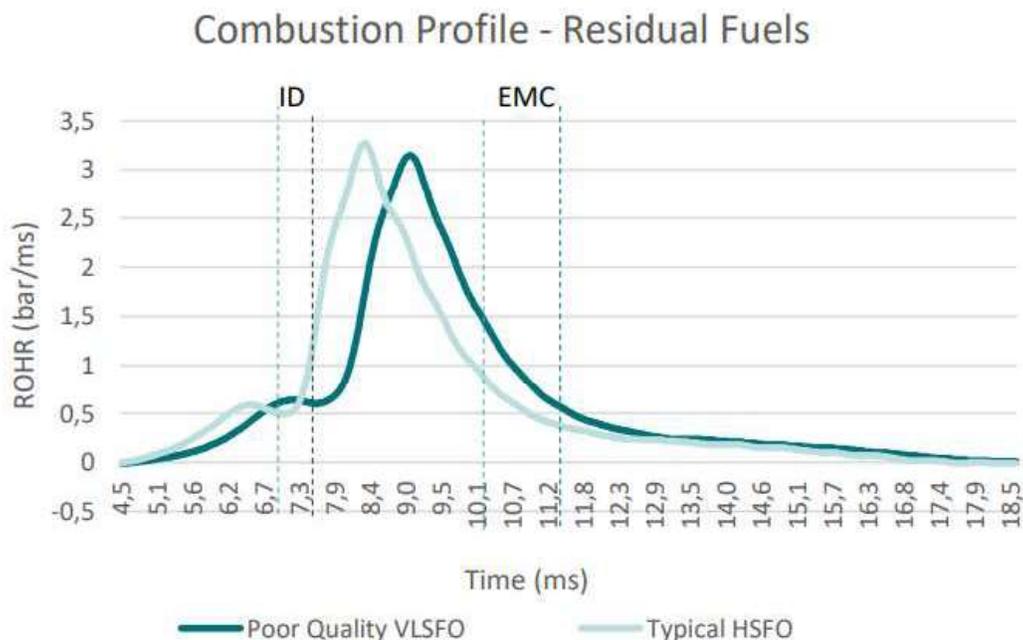


Figura 41 - O perfil de combustão de um HSFO típico (ECN 20) contra um VLSFO (ECN 16) com CCAI semelhante, mas características de combustão muito diferentes. (Fonte: "Is VLSFO damaging your engine", INNOSPEC, 2020)

Testes da FIA de vinte e cinco (25) amostras representativas de VLSFO de todos os principais portos de bunker mostraram que 23% dos combustíveis testados têm um ECN menor do que o HSFO (média HSFO ECN = 20, consulte a Figura 42). Desses combustíveis com baixo ECN, também podemos ver que o Fim da Combustão Principal (EMC) do combustível 1 ao 6, e o Fim da Combustão (EC) estão bem acima de 10ms, conforme a figura 42, indicando o período de combustão prolongado que arriscaria danos e incrustações no motor.

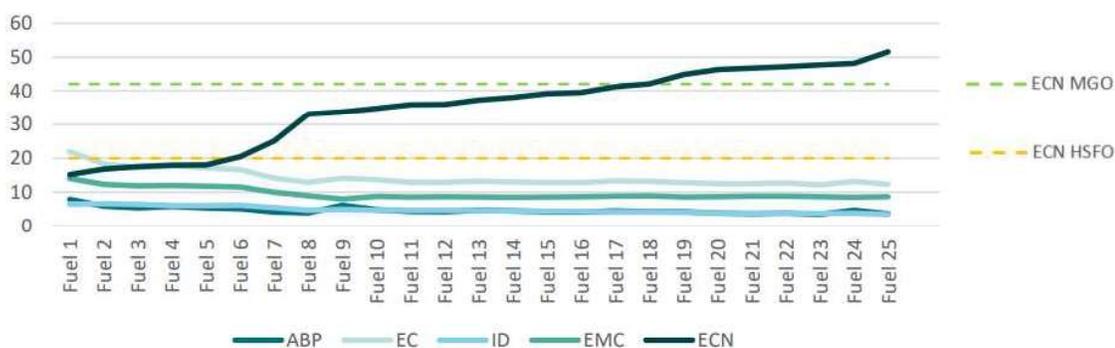


Figure 42 – Teste FIA - Distribuição das principais características de combustão de (25) VLSFO's compatíveis com ISO 8217 de todo o mundo. Todas as unidades estão em milissegundos (ms), exceto ECN, que é um valor de índice. (Fonte: "Is VLSFO damaging your engine", INNOSPEC, 2020)

7.3 Estabilidade do combustível

A estabilidade do combustível contribui tanto para a redução dos níveis de lodo quanto para uma melhor combustão. Isso é alcançado evitando que os asfaltenos cresçam em estruturas maiores (aglomerados) que se desprendem da solução em

tanques de armazenamento e purificadores, tornando-se um combustível desperdiçado ou contribuindo para danos ao motor e incrustações no sistema de exaustão devido à combustão deficiente (impurezas nos gases de exaustão e produtos da combustão).

Os combustíveis parafínicos têm dificuldade em manter as moléculas asfálticas em suspensão (separadas entre si e parte da solução). Isso significa que os combustíveis parafínicos não devem ser misturados com combustíveis aromáticos ou combustíveis com alto teor de asfaltenos devido ao alto risco de precipitação de asfaltenos, o que resulta em lodo. Como regra geral, compare a densidade e a viscosidade dos combustíveis; Se a densidade e a viscosidade de cada combustível misturado estiverem próximas umas das outras, é mais provável que os combustíveis sejam compatíveis.



Figura 43 - Combustível que perdeu a estabilidade após mistura de bunkers, resultando na precipitação e aglomeração de moléculas de asfalteno (Fonte: *Ship and Bunker website*, 2020)

Abaixo, dois de alguns testes que podem ser feitos para estudar e evitar problemas de instabilidade e compatibilidade nos combustíveis:

ASTM D4740 – Spot Test

O método de teste mais comum para estabilidade e compatibilidade é o spot test. No entanto, este método tem uma limitação quando usado com VLSFOs. Este método é desenvolvido para combustíveis aromáticos contendo asfaltenos. Se for formado um anel ou mancha preta no meio do papel de filtro, indica que os asfaltenos precipitaram e os combustíveis serão incompatíveis. Alguns dos novos combustíveis de 2020 são predominantemente combustíveis parafínicos. Combustíveis altamente parafínicos e misturas de destilados podem apresentar resultados falsos por teste

pontual, indicando que os combustíveis são incompatíveis, quando na verdade são compatíveis. O resultado falso-positivo é devido ao pigmento, separação de cera e não precipitação de asfaltenos.

ISO 10307-1/ISO 10307-2 - Teste de sedimentos

Sedimento total acelerado (TSA), Sedimento total existente (TSE) e Sedimento total potencial (TSP): A razão para a realização de todos os três testes é entender a condição geral de sedimento do combustível. Com base no documento Publicly Available Specification (PAS 23263), o teste TSA não é aplicável para todos os VLSFOs, uma vez que foi demonstrado em diferentes estudos que em alguns casos o TSA é inferior a 0,1% enquanto o TSP é superior a 0,1%. Portanto, recomenda-se usar o TSP como método de referência para avaliar a estabilidade dos combustíveis. Abaixo estão alguns pontos práticos úteis relacionados ao teste de sedimentos:

- Se o TSE e o TSP estiverem altos, o combustível pode causar lodo purificador imediato
- Se o TSE estiver baixo e o TSP estiver alto, a embarcação pode apresentar lodo no purificador depois de um tempo, o que significa que o combustível pode ficar instável após um longo período de armazenamento.
- Se o TSA for maior que o TSP, a amostra terá um risco maior de instabilidade após a mistura e durante o armazenamento de longo tempo (quando o TSA de uma amostra for maior que 0,06% em peso).

Esses dois métodos podem fornecer mais informações sobre a compatibilidade do combustível investigando o ponto de floculação do asfalteno. Nem todos esses métodos são aplicáveis a amostras com baixo teor de asfaltenos. São necessários equipamentos especializados e operadores treinados para realizar esses testes e avaliar os resultados. Abaixo uma tabela com o resumo de outros testes ASTM que podem ser realizados para auxiliar na resolução do problema da compatibilidade:

Métodos de predição de estabilidade: Zematra, PORLA e ROFA			
Métodos	ASTM D7060	ASTM D7112	ASTM D7157
Descrição do teste	Zematra-P ratio e taxa de floculação	Método PORLA e P-valor	Método ROFA e S-valor
Duração da análise	40-180 min	60-90 min	60-90 min
Avaliação dos resultados	Operador especializado		
Aplicabilidade	Aplicável para amostras com conteúdo de asfalteno maior que 1,0 % wt	Aplicável para amostras com diferentes conteúdos de alfteno	Aplicável para amostras com conteúdo de asfalteno maior que 0,5 % wt

Tabela 6 - Métodos ASTM para predição de estabilidade

Existem outras maneiras de prever a compatibilidade entre os combustíveis. Uma das maneiras rápidas de estimar a compatibilidade é comparando a densidade e a viscosidade dos combustíveis. Se a densidade e a viscosidade de cada combustível misturado estiverem próximas umas das outras, é mais provável que os combustíveis sejam compatíveis. Mas esse método é muito subjetivo e pode não ser preciso quando as características do VLSFO diferem muito. Tradicionalmente, o teste de compatibilidade é realizado de acordo com o protocolo de teste ASTM D4740, que é novamente subjetivo a falsos positivos.

Para superar isso, a VISWA GROUP desenvolveu dois métodos rápidos para prever a estabilidade e compatibilidade de combustíveis com base no conteúdo de PNA (parafina, nafteno e aromático) do combustível, que são explicados abaixo:

- Se os combustíveis não forem enviados para teste - o grupo Viswa desenvolveu um algoritmo PNA proprietário para prever a compatibilidade apenas com base no Certificado de Qualidade (COQ). Isto é para ajudar os compradores de combustível; gerentes de bunker para tomar decisões rápidas sobre aceitar ou rejeitar um fornecimento de combustível proposto
- Se tivermos os combustíveis no laboratório - Este é um método mais preciso e rápido para prever a estabilidade e compatibilidade de combustíveis em diferentes proporções de mistura em comparação com o teste pontual (falsos positivos), bem como o protocolo de teste TSP, que é demorado. O asfaleno é o componente mais pesado da amostra de combustível que é responsável pela sedimentação orgânica. Portanto, para manter o asfaleno em solução e ter um combustível estável, deve haver um equilíbrio entre a aromaticidade do combustível e do asfaleno. Neste método, a aromaticidade do combustível é definida pela determinação dos teores de parafina, nafteno e aromático (PNA) do combustível. Além disso, a aromaticidade do asfaleno é verificada medindo a solubilidade do asfaleno e o ponto de floculação na presença de um solvente aromático e parafínico. Usando os componentes do PNA e a aromaticidade do asfaleno, podemos prever as características de estabilidade e compatibilidade do combustível.

8. O PROBLEMA DOS FINOS CATALÍTICOS (CATFINES) E SEU POTENCIAL ABRASIVO

Os finos catalíticos, chamados de *catfines*, são partículas de alta dureza, formadas de Al-Si e outros metais de alta dureza, que são utilizadas no processo de catálise, que é parte do processo de remoção de enxofre dos óleos combustíveis, chamado de Hidrodessulfurização (HDS). Partículas de *catfines* no óleo combustível

pode ser uma causa para problemas tribológicos. Para piorar as coisas, danos como o desgaste anormal por finos catalíticos se espalham da bomba de injeção de combustível para o anel do pistão, camisa do cilindro e outras peças do motor.

O combustível residual, produto da destilação do óleo bruto, já precisa passar pelo processo de catálise com partículas catalisadoras para quebrar os hidrocarbonetos e transformar o óleo pesado em um combustível possível de ser queimado nos motores de combustão ciclo diesel 2 tempos e 4 tempos, sendo assim esse combustível já tem uma quantidade residual de finos catalíticos. Porém com as novas regulamentações limitadoras da quantidade de enxofre, esse combustível residual agora precisa passar por um processo mais rigoroso de HDS, processo que também utiliza partículas catalisadoras. O que acontece é que ao fim do processo, o combustível residual, pronto para uso e com baixo teor de enxofre apresentará uma quantidade maior de finos catalíticos, que ao entrarem nos motores e elementos como bombas, bicos etc., podem causar um grande desgaste abrasivo, com potencial de arranhões nas camisas dos cilindros, e até mesmo danos graves nos anéis de segmento e bicos injetores, levando o conjunto à uma falha catastrófica.

As taxas de desgaste dependem da quantidade e tamanho das partículas de *catfines*. Em certas circunstâncias, o desgaste além dos limites máximos pode ocorrer em apenas algumas semanas. O problema está afetando principalmente grandes motores de dois tempos (pois mais comumente utilizam combustíveis residuais), mas também são relatados casos envolvendo motores de quatro tempos.

Os custos desses incidentes podem ser superiores a um milhão de dólares, especialmente se as ações erradas forem tomadas pelos armadores após o problema ter sido diagnosticado. Existem, no entanto, soluções e medidas preventivas que podem ser tomadas para auxiliar na minimização do risco de problemas, e com a cooperação de órgãos legislativos e técnicos, armadores, afretadores e sociedades classificadoras o número dessas ocorrências pode ser reduzido.

8.1 Finos Catalíticos

Se os finos catalíticos chegarem ao motor, essas partículas duras geralmente ficam incorporadas nas superfícies metálicas mais macias das camisas dos cilindros e anéis do pistão, e podem afetar a operação das bombas de combustível e injetores, componentes que são intolerantes a quaisquer compostos abrasivos. A Figura 44 mostra essas partículas ao microscópio. Essas partículas embutidas podem agir como uma pasta abrasiva entre os componentes móveis. Os arranhões em formato de linhas verticais são marcados na superfície da camisa do cilindro, o que reduz as propriedades de lubrificação da superfície e acelera a taxa de desgaste do conjunto mecânico.

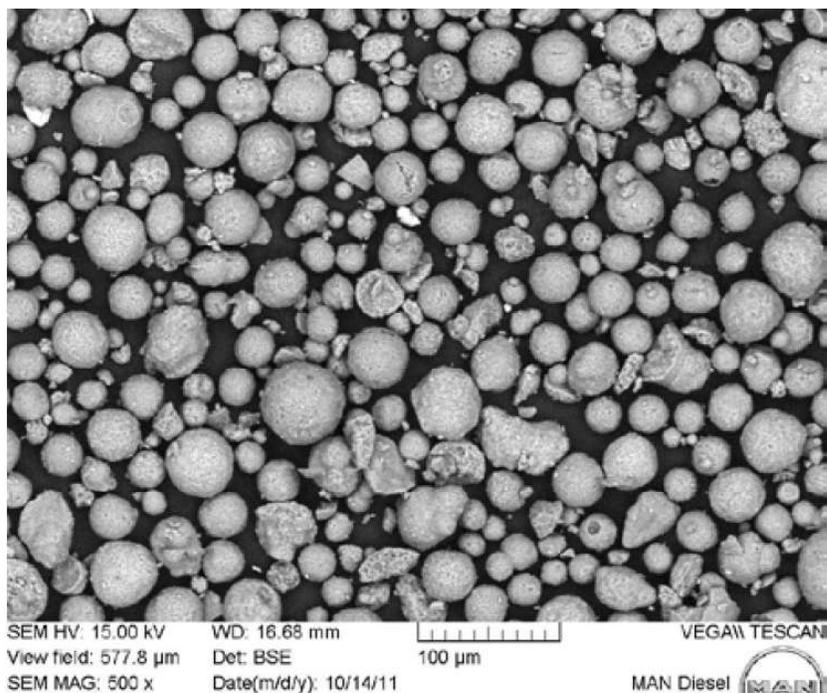


Figura 44 - Finos catalíticos usado nas refinarias vistos no microscópio (Fonte: JHC Report - Marine Engine Damage due to Catalytic Fines in Fuel, 2013)

Um estudo de amostras de combustíveis da MAN Diesel, coletadas em Rotterdam correlacionou o teor de enxofre à quantidade de finos catalíticos presentes nas amostras, e de acordo com o gráfico da figura 45, para as amostras coletadas (e local coletado) quanto menor o nível de enxofre, maior a presença de partículas de finos catalíticos.

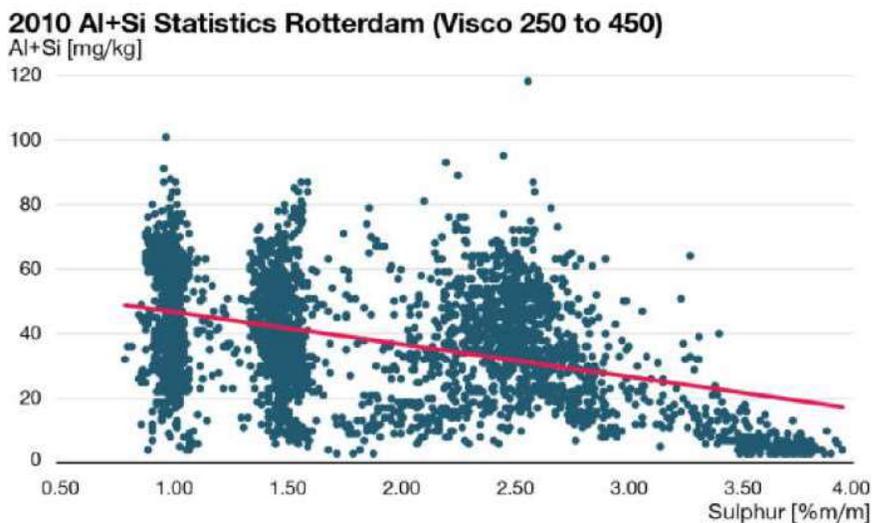


Figure 45 - Conteúdo de catfines relacionado ao conteúdo de enxofre para amostras do combustível *as bunkered* (Fonte: VPS evaluation: MAN ES, 2013)

Nos casos que envolvem altos níveis de finos catalíticos, a taxa de desgaste que normalmente ocorre ao longo de um ano pode ocorrer em questão de semanas.

Danos oriundos da presença de finos catalíticos são relatados principalmente em motores de combustão principais (MCP's) de grandes cursos e baixa rotação. Isso se deve à ação de grandes partículas abrasivas que passam pelo bico injetor de combustível e entram nas camisas dos cilindros, onde podem se fixar nas partes mais macias (lamelas) da parede do cilindro. É menos provável encontrar danos de catfines em motores de média ou alta velocidade, embora possa ocorrer. Isso se deve em grande parte ao método de respingo de lubrificação da camisa do cilindro, que lava as paredes dos cilindros com mais frequência, diminuindo a chance de catfines serem incrustados.

Ao contrário do que pode parecer, a superfície interna de uma camisa de cilindro não é polida e lisa; é precisamente trabalhada para dar uma estrutura de grafita aberta, que pode ser considerada de textura áspera. Isso é para permitir que uma película adequada de óleo lubrificante adira à superfície (aumenta a tensão cisalhante com o fluido lubrificante) para minimizar o contato metal com metal com os anéis do pistão. As áreas escuras mostradas na figura 46 são conhecidas como lamelas de grafita abertas. Essas lamelas são feitas de um material ligeiramente mais macio que o do ferro fundido circundante e, como tal, tendem a reter as partículas de finos catalíticos.



Figura 46 - Visão microscópica de uma camisa de cilindro de ferro fundido (Fonte: MAN Diesel, 2013)

A fotografia do microscópio na figura 47 mostra partículas de finos catalíticos embutidas nessas lamelas de grafite e a estrutura de ferro fundido circundante tornou-se fechada ou polida devido ao desgaste. Esse polimento inevitavelmente reduz a capacidade do óleo lubrificante do cilindro de aderir à superfície do revestimento e acaba por aumentar o contato metal-metal dos anéis do pistão. Isso resultará em desgaste rápido do anel do pistão e da camisa do cilindro.

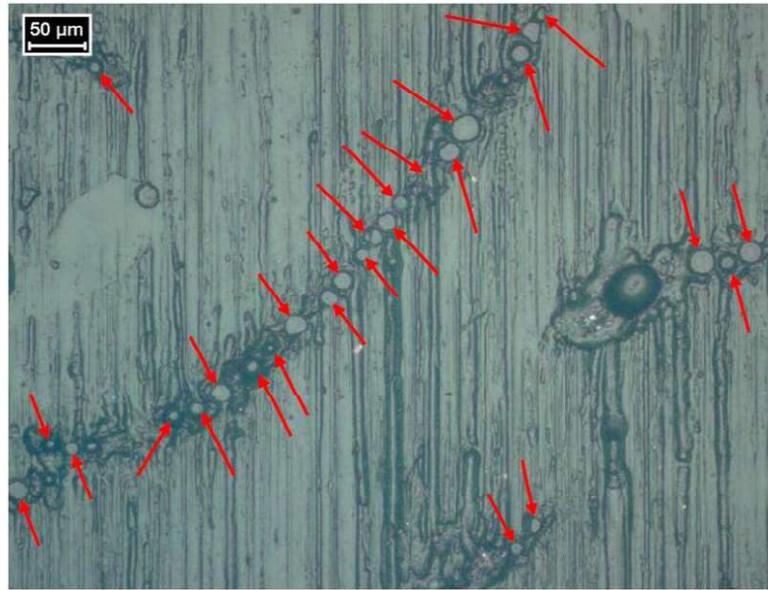


Figura 47 - As setas vermelhas mostram finos catalíticos embutidos nas lamelas do revestimento do cilindro de ferro fundido (Fonte: MAN Diesel, 2013)

Além das partículas menores de finos catalíticos arranharem verticalmente as camisas e se embutirem nas lamelas de grafita da estrutura de ferro fundido, as partículas maiores têm o potencial de causar arranhões profundos, que parecem rasgos vistos com microscópio, o que pode causar uma interferência entre camisa e anéis de segmento, levando a mais arranhões e até mesmo a uma quebra dos anéis de segmento, e perda da função dos mesmos, causando problemas operacionais ao funcionamento do motor. Abaixo na figura 48, uma imagem do dano causado por um fino catalítico em uma camisa.

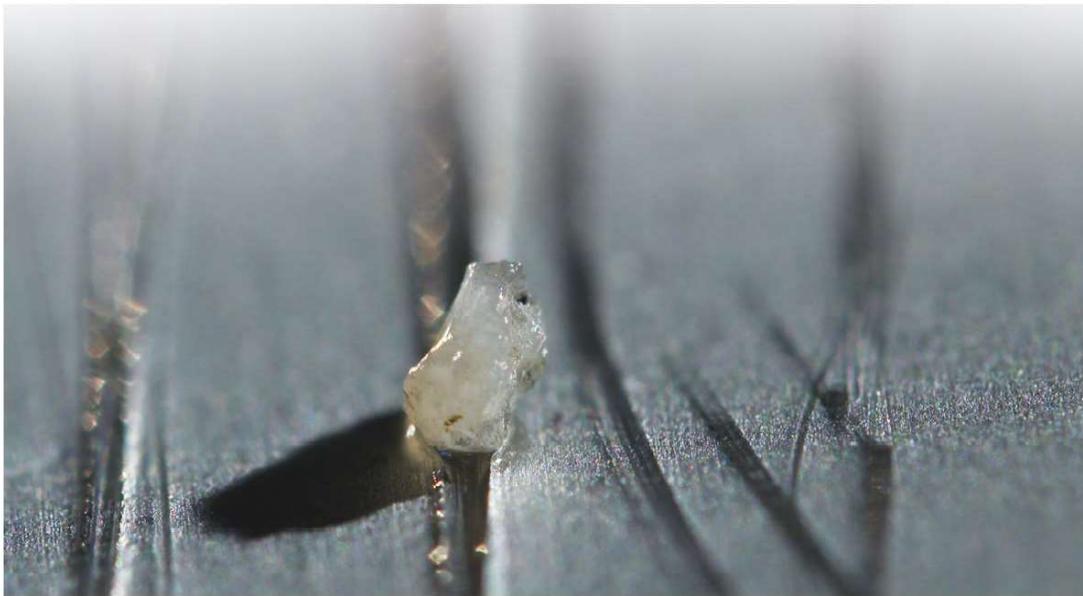


Figure 48 - Vista aumentada do dano causado por um fino catalítico (Fonte: The Alfa Laval Adaptive Fuel Line BlueBook, 2018)

8.2 Tamanho das partículas e filtragem

As partículas de catfines podem variar em tamanho físico entre 1 micrón e 75 microns. Um micrón é mais propriamente conhecido como um micrômetro e equivale a 0,001 milímetros. Em comparação, um cabelo humano tem de 50 a 70 microns, e um grão fino de areia tem cerca de 90 microns. Especialistas em motores sugerem que partículas na faixa de 10 a 25 microns são especialmente prejudiciais aos componentes da máquina, pois são capazes de entrar nos espaços entre os componentes deslizantes. A Figura 49 mostra uma visão microscópica da malha de um filtro de óleo combustível de 50 microns, com duas partículas de catfines presas dentro.



Figura 49 - Fotografia microscópica de finos catalíticos presos na malha de um filtro de combustível (Fonte: MAN Diesel, 2013)

Embora o tamanho das partículas seja importante, a quantidade de catfines presentes no combustível é o fator mais importante na extensão dos danos que podem causar. Os fabricantes de motores e seus especialistas afirmam que, por experiência, quantidades inferiores a 200 cat fines por cm quadrado (CF/cm²) encontradas embutidas na superfície da camisa do cilindro são inofensivas e bastante normais. Mais de 200 CF/cm² podem aumentar as taxas de desgaste da camisa e do anel do pistão. Se a quantidade atingir ou exceder 1000 CF/cm², o desgaste excessivo da camisa e do anel do pistão ocorrerá em apenas alguns dias. Em casos extremos, foram registradas quantidades superiores a 5000 CF/cm².

Em resposta aos crescentes episódios de danos devido aos catfines, tanto a ISO 8217 quanto a CIMAC (*Conseil International des Machines à Combustion*) especificaram que o conteúdo de catfines no óleo combustível entregue ao navio não deve exceder 60 ppm. Os fabricantes de motores geralmente exigem que o nível máximo de catfines seja reduzido ainda mais pelo sistema de tratamento de combustível a bordo para um máximo de 10 ppm antes da injeção de combustível no motor. À medida que o nível de catfines no combustível armazenado é reduzido através da filtragem e tanques de assentamento, os construtores de motores esperam uma redução relacionada na quantidade de catfines no combustível que entra no motor.

A qualidade do óleo combustível varia, mesmo entre combustíveis nominalmente classificados como do mesmo tipo. As mudanças nas demandas dos bunkers trazem novos combustíveis para o mercado. Portanto, é essencial ter especificações precisas do combustível armazenado. É igualmente importante interpretar os parâmetros com precisão e saber quais podem ser afetados pelo tratamento a bordo. O teor de água, sedimentos, sódio e finos catalíticos podem ser efetivamente reduzidos pelos sistemas de separação a bordo. Algum teor de cinzas também pode ser reduzido. Também é importante avaliar os níveis de zinco, fósforo e cálcio no combustível, pois isso pode indicar a presença de óleo lubrificante no combustível.

A Figura 50 ilustra um sistema de tratamento de combustível típico. As unidades principais são o tanque de decantação, separador, tanque de serviço e módulo de condicionamento de combustível ou FCM (também conhecido como sistema de reforço). O sistema de tratamento de combustível inclui equipamentos que limpam o combustível, incluindo o tanque de decantação, separadores centrífugos e filtros.

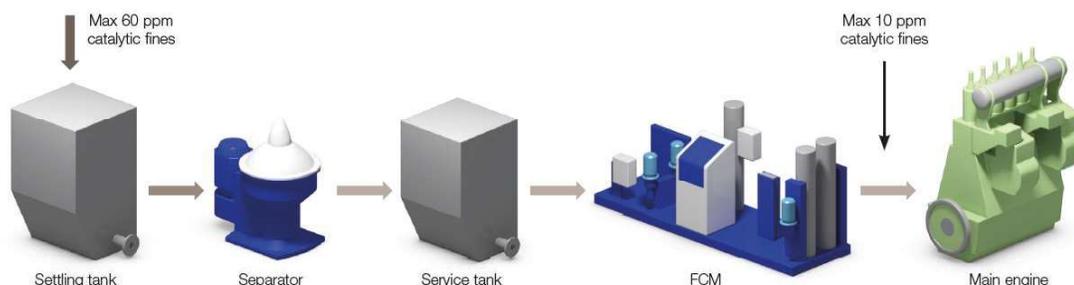


Figura 50 - Tratamento típico de combustível (Fonte: The Alfa Laval Adaptive Fuel Line BlueBook, 2018)

Importante salientar que a primeira etapa do tratamento de combustível a bordo, mostrada na figura 50, por ser um tanque de decantação, tem a função de fazer com que as partículas mais densas e pesadas se depositem ao fundo do tanque, porém em condições de maré mais agitadas, o movimento do barco pode fazer com que essas partículas subam para a superfície e se espalhem dentro do tanque de decantação, fazendo com que essas partículas sigam para o processo de alimentação, passando pelo separador. Porém a capacidade do separador é limitada, e não conseguirá filtrar o combustível para que chegue com uma quantidade máxima de 10 ppm de catfines no motor.

Para evitar a entrada de finos catalíticos em excesso no motor, soluções de filtragem mais eficientes devem ser estudadas, como um sistema de filtragem em paralelo com fluxo mais lento, entre outras soluções. Empresas como a Alfa Laval vêm conduzindo alguns estudos relacionados ao problema para propor uma solução para o mercado. Além disso, com diversos clamores sendo levantados pelo mercado marítimo, os produtores de combustíveis devem implementar soluções nas etapas de produção dos combustíveis residuais com baixo enxofre para diminuir a presença de finos catalíticos.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da presente revisão bibliográfica e técnica, fica claro que as mudanças nas regulamentações de emissões no ambiente marítimo não têm impacto somente no quesito ambiental ou financeiro, mas também em questões técnicas de funcionamento dos motores de combustão interna do ambiente marítimo. Problemas como mudança nos parâmetros de lubricidade e lubrificação, compatibilidade entre diferentes combustíveis quando é necessária uma operação com um misto de combustíveis por ocasião de entrada nas zonas de emissão controlada e presença de finos catalíticos são alguns dos temas que vêm sendo estudados pelo mercado, onde tem sido empregado um esforço para a resolução e mitigação dos efeitos deletérios relatados.

A diminuição nos níveis de enxofre (e demais poluentes em geral) requerem um processo de refino com etapas adicionais, o que acaba por aumentar o custo de produção desses combustíveis. Como o maior custo operacional dos armadores é com combustível, um aumento nos valores desses combustíveis tem impacto direto nos custos de operação, o que funciona como efeito cascata para vários setores da indústria e da economia, visto que a maior parte dos bens importados e exportados são transportados via navios de carga. O mercado de fabricantes de motores de aplicação marítima e armadores, vêm trabalhando em soluções para redução dos níveis de emissões, implementando soluções como os lavadores de gás de escape, chamados *scrubbers*; sistemas de pós tratamento nos próprios motores, como a tecnologia de tratamento de gases de escape da CATERPILLAR chamada de TIER IV, que utiliza a tecnologia do EGR (*Exhaust Gas Recirculator*) e um catalisador de gases de escape que usa ARLA 32 como elemento químico de reação com as moléculas dos gases, cujo produto da reação são gases não nocivos ao meio ambiente e à saúde.

O presente trabalho também abordou o problema da compatibilidade de combustíveis, que quando se mistura dois tipos de combustíveis, como um VLSFO (*Very low sulphur fuel oil*) e um combustível mais residual, ou até mesmo dois combustíveis com baixo teor de enxofre, porém não compatíveis, a alta proporção de componentes parafínicos pode acabar por diluir os aromáticos protetores dos asfaltenos, os deixando mais suscetíveis a aglomeração, formando lodo e borras no tanque e sistema de alimentação de combustível. Isso é perigoso para o funcionamento dos motores, pois pode ocorrer a formação de depósitos no pistão, o que irá acelerar o desgaste do conjunto pistão-anéis-cilindro. Além disso, diante das mudanças na composição físico-química dos combustíveis, os parâmetros de lubricidade, detergência e dispersante dos óleos lubrificantes tiveram que ser reestudados para uma faixa de *Base Number* mais adequada, além da taxa de alimentação de óleo lubrificante, que precisa ser dentro de uma faixa específica para evitar o desgaste acelerado e prematuro do sistema.

Por fim, os finos catalíticos são também uma grande preocupação nos combustíveis residuais com baixo teor de enxofre, pois são partículas de alta dureza, e se entrarem em uma quantidade maior do que a estabelecida pela ISO 8217 (60 ppm) podem ser extremamente prejudiciais para a saúde do motor. Fabricantes de sistemas de filtragem e até mesmo os OEM's (*Original Equipment Manufacturer*) dos

motores recomendam uma faixa de 10 ppm de finos catalíticos para uma operação segura.

Certamente, soluções técnicas para esses problemas continuarão surgindo até que o mesmo seja totalmente mitigado ou solucionado, porém é de suma importância que os armadores e donos de frotas de navios estejam cientes de todos os problemas levantados nesse presente trabalho para saberem a melhor forma de implementar seus programas de mitigação para as questões técnicas operacionais causadas pela mudança no cenário mundial dos combustíveis, evitando altos custos de manutenções corretivas devido a falhas e colapsos nos seus motores de combustão interna.

REFERÊNCIAS

A. Corma & B. W. Wojciechowski. **The Chemistry of Catalytic Cracking, Catalysis Reviews**. Science and Engineering, 27:1, 29-150. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01614948509342358>>

ADAMKIEWICZ, Andrzej; DRZEWIENIECKI, Jan. **The Influence of Fuels Quality on Tribological Wear in Slow Speed Diesel Engines**. 1662-9779, Vol. 252, pp 1-10. Disponível em: <doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.252.1>

ALFA LAVAL. **Marine Fuels in the low-sulphur fuel era**. Disponível em: <alfalaval.com/fuelline>

ALFA LAVAL. **The Alfa Laval Adaptative Fuel Line Bluebook**. Technical reference booklet – 2018 edition. Disponível em: <https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/refuel/Bluebook__en.pdf>

BIMCO. **2020 Fuel Oil Quality and Safety Survey**. February, 2020. Disponível em: <<https://www.bimco.org/-/media/bimco/news-and-trends/news/priority-news/2020/2020-fuel-oil-quality-and-safety-survey---report.ashx>>

BP marketing material. **MARPOL 2020 and beyond**. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/408987523/BP-MARPOL-2020-and-beyond> >

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. Vol. 1. São Paulo: Blucher, 2012.

DNV. **Shipping 2020**. Disponível em: < https://globalmaritimehub.com/wp-content/uploads/attach_365.pdf >.

FARAH, M. A. **Petróleo e seus derivados**. LTC, 2012.

GOLDMAN SACHS. **The IMO 2020: Global Shipping's Blue Sky Moment**. Disponível em: < <https://www.coursehero.com/file/45134734/IMO-2020-Global-Shipping-Blue-Sky-Momentpdf/> >

INNOSPEC. **Is VLSFO damaging your engine?** Disponível em: < <https://www.octamar.info/wp-content/themes/innospec/documents/IOSP%20Marine%20Technical%20Bulletin%20-%20Enhance%20VLSFO%20Quality%20FINAL.pdf>>

INTECHOPEN. **Diesel and Gasoline Engines**. Disponível em: < <https://www.intechopen.com/books/7377>>

INTERNATIONAL MARINE ORGANIZATION. **The 2020 global sulphur limit**. Disponível em: < <https://man-es.com/docs/default-source/2020/2020-sulphur-limit-faq-2018.pdf> >.

JOINT HULL COMMITTEE e BRAEMAR. **Marine Engine Damage due to Catalytic Fines in Fuel**. September 2013. Disponível em: <
https://iumi.com/images/documents/JHC_Catfines_Pack.pdf>

LISS, PETER S.; HATTON, ANGELA D.; MALIN, GILL; NIGHTINGALE, PHILIP D.; TURNER, Suzanne M. **Marine Sulphur emissions [and discussion] Atmospheric chemistry of Sulphur in relation to aerosols, clouds and climate**. Philosophical Transactions: Biological Sciences, v. 352, n. 1350, p. 159–169, 1997.

MAHLE AFTERMARKET. **Curso Mahle Metal Leve: Motores de Combustão Interna**. Disponível em: <www.mahle-aftermarket.com>.

NIKOPOULOU, Z e CULLINANE, K e JENSEN, A. **The role of a cap-and-trade market in reducing NO_x and SO_x emissions: Prospects and benefits for ships within the Northern European ECA**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, v. 227, n. 2, p. 136–154, 2012. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84880552063&partnerID=tZOtx3y1>
 %5Cnfile:///D:/BoxSync/baldif/Articles/Journal papers/NIKOPOULOU - The role of a cap-and-trade market in reducing NO_x and SO_x emissions.pdf>.

PETROBRAS. **Combustíveis Marítimos**. Disponível em:
 <https://petrobras.com.br/data/files/02/83/FA/2C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual_Combustiveis_Maritimos_2021.pdf>

PETROLEUM TECHNOLOGY QUARTERLY. **Refining gas processing petrochemicals**. Disponível em: <
<https://ptqmagazines.digitalrefining.com/view/347377971/>>

PIZA, Durval. **Motores de Combustão Interna**. 1. ed. Piracicaba: 1997.

SCHILER, R.A. **Análise da eficiência energética em navios mercantes e estudo de caso do consumo de combustível em navio aliviador do tipo SUEZMAX**. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

SEATRADE MARITIME NEWS. **What you need to know: The 2020 IMO fuel sulphur regulation**. Disponível em: < https://hydramotion.com/uploads/view/20200115150954_SOMWME-whitepaper_Sulphur-p2.pdf >.

SIKARWAR, Prerana; GOSU, Vijayalakshmi; SUBBARAMAIAH, Verraboina. **An overview of conventional and alternative technologies for the production of ultra-low-sulfur fuels**. May, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1515/revce-2017-0082>>

STONE, R.; BALL, J. **Automotive Engineering Fundamentals**. 1. ed. EUA: SAE, 2004.

TAKASAKI, Koji. **What are the problems of compliant fuels from 2020?** ASEF Forum, 13. Nov. 2019, Osaka. Disponível em: < <https://www.asef2015.com/asef->

forum/pdf/Session%203_2_What%20are%20problems%20of%20compliant%20fuels%20from%202020_Prof.%20Takasaki.pdf>

VARELLA, Carlos. **Histórico e desenvolvimento dos motores de combustão interna.** Área de máquinas e energia na agricultura. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Disponível em:
<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Aulas/historico_e_desenvolvimento_dos_motores.pdf>.

VISWA LAB. **Stability and Compatibility issues with VLSFOs.** Disponível em: <<https://shipandbunker.com/news/world/289524-whitepaper-stability-and-compatibility-issues-with-vlsfos>>

WELSH, Michael. **Considerations for using low-sulphur fuel.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/242231983_Considerations_for_using_low-sulphur_fuel>.

WIN GD. **Impact of Sulphur Cap 2020 on Two-Stroke Engine Tribology Aspects.** CIMAC Congress, 2019, Vancouver.